

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Desarrollo y Optimización de una Celda de Combustible de
Hidrógeno con Membrana de Intercambio de Iones (PEMFC)**

**Emilio José Tamayo Marín
Mateo Alejandro Espín Orquera
Emilia Thais Yáñez Tapia
Carlos Andrés Burbano Pantoja**

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 20 de Diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Desarrollo y Optimización de una Celda de Combustible de Hidrógeno con
Membrana de Intercambio de Iones (PEMFC)**

Emilio José Tamayo Marín

Mateo Alejandro Espín Orquera

Emilia Thais Yáñez Tapia

Carlos Andrés Burbano Pantoja

Alfredo Guillermo Valarezo Garcés, PhD

Quito, 20 de diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Desarrollo y Optimización de una Celda de Combustible de Hidrógeno con
Membrana de Intercambio de Iones (PEMFC)**

Emilio José Tamayo Marín

Mateo Alejandro Espín Orquera

Emilia Thais Yánez Tapia

Carlos Andrés Burbano Pantoja

Alfredo Guillermo Valarezo Garcés, PhD

Quito, 20 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Emilio José Tamayo Marín
Código:	00213620
Cédula de identidad:	1724403520
Lugar y fecha:	Quito, 20 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Mateo Alejandro Espín Orquera
Código:	00209964
Cédula de identidad:	1723359418
Lugar y fecha:	Quito, 20 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Emilia Thais Yáñez Tapia
Código:	00213763
Cédula de identidad:	1752720092
Lugar y fecha:	Quito, 20 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Carlos Andrés Burbano Pantoja
Código:	00202370
Cédula de identidad:	1754245262
Lugar y fecha:	Quito, 20 de diciembre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El consumo de combustibles fósiles tiene un impacto y repercusión sobre el medio ambiente. Adicionalmente, los países que no producen estos combustibles tienen una dependencia en aquellos que sí lo hacen. Es por estas razones que, las naciones buscan una transición hacia energías renovables. Una opción estudiada es la implementación de H_2 en Celdas de Combustible de Hidrógeno con Membrana de Intercambio de Iones o por sus siglas en inglés PEMFCs. Este estudio caracteriza una PEMFC y la optimiza mediante modificaciones a los canales de flujo de hidrógeno y aire. La PEMFC caracterizada produce un máximo de 4.5 [W]. Debido a la alta complejidad, el análisis y determinación del comportamiento térmico y másico de las PEMFCs sigue siendo, en la actualidad, un área de estudio.

También, se analiza los requerimientos para la implementación de un sistema de PEMFCs en un barco para un viaje entre las islas San Cristóbal y Santa Cruz, Galápagos. El barco considerado, requiere 1.00 [MW] y un total de 300 [kg] de H_2 . Para la producción de hidrógeno se plantea el uso de una planta solar de 3.06 [MW], lo que se traduce en 7117 paneles solares de 430[W]. Adicionalmente, la viabilidad económica, social y política de la implementación de esta tecnología en el Ecuador, son temas que requieren de un análisis a mayor profundidad.

Palabras clave: PEMFC, Hidrógeno, Galápagos, Optimización, Barcos, Energía, Renovable, Caracterización, Potencia, Solar.

ABSTRACT

Nations look for their energy transition, because of the impact that fossil fuels have had on their environment, and because there are countries that do not produce these fuels, therefore, they depend on those that do. The energy transition may be achieved by the implementation of H_2 in PEMFCs for energy generation. This study characterizes a PEMFC, optimizes it by modifying the gas flow channels, and analyzes the requirements for the implementation of a PEMFC system in a touristic ship for a trip between San Cristóbal and Santa Cruz, Galápagos. The analyzed PEMFC generates a maximum of 4.5 [W]. The analyzed ship requires 1.00 [MW] and a total of 300 [kg] of H_2 . To produce this hydrogen mass, a solar plant of 3.06 [MW] is proposed, which translates in 7117 modules of 430[W]. Due to the high complexity, the analysis and determination of the thermal and mass behavior of PEMFC is still an area of study. Additionally, the economic, social, and politic feasibility of implementing this technology in Ecuador, are issues that require further analysis.

Keywords: PEMFC, Hydrogen, Galápagos, Optimization, Ship, Energy, Renewable, Characterization, Power, Solar.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
TABLA DE CONTENIDO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
INTRODUCCIÓN	8
Manejo del proyecto.....	14
Cronograma.....	16
Alternativas de diseño y análisis de riesgos	17
Estándares y Normas.....	21
Materiales y métodos	22
Selección de Materiales y Componentes.....	22
Manufactura	23
Análisis del ciclo de vida (LCA).....	26
DESARROLLO DEL TEMA	28
Diagrama del sistema	28
Análisis de Riesgos	29
Diagrama de Conexión de Tuberías y Conexiones eléctricas	30
Caracterización de la PEMFC	31
Entalpía y Entropía de la Reacción	31
Gibbs Free Energy (GFE)	33
Ecuación de Nernst.....	34
Curva $i - V$	35
Eficiencia de la PEMFC	36
Diseño y optimización experimental.....	39
Paralelo Base (PB)	40
Paralelo Modificada (PM).....	40

Mixto (M).....	41
Modificación Oxígeno (MO)	42
Modificación Material (MM)	43
Curvas I-V	43
Sistema Energético: Viaje San Cristóbal-Santa Cruz	51
Flujo másico de H ₂	52
Potencia necesaria para la producción de H ₂	53
Dimensionamiento paneles solares	54
Implementación PEMFC en Prototipo	56
Manual de operación y mantenimiento	57
CONCLUSIONES.....	58
Trabajo futuro.....	59
REFERENCIAS.....	61
Anexos.....	64
A1. Diagrama de Gantt.....	64
A2. Ponderación de alternativas.....	65
A3. Matriz de Riesgos	67
A4. Manual de operación y mantenimiento	69
Ensamble y lista de partes	69
Operación de una Celda de combustible	71
Información de seguridad.....	71
Plan de Mantenimiento Recomendado.....	72
A5. Planos de la PEMFC y Modificaciones.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación del costo de consumo entre el diésel y gasolina (Eterovic et al., 2022)	9
Tabla 2 TDM Flex-Stack Kit (Fuel Cell Store).....	14
Tabla 3 Análisis económico de los componentes del proyecto.....	15
Tabla 4 Soluciones propuestas para el diseño de una PEMFC	17
Tabla 5 Resultados de ponderación de alternativas de diseño	21
Tabla 6 Componentes y materiales	22
Tabla 7 Matriz de riesgos de mayor prioridad	30
Tabla 8 Valores de entalpía y entropía para Galápagos y Quito.....	32
Tabla 9 Resultados experimentales eficiencia real de la PEMFC.....	38
Tabla 10 Área contacto de las configuraciones.....	45
Tabla 11 Análisis económico componentes planta solar	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Configuración de una PEMFC.....	11
Figura 2 Diagrama de distribución de costos	16
Figura 3 Resumen Diagrama de Gantt	17
Figura 4 Modelo CAD reproducción celda adquirida.....	18
Figura 5 Modelo CAD PEMFC con área transversal aumentada	19
Figura 6 Modelo CAD con aumento de celdas en la PEMFC	19
Figura 7 Modelo CAD PEMFC con placas de acero inoxidable	20
Figura 8 Diagrama de procesos de estructuras de flujo de grafito	23
Figura 9 Diagrama de procesos de estructuras de flujo de acero inoxidable 304	24
Figura 10 Diagrama de procesos estructuras externas de acrílico	24
Figura 11 Consumo de energía entre motor combustión interna y PEMFC (Hussain et al., 2007).	26
Figura 12 Emisiones GEI entre motor de combustión interna y PEMFC (Hussain et al., 2007).	27
.....	27
Figura 13 Diagrama de flujo del sistema	28
Figura 14 Curva I-V teórica (O'Hayre et al., 2016).....	29
Figura 15 Diagrama de conexiones gas.....	31
Figura 16 Diagrama de conexiones eléctricas.....	31
Figura 17 Curva experimental I-V de la PEMFC referencial	36
Figura 18 Curva corriente vs eficiencias PEMFC.....	39
Figura 19 Paralelo Base: Geometría Referencia Tipo Paralelo.....	40
Figura 20 Paralelo Modificado: Geometría Modificada Tipo Paralelo.....	41
Figura 21 Mixta: Geometría Modificada Tipo Mixta	42
Figura 22 Modificación Oxígeno: Geometría Modificada con un Incremento en el Área del Oxígeno.....	42
Figura 23 Inoxidable: Material Estructuras Modificado SS304.....	43
Figura 24 Curva I-V Compilación 5 Celdas.....	44
Figura 25 Curva j-V Compilación 5 Celdas.....	45
Figura 26 Curva I-V Compilación 1 Celda	47
Figura 27 Curva I-P Compilación 1 Celda.....	47
Figura 28 Curva j-V Compilación 1 Celda	48

Figura 29 Curva j-P Compilación 1 Celda.....	48
Figura 30 Residuos de producto H ₂ O en configuración PM.....	49
Figura 31 Perforaciones en canales configuración MM (material: acero inoxidable 316L)..	51
Figura 32 Prototipo para la implementación de la energía generada por la PEMFC	57

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y las repercusiones de la actividad humana en el medio ambiente han incrementado a lo largo de los años en todas las regiones y sociedades a nivel mundial. Este fenómeno se agrava por la quema de combustibles de origen fósil y los gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de esta actividad. En base a la Revisión Estadística de Energía en el Mundo, elaborada por el Instituto de Energía, en el 2022 más del 80% de la demanda energética primaria fue cubierta por combustibles de origen fósil como el gas natural, petróleo, y carbón (Energy Institute, 2023). El alto porcentaje de consumo impacta, especialmente en regiones donde los ecosistemas son frágiles como por ejemplo las islas Galápagos. Es por esta razón, que científicos y académicos buscan alternativas viables de generación energética, que no representen una amenaza al medio ambiente.

La versatilidad, disponibilidad en el mercado, facilidad de uso y almacenamiento, son algunas de las características por las cuales los combustibles fósiles son los más comunes en el transporte de pasajeros y por las cuales todavía no han sido remplazados. Para poder sustituirlos, se requiere de alternativas que cuenten con características similares. Como respuesta a la problemática presentada, especialistas han explorado el uso de hidrógeno, no solo en el sector de transporte, pero también en la industria y en el sector residencial. Una ventaja del hidrógeno sobre los combustibles comunes es la densidad energética de $120 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$ que esta molécula posee, pues es superior a la del diésel y Keroseno, $45.3 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$ y $43.5 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$, respectivamente (Godula-Jopek & Westenberger, 2016). La densidad energética y la factibilidad del uso de esta molécula en motores de combustión (Godula-Jopek & Westenberger, 2016) aportan a la viabilidad en el uso del hidrógeno como remplazo a los combustibles fósiles. Sin embargo, un obstáculo para la implementación de H_2 es que esta molécula no se obtiene de forma natural en el planeta, por lo que, para la obtención del gas se realizan procesos termoquímicos, biológicos o electroquímicos como la electrólisis. La inversión energética para los procesos mencionados debe provenir de fuentes renovables para que este gas se considere una fuente de energía limpia. El hidrógeno obtenido tras procesos que utilizan energías renovables es conocido como hidrógeno verde.

El obstáculo presentado previamente puede ser evidenciado mediante la comparación del precio de producción del diésel con el del hidrógeno. El precio actual del hidrógeno verde en Estados Unidos es aproximadamente $5 \left[\frac{USD}{kg} \right]$, pero se proyecta que para el 2030 se pueda reducir a $1 \left[\frac{USD}{kg} \right]$

mientras que el del diésel es $1 \left[\frac{USD}{kg} \right]$ (Eterovic et al., 2022). Eterovic, también compara el desempeño de ambos combustibles en un camión con capacidad de 23 toneladas de carga.

Tabla 1 Comparación del costo de consumo entre el diésel y gasolina (Eterovic et al., 2022)

Consumo Camión (EE.UU. – 23 Ton de carga)		
	Diésel	Hidrógeno
Consumo	$46 \left[\frac{l}{100} km \right]$	$110 \left[\frac{kg}{100} km \right]$
Precio	$0.87 \left[\frac{USD}{l} \right]$	$5 \left[\frac{USD}{kg} \right]$
Costo	$40 \left[\frac{USD}{100} km \right]$	$50 \left[\frac{USD}{100} km \right]$

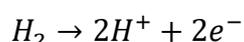
La Tabla 1 presenta el consumo y costo del combustible por cada 100 km, como se observa, el hidrógeno tiene un mayor costo.

A pesar de los desafíos presentes, el hidrógeno verde es parte del futuro de las energías renovables en el mundo y en el Ecuador. Actualmente en el Ecuador existen propuestas de proyectos de generación de hidrógeno verde, específicamente, con energía proveniente de la hidroeléctrica Paute (Acosta & Ortiz, 2023). Los valores expuestos en la investigación de Ortiz demuestran la viabilidad en la producción de hidrógeno haciendo uso de plantas hidroeléctricas ya existentes. Sin embargo, a nivel global existen lugares en los cuales las condiciones no permiten la construcción de hidroeléctricas, como, por ejemplo, las Islas Galápagos. Por esta razón, se debe evaluar alternativas como las plantas solares.

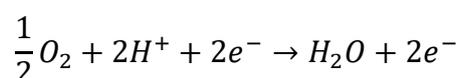
Existen distintos sistemas a base de hidrógeno para la generación de energía. Uno de estos, es la combustión de hidrógeno en motores, sin embargo, estos deberían ser fabricados con componentes y materia prima especializada ya que el hidrógeno endurece los aceros y otros materiales, consecuentemente, los fragiliza. Esta modificación en las propiedades de los componentes involucra un incremento en la probabilidad de falla durante la operación del motor (Li et al., 2022). Por otro lado, el hidrógeno verde puede ser utilizado en celdas de combustible de intercambio de protones o por sus siglas en inglés, PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

El funcionamiento de una PEMFC se basa en la reacción electroquímica que ocurre entre el hidrógeno, H_2 , y oxígeno, O_2 . La reacción ocurre en una membrana de ensamble de electrodos,

también conocidas por sus siglas en inglés como MEA (Membrane Electrode Assembly). Una MEA es un conjunto membranas, específicamente dos membranas de difusión de gas (GDL) que encapsulan dos catalizadores que a su vez encierran un electrolito (Sergi, 2010). En este proceso, las moléculas de hidrógeno, en el ánodo de la celda, se convierten en protones de hidrógeno y se liberan electrones que permiten una corriente.



Los iones pasan a través del electrolito y al juntarse con el oxígeno en el cátodo, se forman moléculas de agua. Entiéndase por ánodo el espacio donde se produce una reacción química de oxidación y cátodo donde ocurre una reacción química de reducción. En el caso de una PEMFC el ánodo es el polo negativo, mientras que, el cátodo es el polo positivo (O'Hayre et al., 2016).



De esta forma la energía química del hidrógeno se convierte, directamente, en energía eléctrica, haciendo que este método de conversión sea prometedor y ambientalmente limpio (Qin et al., 2018).

Una celda de combustible se conforma por una MEA sellada por estructuras de flujo, mismas que, gracias a los canales que poseen, permiten el paso de hidrógeno, y aire u oxígeno. El voltaje, corriente y potencia que una MEA puede llegar a producir por si sola en una celda depende de varios factores, sin embargo, para aumentar la potencia generada, se utiliza un arreglo de celdas conocido como stack de celdas. En los extremos del arreglo de celdas o ensamble general, se ubican placas de material conductor, como cobre, con el objetivo de ser conectados a una carga, por ejemplo, motores eléctricos (Ferreira et al., 2023). Finalmente, al exterior del arreglo de celdas se ubican placas de material polímero el cual cuenta con agujeros para sujetar las celdas. Adicionalmente las placas mencionadas cuentan con conexiones de ingreso de hidrógeno hacia la celda y de salida de vapor de agua y otros gases desde la celda. Un ejemplo de la celda PEMFC se muestra en la Figura 1

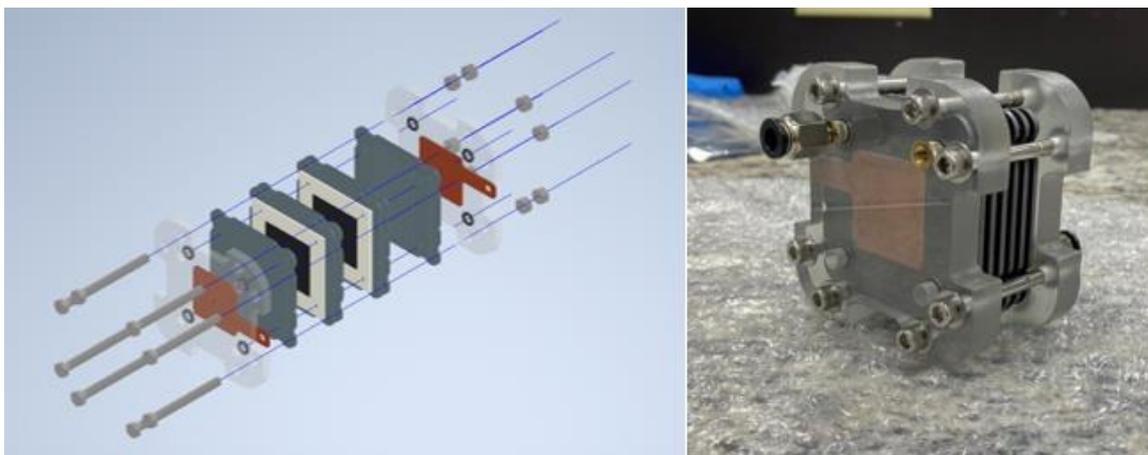


Figura 1 Configuración de una PEMFC

Las PEMFCs prometen una conversión de energía limpia y cuentan con varias ventajas en comparación a los combustibles fósiles. Estudios previos han demostrado que algunas ventajas del uso de PEMFCs es la baja temperatura de operación, rapidez de encendido, alta densidad energética, alta eficiencia energética, larga vida útil, entre otros (Baroutaji et al., 2023). Todos estos factores hacen que las PEMFCs sean una opción atractiva y competitiva para la generación de energía eléctrica, siempre y cuando se utilice hidrógeno verde.

No obstante, las PEMFCs cuentan con desventajas que pueden dificultar su aplicación tanto en la industria como en el transporte de carga y pasajeros. La producción de celdas de combustible de hidrógeno y los componentes utilizados para el manejo de este gas tienden a ser costosos debido a los materiales especializados requeridos para evitar fugas y permitir un correcto funcionamiento del sistema. Algunos de los materiales especiales y costosos utilizados son el platino, el iridio y el Nafión. Por esta razón y por los retos que se presentan en la generación de hidrógeno verde, varios inversionistas se limitan en la investigación e implementación de PEMFCs (Bodkhe et al., 2023). El alto costo en el desarrollo, producción y aplicación de PEMFCs, es un desafío que debe ser considerado.

La seguridad también se debe considerar como un criterio relevante, debido a la volatilidad e inflamabilidad del H_2 , consecuentemente, el sistema debe poseer las seguridades respectivas. Gerbec, establece que una medida de seguridad necesaria para disminuir el riesgo es el análisis de los posibles puntos de fuga en los componentes que están en contacto con el hidrógeno, de esta manera, se garantiza el bienestar material y humano (2008). El manejo a bajas presiones del hidrógeno reduce la posibilidad de accidentes como la explosión o autoignición del gas. Es por esta reducción que en este estudio no se requiere de componentes hechos en base a materiales sofisticados que pueden ser de difícil acceso en el mercado, como el acero inoxidable 316L. Los componentes y materiales

utilizados en el transporte de hidrógeno tienen un efecto en la pureza del gas, pues las PEMFCs requieren hidrógeno 99.999% puro para un buen funcionamiento.

A pesar de los retos mencionados, se estudia la posibilidad de implementación de esta tecnología alrededor del mundo. Se pueden mencionar varias aplicaciones en el ámbito de transporte. Existen estudios que comprueban la eficiencia del uso de H_2 en esta industria, como, por ejemplo, Sáinz con el objetivo de buscar una alternativa y lograr una transición al transporte sostenible estudia el uso de un vehículo híbrido, el cuál utiliza PEMFCs y gasolina para su movilidad. El modelo del estudio es el Volkswagen Polo 1.4, que utiliza hidrógeno para recorridos urbanos y gasolina para rutas de mayores distancias (Sáinz, 2014). La implementación del uso de hidrógeno en automóviles dentro de una ciudad reduciría en gran porcentaje la contaminación por hidrocarburos, al igual que la contaminación por sonido. Esta aplicación requiere de más estudios e investigación, ya que, al compararla con un motor de gasolina, el motor de inyección indirecta de H_2 requiere un mayor cilindraje (Sáinz, 2014).

Otro ejemplo, son los aviones impulsados por hidrógeno y PEMFCs. Para uso militar se han inventado pequeñas aeronaves a hidrógeno, las cuáles proporcionan dos ventajas de uso: alto contenido energético por peso y capacidad de convertir la energía contenida a baja temperatura mediante reacción electroquímica en celdas de combustible (Godula-Jopek & Westenberger, 2016). El hidrógeno al ser un gas liviano favorece y reduce el peso en las aeronaves, también se debe considerar que en el proceso de generación de energía el ruido es mínimo. La energía producida por las celdas de hidrógeno se las puede aprovechar para reducir el consumo de gasolina en las turbinas del avión, mediante un sistema híbrido que use H_2 para los componentes electrónicos (Godula-Jopek & Westenberger, 2016). Otro medio de transporte en el cual se puede implementar estos sistemas es el marítimo, en este se requiere autonomía debido a las grandes distancias que se recorren. Las ventajas presentadas para aviones y automóviles son extrapolables al uso de PEMFCs en barcos, sin embargo, se debe considerar el peso, volumen, manipulación y comportamiento térmico de la instalación de hidrógeno.

Las características, parámetros o variables que se utilizan durante la operación de la PEMFC varían dependiendo de la aplicación y los requerimientos. Por lo tanto, para la implementación de PEMFCs se requiere la comprensión y análisis de impacto de dichos parámetros en el funcionamiento y desempeño. Algunos parámetros considerados como primordiales son: el flujo másico del hidrógeno, los materiales, los canales de las estructuras de flujo (O'Hayre et al., 2016). Taner logró incrementar la eficiencia energética hasta un valor de 72.4% y una eficiencia exergética de 85,22%

mediante la optimización de los parámetros (2021), demostrando que la optimización es fundamental para el buen uso de la PEMFC.

Debido al cambio climático, los retos presentes, el futuro del hidrógeno verde, las limitaciones en Galápagos y el resto de información mencionada previamente, se realiza este estudio que se conforma por cuatro etapas, la caracterización de una PEMFC adquirida, la fabricación de una PEMFC mediante un proceso de ingeniería inversa, la optimización experimental de esta y un análisis de los requisitos para la implementación de un sistema a base de PEMFCs en un barco que viaja de la isla San Cristóbal a la isla Santa Cruz, Galápagos. Cabe mencionar que se consideran como criterios relevantes al costo de los materiales para la manufactura de PEMFCs en el Ecuador, la seguridad, la facilidad de procura, facilidad de implementación y la facilidad de manufactura.

En la etapa 1, caracterización de PEMFC, se toma datos de voltaje y corriente del stack y se analiza la curva I-V correspondiente, esta curva sirve como base para el análisis de la PEMFC fabricada siguiendo un proceso de ingeniería inversa, etapa 2. Para la optimización, se realizan tres cambios, en dos de ellos se modifica la geometría de los canales y el tercero, cambia el material de las estructuras de flujo de grafito a acero inoxidable 304, para así determinar el efecto de estas variables en el desempeño de la celda. Adicionalmente, la PEMFC fabricada tiene el objetivo de alimentar baterías para accionar un prototipo de un barco, que asemeje, una posible realidad en el transporte marítimo. Los requerimientos energéticos para la generación de hidrógeno que se utilizaría en un barco son calculados en base a los datos del estudio realizado por Choi (2016), con la diferencia de que, en esta tesis se considera una ruta de un barco entre la isla San Cristóbal y Santa Cruz, Galápagos. Los requerimientos energéticos para la generación de hidrógeno, que se utilizaría en un barco, son calculados en base a los datos del estudio realizado por Choi (2016), con la diferencia de que, en esta tesis se considera una ruta de un barco entre la isla San Cristóbal y Santa Cruz, Galápagos.

A continuación, se presentan los datos y características, provistas por el fabricante, de la celda adquirida y utilizada como línea base para este estudio.

Tabla 2 TDM Flex-Stack Kit (Fuel Cell Store)

Parámetros	Especificación
Área de la membrana	5.3 x 5.3 [cm]
Dimensiones de la placa de grafito	6.3 x 6.3 x 0.4 [cm]
Torque recomendado	8-10 [in-lbs]
Salida Nominal	3-3.5 [W]
Voltaje nominal de operación	2.3-3 [V]
Consumo de hidrógeno	53 [ml/min]

Manejo del proyecto

Para la ejecución del proyecto se inicia con un financiamiento de \$400 provisto por la Universidad San Francisco de Quito, los cuáles se distribuyen entre algunos de los insumos mencionados en la Tabla 3. Cabe destacar que, el precio del tanque de hidrógeno y la mitad del costo de la PEMFC de 5 celdas también fueron financiados por la universidad.

Las placas de grafito son adquiridas en Estados Unidos debido a su escasez y precios elevados en Ecuador. El potenciómetro de 5 watts e insertos roscados también se importaron de USA debido al precio e indisponibilidad de estos bajo las especificaciones requeridas. Las fresas de 1.5 [mm] y 3 [mm] son consideradas como elementos de alto costo en el proyecto ya que se requieren varias unidades debido a la complejidad en el maquinado de las placas de acero inoxidable. Inicialmente la universidad contaba con una PEMFC de 5 celdas, esta no se toma en cuenta en el cálculo del costo del proyecto. No obstante, en caso de considerar su valor, este es igual al del “Flex-stack kit 5 cell”.

Tabla 3 Análisis económico de los componentes del proyecto

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total	Categoría
2	Conector macho de 1/4"x1/4" NPT O.D	\$10,80	\$21,60	Insumos Eléctricos y Neumáticos
2	Racor hembra M6 x 1/4	\$3,34	\$6,68	Insumos Eléctricos y Neumáticos
4,8	Manguera neumática 6mm x2 x150psi azul	\$1,96	\$9,41	Insumos Eléctricos y Neumáticos
2	Racor macho M6 x Rosca M5	\$3,24	\$6,48	Insumos Eléctricos y Neumáticos
1	Válvula de bola ¼ SK	\$3,70	\$3,70	Insumos Eléctricos y Neumáticos
2	Racor macho M6 x 1/4" NPT	\$1,15	\$2,30	Insumos Eléctricos y Neumáticos
1	Insumos electrónicos	\$9,30	\$9,30	Insumos Eléctricos y Neumáticos
1	Insumos electrónicos	\$11,15	\$11,15	Insumos Eléctricos y Neumáticos
10	Placas inoxidable 100 x 100 x 6 mm	\$4,00	\$40,00	Materia Prima
4	Placas grafito 200 x 100 x 10 mm	\$23,53	\$94,12	Materia Prima
1	Potenciómetro	\$17,24	\$17,24	Insumos Eléctricos y Neumáticos
1	Insertos roscados	\$14,86	\$14,86	Materia Prima
40	Precio HH maquinado	\$25,00	\$1.000,00	Manufactura
2	Fresa carburo 3 mm	\$27,68	\$55,36	Manufactura
4	Fresa carburo 1.5 mm	\$22,20	\$88,80	Manufactura
1	Flex-Stack kit 5 cell	\$486,29	\$486,29	Celda y Membranas
1	Varilla roscada y tuercas	\$7,00	\$7,00	Materia Prima
1	Cilindro de 7 m3	\$1.069,60	\$1.069,60	Hidrógeno
	Total		\$2.943,89	

La Tabla 3 se resume en 5 categorías y se las grafica para la comprensión de la distribución de costos en la Figura 2.

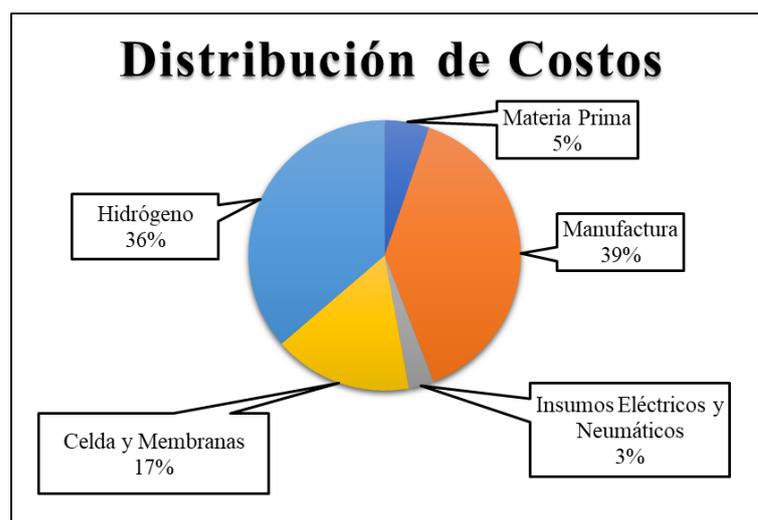


Figura 2 Diagrama de distribución de costos

Cronograma

El proyecto inicia el 21 de agosto del 2023 y finaliza el 15 de diciembre del 2023. Este se divide en 4 etapas fundamentales:

- Etapa 1: Recopilación de Información
- Etapa 2: Maquinado y Cálculos
- Etapa 3: Muestreo y Ensayos
- Etapa 4: Análisis

Estas se han enumerado en orden cronológico, pues cada una tiene actividades individuales que permiten la culminación de la etapa y en caso de no culminarse una, la siguiente no puede proceder.

A continuación, se presenta un diagrama de Gantt que permite la comprensión del cronograma y plazos establecidos para cada etapa.

ACTIVIDAD	FECHA	FECHA DE INICIO	FECHA DE FINALIZACIÓN	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etapa 1: Recopilación de Información		21/8/2023	21/9/2023					
Etapa 2: Maquinado y Cálculos		21/9/2023	21/10/2023					
Etapa 3: Muestreo y Ensayos		21/10/2023	21/11/2023					
Etapa 4: Análisis		21/11/2023	15/12/2023					

Figura 3 Resumen Diagrama de Gantt

Las actividades individuales de cada etapa se pueden observar en el [anexo A1](#).

Alternativas de diseño y análisis de riesgos

El diseño y selección de alternativas es una herramienta que permite evaluar los posibles diseños que permiten el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Posterior a la evaluación, se selecciona aquella alternativa con mayor viabilidad. Para esto se deben establecer criterios ingenieriles, que son aquellos parámetros en los cuales se basa la evaluación. A continuación, se describe las alternativas establecidas, los criterios y el proceso de selección de la alternativa de diseño final.

En base al método de evaluación de soluciones escrito por Riba (2002), se analizan las alternativas del proyecto para el diseño, caracterización y optimización de la PEMFC. La Tabla 4 muestra las alternativas consideradas.

Tabla 4 Soluciones propuestas para el diseño de una PEMFC

<ul style="list-style-type: none"> • Solución A: Diseño de una PEMFC siguiendo las características iniciales de la celda adquirida.
<ul style="list-style-type: none"> • Solución B: Diseño de una PEMFC mediante ingeniería inversa incrementando el área transversal de la celda.
<ul style="list-style-type: none"> • Solución C: Diseño de una PEMFC mediante ingeniería inversa incrementando el número de celdas.

- Solución D: Diseño de una PEMFC mediante ingeniería inversa cambiando los materiales de las estructuras de flujo, específicamente de grafito a acero inoxidable 304.

A continuación, se pueden observar los modelos CAD de las soluciones propuestas.

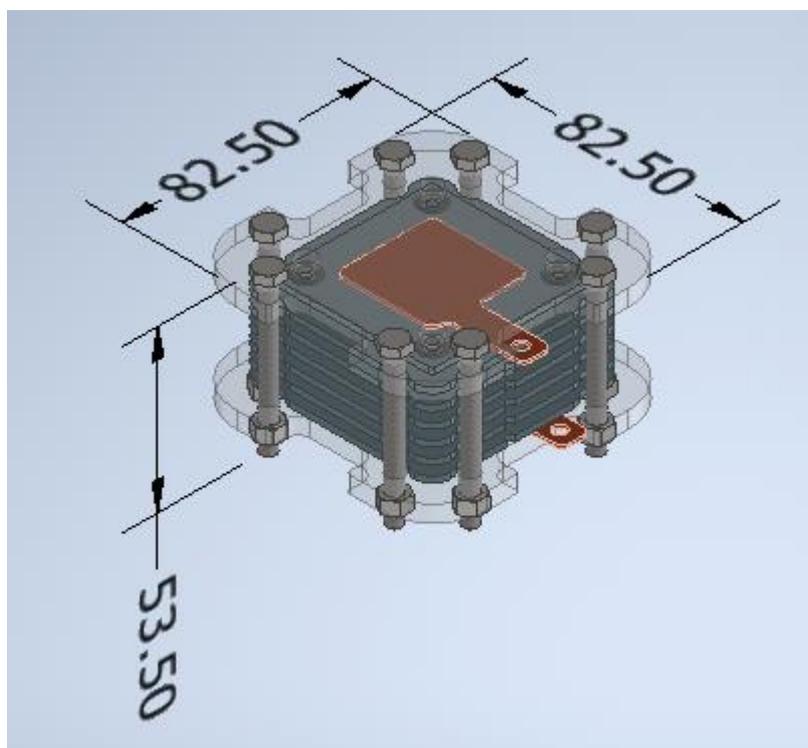


Figura 4 Modelo CAD reproducción celda adquirida

En la Figura 4, el modelo de la PEMFC cuenta con las cinco celdas que siguen y mantienen las características de la celda adquirida. Es decir que, en esta alternativa se utiliza el mismo tamaño, número y material de las celdas. Las dimensiones generales de esta alternativa son $82.5[mm] \times 82.5[mm] \times 53.50[mm]$.

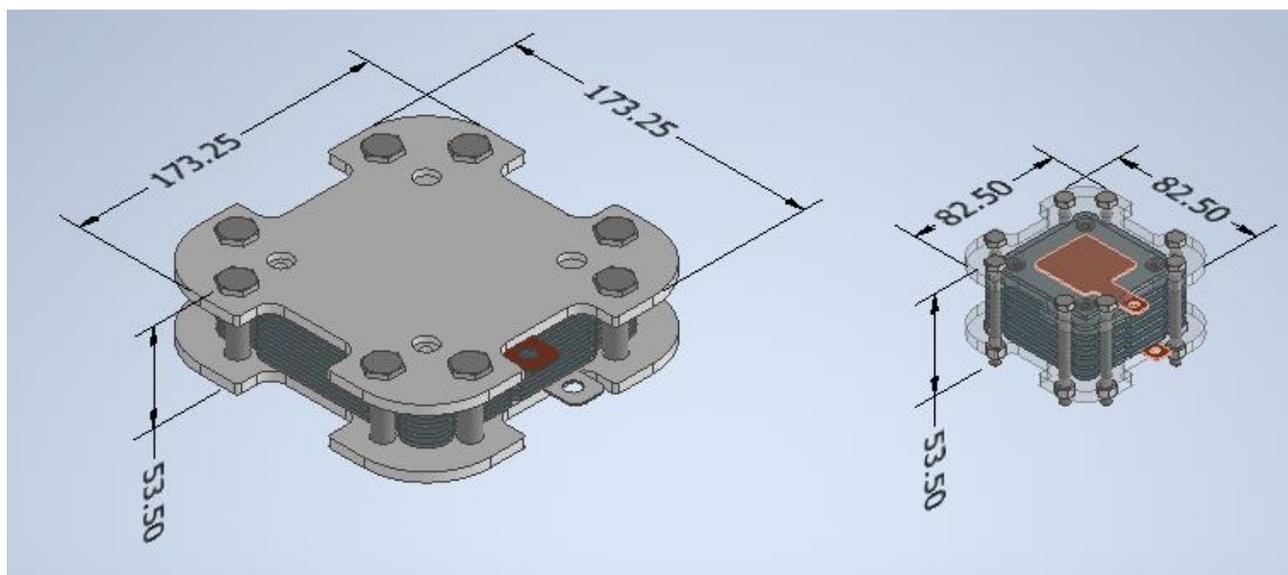


Figura 5 Modelo CAD PEMFC con área transversal aumentada

La Figura 5 detalla el aumento en el área transversal de la PEMFC y la comparación de esta con la PEMFC adquirida. De igual manera, en esta alternativa se pretende utilizar los mismos materiales para cada componente. El aumento de área ocasiona un incremento del amperaje de salida de la PEMFC. Las dimensiones de esta alternativa son $173.25[\text{mm}] \times 173.25[\text{mm}] \times 53.50[\text{mm}]$.

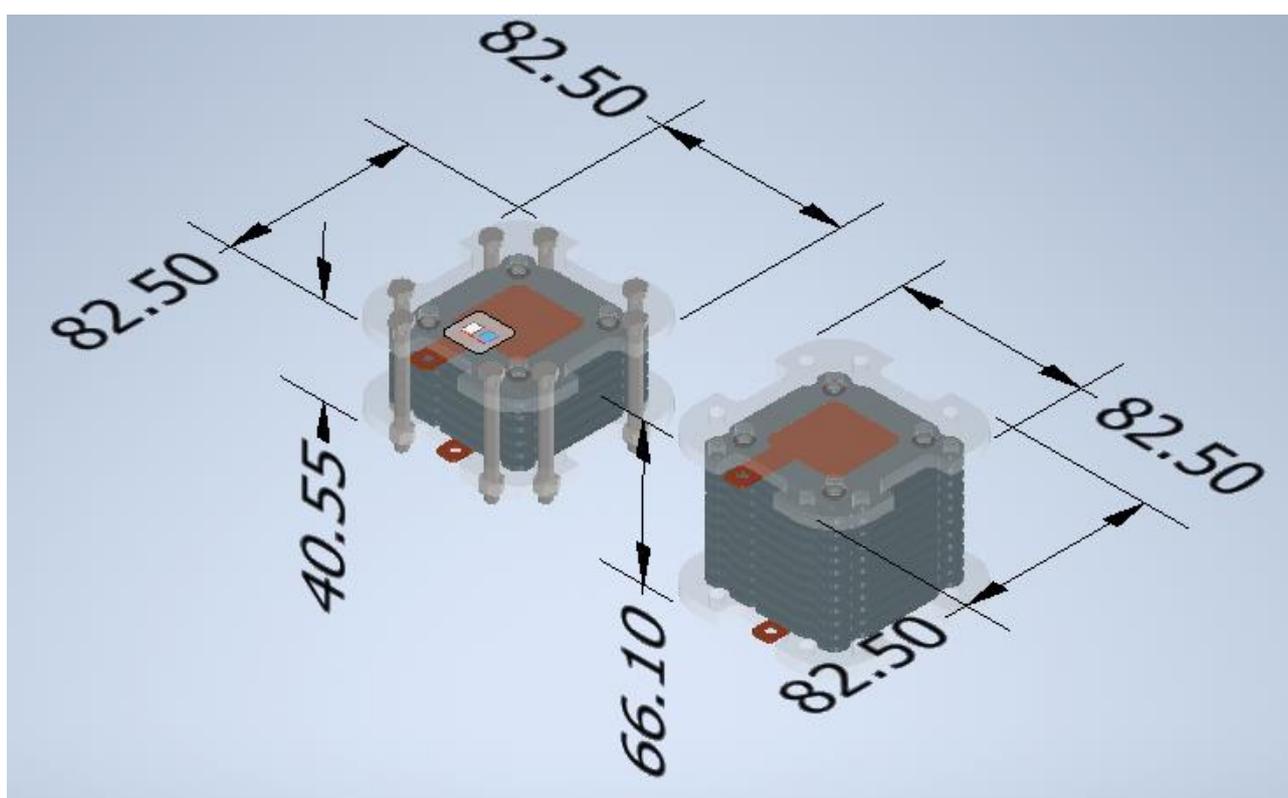


Figura 6 Modelo CAD con aumento de celdas en la PEMFC

La alternativa C, consiste en el aumento del número de celdas en la PEMFC. Este aumento de celdas representa un aumento en el voltaje total entregado por la celda. En esta alternativa, al igual que las alternativas anteriores, se utilizan los mismos materiales para cada componente. Las dimensiones de esta alternativa son $82.5[mm] \times 82.5[mm] \times 66.10[mm]$. En estas medidas no se consideran los pernos.

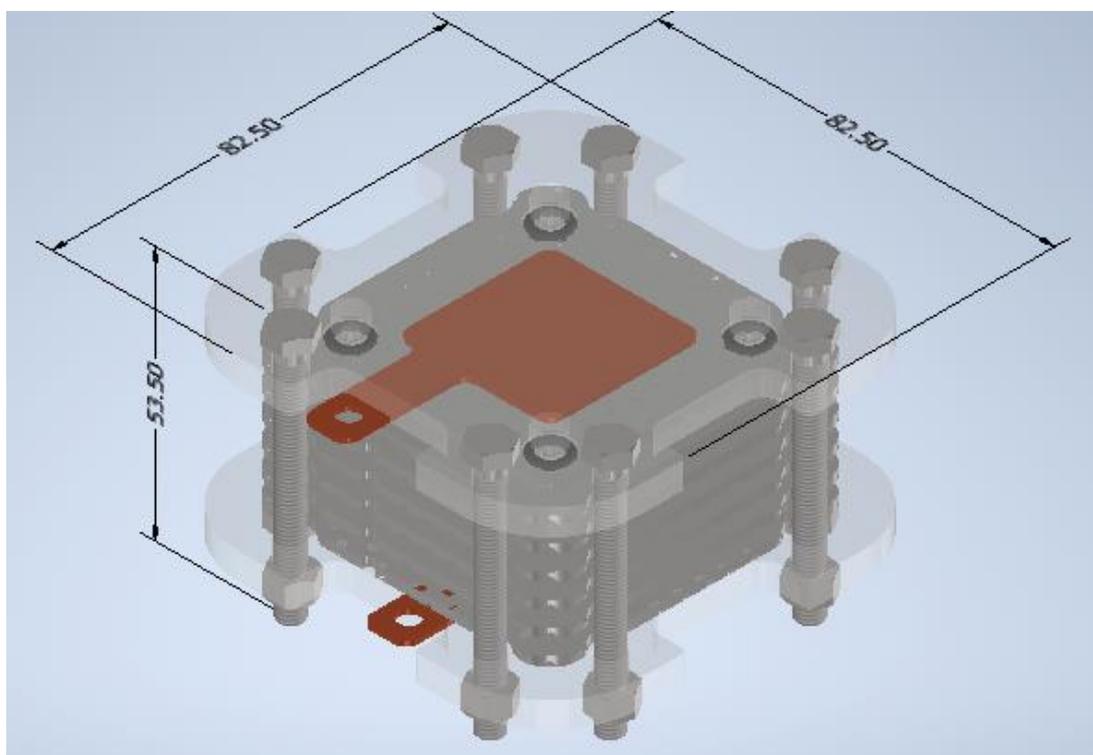


Figura 7 Modelo CAD PEMFC con placas de acero inoxidable

La última alternativa consiste en la reproducción de la celda adquirida, variando el material de las estructuras de flujo del ánodo, cátodo y bipolares, pues estas son de acero inoxidable. Esta modificación representa una disminución en el desempeño de la PEMFC, sin embargo, la facilidad de procura del acero inoxidable es mayor en comparación al grafito. Esta alternativa tiene las mismas dimensiones que la primera alternativa de diseño.

Cada solución presentada y descrita previamente es evaluada tomando en consideración los criterios ingenieriles que influyen en el desarrollo del proyecto. Los criterios ingenieriles considerados para desarrollar una celda que satisfaga los objetivos son: el precio, la eficiencia de la celda, facilidad de procura y facilidad de manufactura. Estos se organizan en base a la importancia y el impacto que pueden tener en el desarrollo del proyecto. El orden de mayor a menor establecido es el precio, seguido por la facilidad de procura, la eficiencia y finalmente la facilidad de manufactura.

Tabla 5 Resultados de ponderación de alternativas de diseño

CRITERIO	Producto Criterio 1: PRECIO	Producto Criterio 2: PROCURA	Producto Criterio 3: EFICIENCIA	Producto Criterio 4: MANUFACTURA	SUMA DE LOS PRODUCTOS	PRIORIDAD
Solución A	0.160	0.120	0.060	0.030	0.37	1
Solución B	0.040	0.060	0.060	0.015	0.18	4
Solución C	0.080	0.030	0.060	0.015	0.19	3
Solución D	0.120	0.090	0.020	0.040	0.27	2

Como se detalla en la Tabla 5 de resultados de las ponderaciones de cada criterio, la solución A, la reproducción de la PEMFC es la alternativa con mayor viabilidad en base a los criterios establecidos en la evaluación y selección de alternativas. Se adopta la solución A como directriz del presente proyecto, es decir se realizan los cálculos y análisis necesarios para obtener las características de la PEMFC adquirida y posterior reproducción de esta.

Estándares y Normas

Debido a que, el H_2 es un gas altamente volátil e inflamable, se deben seguir normas y estándares que garanticen la seguridad de los usuarios, investigadores y académicos. Por esta razón, esta sección de la introducción se enfoca en presentar estándares seguidos en este estudio y recomendados para futuros estudios.

Una parte esencial de un sistema energético a base de PEMFCs son las conexiones y tuberías de transporte. En este subsistema se pueden generar fugas, difusión del gas, endurecimiento de los materiales, y otros fenómenos que comprometen la seguridad en la operación de la celda. Estudios se han realizado y han determinado qué materiales y qué procedimientos son los adecuados para el manejo y transporte del gas. La norma B31.12 especifica los requerimientos relacionados con materiales, soldadura, conformado, inspección, examinación, operación y mantenimiento de las líneas de tuberías de hidrógeno. Esta se limita a las tuberías y líneas de tuberías de hidrógeno gaseoso o líquido (ASME, 2019).

Otra norma utilizada, para la determinación de las consideraciones básicas de seguridad es la ISO/TR 15916:2015. En esta se presentan guías para el uso y almacenamiento de hidrógeno gaseoso y líquido, también, identifica los riesgos y propiedades del hidrógeno que pueden afectar el uso y almacenamiento (ISO, 2015).

Para este estudio, las normas mencionadas, se utilizaron como base para el sistema de tuberías de hidrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de Materiales y Componentes

Una PEMFC está compuesta por membranas MEA, empaques, estructuras de flujo, una estructura exterior, pernos y tuercas. Sin embargo, en este estudio se fabrican únicamente las estructuras de flujo y la estructura exterior, la MEA no se la manufactura debido al alto costo y complejidad que conlleva.

La Tabla 6 presentada a continuación explica el criterio considerado para la selección de los materiales.

Tabla 6 Componentes y materiales

Componente	Material	Función	Razón de Selección
Estructura Externa	Acrílico	- Sostener los componentes	- El acrílico es un material no conductor que aísla, eléctricamente, los componentes de la PEMFC.
Estructuras de Flujo	Grafito	- Conducción de electrones. - Transporte de hidrogeno y aire.	- El grafito tiene propiedades eléctricas que permiten un buen transporte de electrones. - El grafito no se oxida, es compatible con el hidrógeno y el agua.
	SS304	- Conducción de electrones - Transporte de hidrogeno y aire.	- El acero inoxidable conduce corriente, sin embargo, tiene mayor resistencia eléctrica cuando se lo compara con el grafito. - Para que este se oxide se requiere de mayores tiempos de exposición al agua, en comparación a un acero común.
Pernos y Tuercas	Acero Inoxidable	- Sujeción de Componentes	- El producto de una PEMFC es agua, por lo que, cualquier metal que se encuentre en este entorno tiende a oxidarse.
Empaques	Teflón o Caucho	- Sellar las zonas por las cuales el H_2 atraviesa.	- El material es impermeable y se deforma ante la aplicación de presión.
Platinas Colectoras	Cobre	- Conducir corriente desde la PEMFC a la carga.	- El cobre es un material con propiedades conductoras.

Manufactura

Se utiliza un centro de mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado) para la manufactura de las placas de acrílico, grafito y acero inoxidable. Para cada uno de los componentes es necesario se utiliza la herramienta CAM para la generación de códigos G. Estos son importados al centro de mecanizado para realizar el proceso de manufactura. Los parámetros que se deben considerar en este proceso son las velocidades de corte, las herramientas necesarias, el avance de los dientes de la herramienta y el bloque de materia prima utilizado. El grafito y el acero inoxidable, en base a recomendaciones del fabricante MasterCut-tools, se maquina con altas velocidades de corte. En este estudio se utilizan 8100 rpm para fresas de 1.5 y 3 milímetros, mismas que son empleadas en los canales de flujo de aire e hidrógeno. También, se usan brocas de 3 milímetros para el maquinado de los agujeros de las estructuras de flujo y estructuras externas.

Adicionalmente, se realiza el diagrama de procesos del grafito, acero inoxidable y acrílico, previo al mecanizado de las partes. A continuación, se presentan los diagramas mencionados en las figuras Figura 8, Figura 9 y Figura 10.

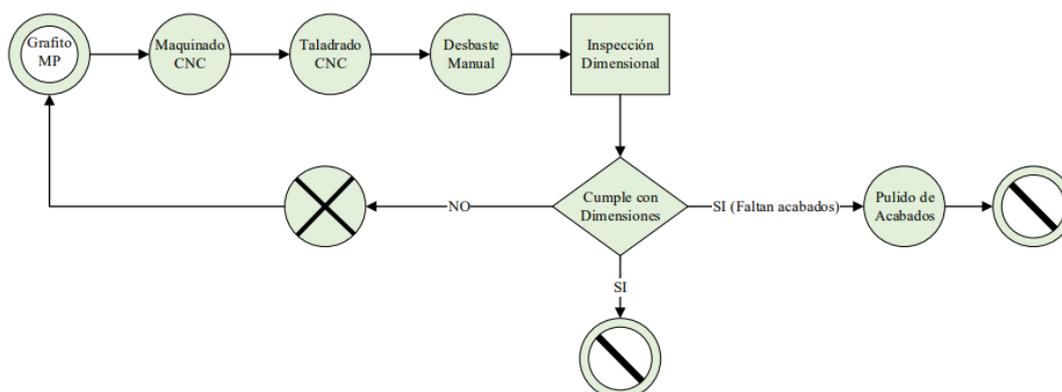


Figura 8 Diagrama de procesos de estructuras de flujo de grafito

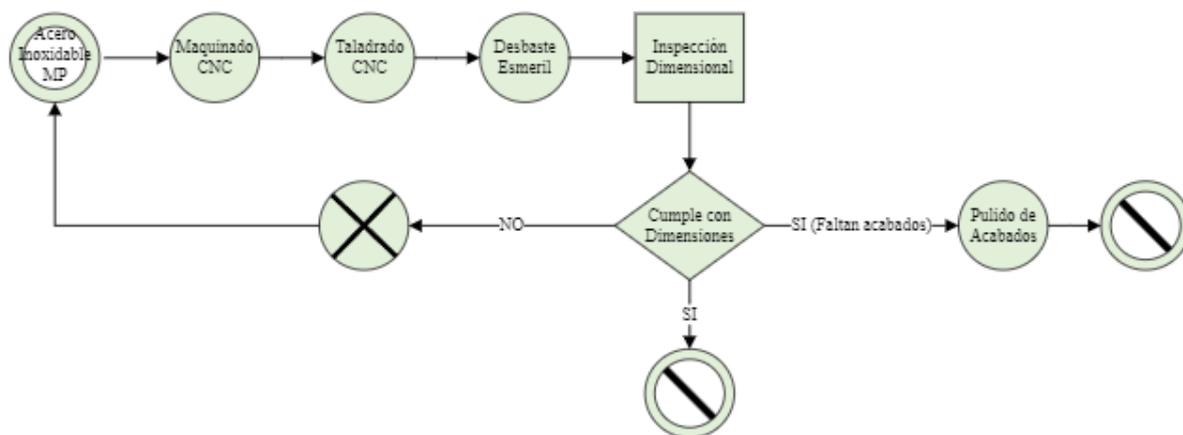


Figura 9 Diagrama de procesos de estructuras de flujo de acero inoxidable 304

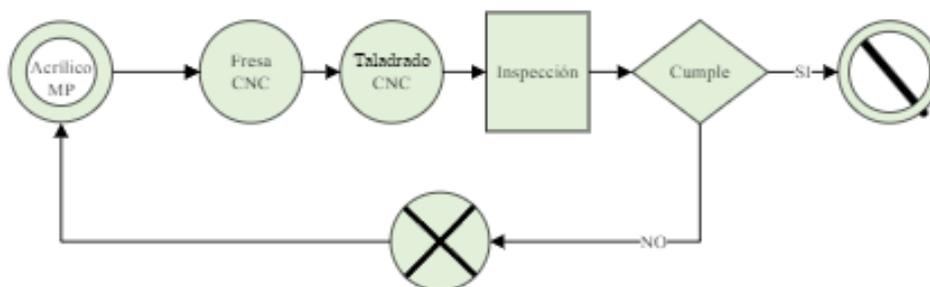


Figura 10 Diagrama de procesos estructuras externas de acrílico

Una vez definidos los parámetros de mecanizado, se inicia este proceso. Se debe colocar el material en el centro de maquinado. La sujeción del material debe ser verificada y ejecutada correctamente para evitar complicaciones de desalineación durante la manufactura. A continuación, se configura la máquina CNC. Adicionalmente, se colocan las herramientas necesarias y que fueron previamente configuradas en el diseño CAM. Finalmente, se importa el código G al centro de mecanizado y se lo configura en la máquina. El proceso descrito se aplica para cada uno de los componentes. Sin embargo, el proceso de mecanizado varía para cada componente.

El proceso de manufactura inicia con la producción de las estructuras de flujo de grafito y las estructuras exteriores de acrílico, ya que el maquinado de estas partes es más rápido y sencillo debido a la baja dureza de ambos materiales. Además, una vez realizadas ambas partes, el proceso de optimización experimental puede comenzar utilizando estas piezas. Posterior a la manufactura de las estructuras de flujo de grafito y estructuras externas acrílico, se inicia la manufactura del acero

inoxidable 304. Existen mayores retos en el mecanizado de este material, debido a la dureza característica del mismo y la geometría de los canales de flujo del gas.

En cuanto a la lubricación y refrigeración de los materiales en el mecanizado, el grafito y acrílico son procesos que se los realiza en seco, ya que, al tener durezas bajas, la herramienta no se calienta y ventajosamente, se elimina el riesgo de ruptura. El grafito se maquina a partir de una placa de grafito de $200[mm] \times 100[mm] \times 10[mm]$, y el acrílico a partir de una placa de $300[mm] \times 200[mm] \times 5.5[mm]$. Por otro lado, el acero inoxidable requiere que el maquinado se realice con grasa lubricante con el objetivo de asegurar la vida útil de la herramienta. Este maquinado inicia a partir de una placa de acero inoxidable 304 de $100[mm] \times 100[mm] \times 6[mm]$.

A lo largo del proceso del mecanizado, se identifican ciertos hitos para cada una de las piezas. Inicialmente, en el caso del acrílico, se utiliza una cortadora láser, sin embargo, este método genera únicamente cortes pasantes, por ende, ciertos canales y agujeros, no pasantes, no se lograron. Por esta razón se realiza la manufactura en el centro de mecanizado CNC, donde si se tiene un control de la profundidad de los agujeros y canales. A pesar de que el acabado del mecanizado es menor al de la cortadora láser, la platina colectora encaja en el canal y los pernos atraviesan los agujeros sin inconvenientes.

En el caso del grafito los hitos se relacionan con el reducido espesor del componente y la excesiva generación de polvo, lo que compromete el rendimiento del centro de mecanizado. Para esto se aspira de forma manual el polvo desbastado durante el proceso con grafito, con el objetivo de evacuarlo en su totalidad. De esta manera, se evita que la maquina se ensucie y que existan posibles daños en sus componentes. Adicionalmente, en el proceso de mecanizado no se corta la pieza en su totalidad, pues se la deja ligada a la materia prima sobrante con un canal de 0.75 mm, para un posterior corte manual y pulido que permitan obtener un buen acabado.

Finalmente, el acero inoxidable presenta grandes desafíos en el maquinado, ya que, es un material de alta dureza y se utilizan herramientas delgadas (1.5 [mm] y 3 [mm]), esto puede causar una ruptura de las herramientas durante el maquinado, a pesar de establecer las velocidades de corte recomendadas por los fabricantes de las herramientas. Se propone realizar perforaciones a lo largo de los canales de la estructura de flujo previo al comienzo del fresado. Esta solución reduce los esfuerzos a los que se expone la herramienta; se propone también modificar las velocidades de corte y de avance de la herramienta.

Análisis del ciclo de vida (LCA)

El análisis del ciclo de vida es una herramienta que permite comprender las repercusiones energéticas y ambientales del proceso de manufactura de una pieza o ensamble, en este caso de una celda PEMFC. Un análisis de ciclo de vida, o por sus siglas en inglés LCA (Life Cycle Assessment), analiza las emisiones que genera la extracción, producción, transporte, uso y desecho de un producto en específico, con el fin de disminuir su impacto ambiental. Hussain analiza el ciclo de vida para el consumo de energía en $[MJ/GJ]$ y la emisión de gases de efecto invernadero $[kg CO_2/GJ]$ entre la gasolina y el hidrógeno, así como también entre un motor de combustión interna y una PEMFC (Hussain et al., 2007).

Las figuras Figura 11 y Figura 12 a continuación, obtenidas de Hussain (2017), detallan el consumo de energía $[GJ]$ y emisiones de gases de efecto invernadero $[Tons CO_2]$ entre un motor de combustión interna, o por sus siglas en inglés ICE (Internal Combustion Engine) y una PEMFC. Como se puede observar el consumo de energía para la producción, ensamble, distribución y uso de un motor de combustión interna es alrededor de 900 GJ, mientras que para una PEMFC es aproximadamente de 280 [GJ]. Además, la emisión de GEI para el ICE también es mucho mayor que para una PEMFC, teniendo 63 $[Tons CO_2]$ y 5 $[Tons CO_2]$ respectivamente.

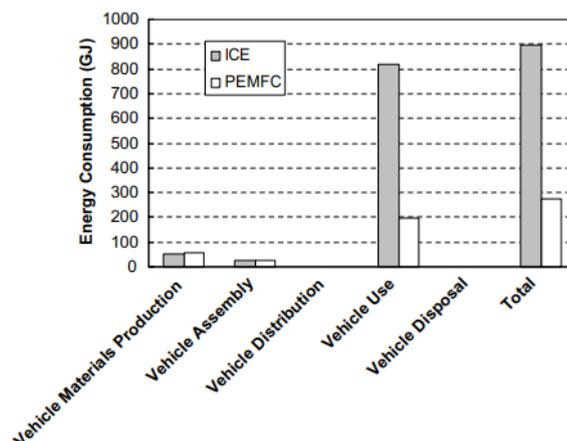


Figura 11 Consumo de energía entre motor combustión interna y PEMFC (Hussain et al., 2007).

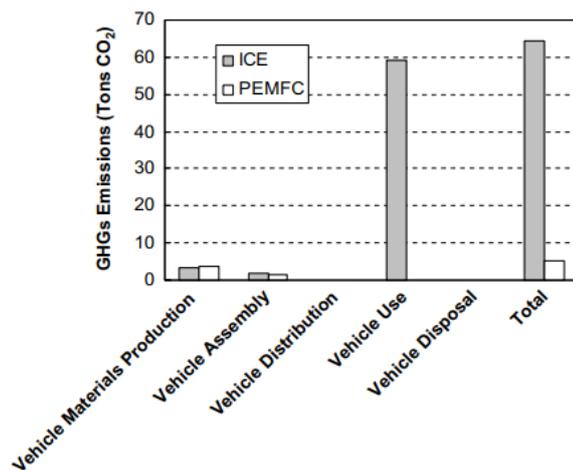


Figura 12 Emisiones GEI entre motor de combustión interna y PEMFC (Hussain et al., 2007).

DESARROLLO DEL TEMA

Diagrama del sistema

Para la caracterización y desarrollo de una PEMFC es necesario conocer y comprender las entradas, salidas y reacciones que ocurren en el sistema. La Figura 13 detalla las entradas y salidas de la PEMFC.

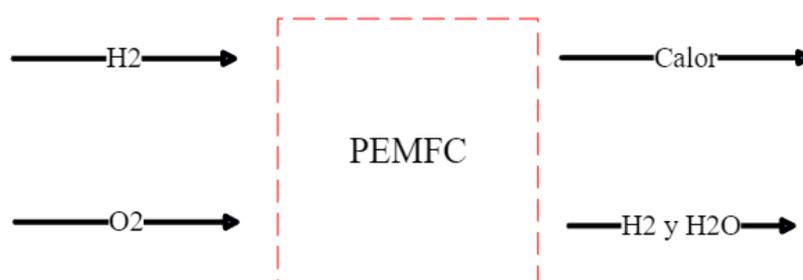


Figura 13 Diagrama de flujo del sistema

Como se puede observar, para que el sistema tenga un buen rendimiento es necesario el ingreso de hidrógeno y oxígeno del aire. El hidrógeno debe tener una pureza del 99.999% y el oxígeno proviene del aire atmosférico del entorno de la PEMFC. La reacción química que ocurre al interior del sistema consiste en la separación del átomo de hidrógeno en electrones e iones cargados positivamente (catión), proceso que sucede en el electrodo del ánodo de la MEA. Los electrones se conducen a través del material de las estructuras de flujo hacia las platinas colectoras, generando una corriente eléctrica. Por otro lado, los cationes separados se difunden a través del electrolito de la MEA hasta llegar al electrodo del cátodo de esta, donde reaccionan con las moléculas de oxígeno presentes en el aire, generando así agua como producto.

Es importante mencionar que durante del proceso de generación eléctrica y reacción química de la PEMFC, existen diferentes tipos de pérdidas. Estas pueden clasificarse en pérdidas por transporte de cargas (iónicas y eléctricas), por activación y por transporte de masa. Las pérdidas por activación hacen referencia al voltaje sacrificado que permite una reducción de la energía de activación de una reacción electroquímica, de este modo se favorece la producción de una corriente. Las pérdidas por transporte de carga, específicamente las iónicas, surgen debido a la complejidad de la difusión de los iones de hidrógeno a través de la MEA. La resistencia de los diferentes materiales de las estructuras de flujo y otros, generan pérdidas eléctricas. Finalmente, las pérdidas por transporte de masa se relacionan con el desabastecimiento de hidrógeno para la generación de corriente (O'Hayre et al., 2016). Las pérdidas mencionadas deben ser tomadas en cuenta para la caracterización y reducidas para la optimización de la PEMFC.

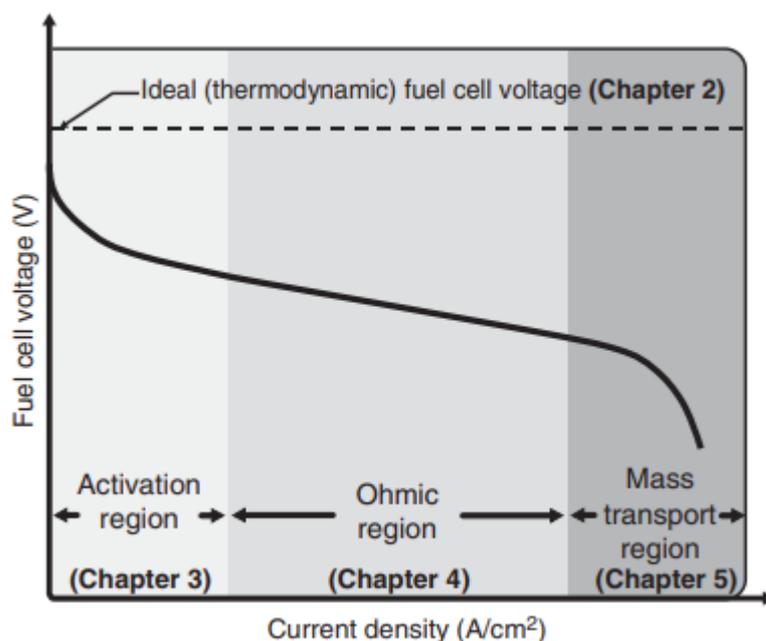


Figura 14 Curva I-V teórica (O'Hayre et al., 2016)

En la Figura 14 se observa que existen tres regiones que son dominadas por las 3 distintas pérdidas, la región de activación es dominada por pérdidas por activación, la región óhmica por pérdidas por transporte de carga, y la región de transporte de masa dominada por pérdidas por transporte de masa.

Análisis de Riesgos

Para la evaluación de riesgos presentes en el proyecto se utiliza la matriz de riesgos (MR). En la MR se establece el impacto y la probabilidad de ocurrencia de aquellos riesgos que el desarrollo de un proyecto conlleva. De este modo, tras un análisis, se establecen acciones de mitigación o planes de contingencia en caso de ocurrencia. Con el objetivo de clasificar el riesgo, se divide a los mismos por la prioridad que estos representan. Se establecen 5 categorías, Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja. La Matriz de Riesgos (Apéndice A3) exhibe todos aquellos que se han considerado en el desarrollo, operación, manufactura y adquisición de componentes relacionados al proyecto. La Tabla 7 a continuación detalla los riesgos de mayor prioridad durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 7 Matriz de riesgos de mayor prioridad

Matriz de Riesgos					
Título	Descripción	Impacto	Probabilidad	Prioridad	Decisión
Costo de MEAs	Costo Alto de la MEAs debido a los materiales que utiliza	5	5	25	Opción 1: Solicitar un incremento en el presupuesto. Opción 2. Reutilizar las MEA que se adquirieron en el kit de Fuel Cell Store.
Carencia de hidrógeno (Tanque Vacío)	Indisponibilidad de H ₂	5	4	20	Adquisición de un tanque de hidrógeno y búsqueda de disponibilidad en otras áreas de la USFQ.
Maquinado de estructuras de flujo de grafito	Complejidad en el Maquinado debido a la fragilidad del material	5	4	20	Maquinado del grafito a velocidades adecuadas y con herramientas adecuadas. Extremo cuidado en la selección de herramientas.
Daño o Fallo de las MEAs	Daño o Fallo de las MEAs	5	3	15	Manejo de Parámetros recomendados por el fabricante.

Como se observa en la MR, el “Costo de MEAs” tiene el mayor riesgo durante la evolución del proyecto. Las MEAs son el componente principal que permiten la reacción electroquímica, por lo que, el alto costo se relaciona directamente con la dificultad de adquisición. La “Carencia de Hidrógeno” también entra en la categoría Muy Alta y se relaciona con la indisponibilidad de H₂. En caso de que el hidrógeno se agote durante el desarrollo del proyecto no se podrán realizar pruebas a la PEMFC, ni tomar datos o mediciones que son necesarias para la caracterización y posterior manufactura. Finalmente, el riesgo de Maquinado de Estructuras de Flujo de Grafito se relaciona con la dificultad de maquinado y entra en la categoría Muy Alta. El maquinado de estas estructuras es un riesgo con prioridad de 20 debido a la fragilidad del material, sin embargo, posee la característica que este se desbasta fácilmente, por lo que, se recomienda un maquinado a altas velocidades con un avance lento.

Diagrama de Conexión de Tuberías y Conexiones eléctricas

A continuación, se presenta el diagrama de las conexiones neumáticas utilizadas para el suministro de hidrógeno. El hidrógeno proviene de un tanque de alta presión y se utiliza una válvula junto con un regulador de caudal para establecer los parámetros requeridos. Para la conexión de las tuberías a la celda se utilizan acoples rápidos, finalmente a la salida de la celda un conducto de escape para el desfogue de los residuos de hidrógeno y agua generados en la celda. Esta configuración de

conexiones previene las fugas de hidrógeno en el área de trabajo y reduce el riesgo para los operadores. La simbología empleada para el diagrama sigue la norma UNE-101 149. El diagrama de conexiones del gas es realizado en el software Fluidsim.

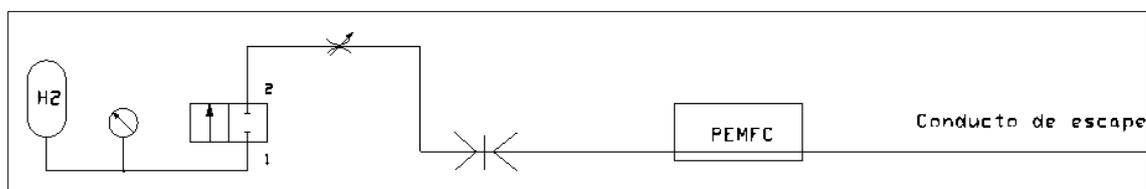


Figura 15 Diagrama de conexiones gas

Adicional al diagrama de conexiones para el gas, se proporciona un diagrama de las conexiones eléctricas del sistema, las cuales son fundamentales para la recopilación de datos para cada prueba experimental de la celda. Con dichos datos se obtiene la curva I-V. La simbología sigue la norma UNE-EN 60617 (IEC 60617). El diagrama detalla las herramientas de medición eléctrica (amperímetro y voltímetro), y una resistencia variable que soporta hasta 5 [W] de potencia.

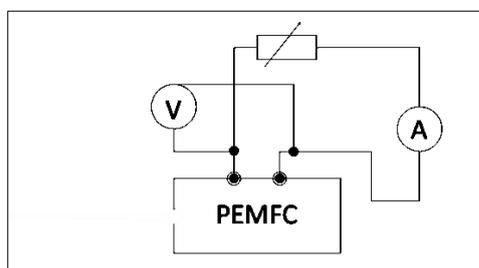


Figura 16 Diagrama de conexiones eléctricas

Caracterización de la PEMFC

Entalpía y Entropía de la Reacción

La energía teórica útil de una reacción electroquímica está definida por la diferencia de entalpía y entropía existente en la reacción. La diferencia de entalpía y entropía se calculan con las ecuaciones [1] y [2], respectivamente. En este caso los dos reactantes se representan por A y B, mientras que, el producto por M; las letras minúsculas simbolizan el número de moles de cada elemento necesarios para el balance químico de la reacción.

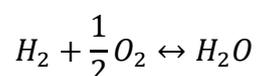


$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = [m * \Delta \hat{h}^{\circ}_{f_M}] - [a * \Delta \hat{h}^{\circ}_{f_A} + b * \Delta \hat{h}^{\circ}_{f_B}] \quad [1]$$

$$\Delta S^{\circ}_{rxn} = [m * \hat{s}^{\circ}_{f_M}] - [a * \hat{s}^{\circ}_{f_A} + b * \hat{s}^{\circ}_{f_B}] \quad [2]$$

Donde el superíndice o subíndice “°” hace referencia a condiciones STP (presión y temperatura estándar). $\Delta\hat{h}_f$ es la entalpía de formación del producto o reactante, \hat{s}_f es la entropía de formación. ΔH_{rxn} y ΔS_{rxn} son la entalpía y entropía de la reacción, respectivamente. Se debe tomar en cuenta que la entalpía y entropía varían en función de la temperatura.

La reacción electroquímica presente en la operación de una PEMFC se presenta a continuación:



Uno de los objetivos de este estudio radica en la aplicación de PEMFCs en el transporte marítimo en las Islas Galápagos, sin embargo, las pruebas experimentales son realizadas en Quito, Ecuador, por lo que, se debe considerar las condiciones atmosféricas de cada ubicación. En las Islas existen condiciones STP, mientras que la temperatura y presión de Quito se obtienen a través de la medición de dichas variables. Por otro lado, las entalpías y entropías se obtuvieron de tablas termodinámicas provistas por O’Hayre (2016). A continuación, se detallan los valores para dichas variables en la Tabla 8.

Tabla 8 Valores de entalpía y entropía para Galápagos y Quito

Galápagos	Quito
$T_o = 298.15[K]$	$T_{Quito} = 286.15[K]$
$P_o = 1[atm] = 101.3[kPa]$	$P_{Quito} = 0.71[atm]$
$\Delta\hat{h}_{f_{H_2}}^\circ = 0 \left[\frac{kJ}{mol_{H_2}} \right]$	$\Delta\hat{h}_{f_{H_2}} = -0.344 \left[\frac{KJ}{mol_{H_2}} \right]$
$\hat{s}_{f_{H_2}}^\circ = 130.68 \left[\frac{J}{K * mol_{H_2}} \right]$	$\hat{s}_{H_2} = 129.48 \left[\frac{J}{mol_{H_2} * K} \right]$
$\Delta\hat{h}_{f_{O_2}}^\circ = 0 \left[\frac{kJ}{mol_{O_2}} \right]$	$\Delta\hat{h}_{f_{O_2}} = -0.352 \left[\frac{kJ}{mol_{O_2}} \right]$
$\hat{s}_{f_{O_2}}^\circ = 205 \left[\frac{J}{K * mol_{O_2}} \right]$	$\hat{s}_{f_{O_2}} = 203.86 \left[\frac{J}{K * mol_{O_2}} \right]$
$\Delta\hat{h}_{f_{H_2O}}^\circ = -285.83 \left[\frac{kJ}{mol_{H_2O}} \right]$	$\Delta\hat{h}_{f_{H_2O}} = -286.73 \left[\frac{kJ}{mol_{H_2O}} \right]$

$\hat{s}^{\circ}_{H_2O} = 69.95 \left[\frac{J}{K * mol_{H_2O}} \right]$	$\hat{s}_{H_2O} = 66.82 \left[\frac{J}{mol_{H_2O} * K} \right]$
--	--

Se reemplazan los valores en las ecuaciones [1] y [2]

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = \left(1[mol_{H_2O}] * \left(-285.83 \left[\frac{kJ}{mol_{H_2O}} \right] \right) \right) - \left(1[mol_{H_2}] * 0 \left[\frac{kJ}{mol_{H_2}} \right] + \frac{1}{2} [mol_{O_2}] * 0 \left[\frac{kJ}{mol_{O_2}} \right] \right)$$

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = -285.83[kJ]$$

$$\Delta S^{\circ}_{rxn} = \left(1[mol_{H_2O}] * \left(69.95 \left[\frac{J}{mol_{H_2O} * K} \right] \right) \right) - \left(1[mol_{H_2}] * 130.68 \left[\frac{J}{mol_{H_2} * K} \right] + \frac{1}{2} [mol_{O_2}] * 205 \left[\frac{J}{mol_{O_2} * K} \right] \right)$$

$$\Delta S^{\circ}_{rxn} = -163.23 \left[\frac{J}{K} \right]$$

De forma análoga, se calcula estas variables bajo las condiciones atmosféricas de Quito.

$$\Delta H_{rxn} = -286.21[kJ]$$

$$\Delta S_{rxn} = -164.59 \left[\frac{J}{K} \right]$$

Gibbs Free Energy (GFE)

La “Gibbs Free Energy” es una medida del potencial termodinámico. Esta representa el trabajo teórico que se puede obtener de un sistema termodinámico a temperatura y presión constantes. En el caso de la PEMFC, la GFE representa la capacidad del sistema para realizar un trabajo eléctrico. Este valor es calculado mediante la ecuación [3] con las entalpías y entropías correspondientes.

$$\Delta g^{\circ}_{rxn} = \Delta H^{\circ}_{rxn} - T \cdot \Delta S^{\circ}_{rxn} \quad [3]$$

$$\Delta g^{\circ}_{rxn} = -285.83[kJ] - \left(298.15[K] * \left(-0.16323 \left[\frac{kJ}{K} \right] \right) \right)$$

$$\Delta g^{\circ}_{rxn} = -237.163[kJ]$$

En el caso de Quito, siguiendo un proceso análogo,

$$\Delta g_{rxn} = -239.11[KJ]$$

Este valor es útil para la caracterización de la PEMFC, ya que, al estar relacionado con el trabajo eléctrico se puede determinar el voltaje teórico termodinámico mediante la relación [4] y [5].

$$W_{electric} = \Delta g_{rxn} \quad [4]$$

$$W_{electric} = E * n * F \quad [5]$$

En la ecuación [5] E es el voltaje, n es el número de moles de electrones libres durante la reacción y F la constante de Faraday.

En el caso de las Galápagos, es decir, condiciones STP

$$\Delta g^{\circ}_{rxn} = n * F * E_o \quad [6]$$

$$\frac{\Delta g^{\circ}_{rxn}}{nF} = E_o$$

$$E_o = -\frac{(-237.163)[kJ]}{2[mol_{e^-}] * 96485 \left[\frac{C}{mol_{e^-}} \right]}$$

$$E^{\circ}_o = 1.23 [V]$$

Siguiendo un proceso análogo, para Quito el voltaje teórico es

$$E_o = 1.24 [V]$$

Finalmente, E_o representa el voltaje termodinámico teórico a STP. La PEMFC en cuestión cuenta con 5 celdas conectadas en paralelo, por lo que el voltaje incrementa en función del número de celdas.

$$E_{oTotal} = 5 * E_o$$

$$E_{oTotal} = 6.15[V]$$

El voltaje teórico termodinámico de la PEMFC estudiada es 6.15[V] para las Galápagos, mientras que para Quito es 6.2 [V]

Ecuación de Nernst

La ecuación de Nernst [7] describe las fluctuaciones del voltaje reversible dentro de las celdas electroquímicas en función de factores como la concentración de elementos, presión del gas y temperatura.

$$E = E_o + \frac{\Delta S}{nF} * (T - T_o) - \frac{RT}{nF} * \ln \left(\frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod a_{reactants}^{v_i}} \right) \quad [7]$$

v_i es el número de moles que intervienen en la reacción para que exista un balance químico y a es la actividad termodinámica. En el caso de gases ideales a es la relación de la presión real en comparación a la presión a STP del compuesto, como se muestra en la relación [8]. En el caso de los componentes puros como el agua se asume un $a = 1$.

$$a_{gas\ ideal} = \frac{P_{real}}{P_o} \quad [8]$$

Para los reactantes, se debe considerar que la PEMFC utiliza aire, de modo que solo el 21% de la presión corresponde al oxígeno.

$$a_{O_2} = \frac{P_{real} * 0.21}{P_o}$$

$$a_{O_2} = \frac{0.71 [atm] * 0.21}{1[atm]} = 0.15$$

Mientras que, para el hidrógeno, se considera una presión manométrica de 2 [psi] equivalentes a 0.136 [atm], por lo tanto, la presión absoluta en Quito es P_{realH_2} es 0.846[atm].

$$a_{H_2} = \frac{0.846[atm]}{1[atm]} = 0.846$$

En el caso de Galápagos,

$$a_{H_2} = 1.136$$

$$a_{O_2} = 0.21$$

Finalmente, se reemplazan los valores en la ecuación [7] y se obtiene el voltaje termodinámico teórico de una PEMFC en Quito y en las Galápagos.

$$E_{Quito} = 1.24 [V] + \left(-\frac{164.59 \left[\frac{J}{K * mol_{rxn}} \right]}{2 \left[\frac{mol_{e^-}}{mol_{rxn}} \right] * 96485 \left[\frac{C}{mol_{e^-}} \right]} \right) * (286.15 - 298.15)[K] - \frac{(8.314 \left[\frac{J}{K * mol_{rxn}} \right] * 286,15[K])}{2 \left[\frac{mol_{e^-}}{mol_{rxn}} \right] * 96485 \left[\frac{C}{mol_{e^-}} \right]} * \ln \left(\frac{1^1}{0.846^1 + (0.15)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

$$E_{Galápagos} = 1.23 [V] + \left(-\frac{163.23 \left[\frac{J}{K * mol_{rxn}} \right]}{2 \left[\frac{mol_{e^-}}{mol_{rxn}} \right] * 96485 \left[\frac{C}{mol_{e^-}} \right]} \right) * (298.15 - 298.15)[K] - \frac{(8.314 \left[\frac{J}{K * mol_{rxn}} \right] * 298,15[K])}{2 \left[\frac{mol_{e^-}}{mol_{rxn}} \right] * 96485 \left[\frac{C}{mol_{e^-}} \right]} * \ln \left(\frac{1^1}{1.136^1 + (0.21)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

$$E_{Quito} = 1.25[V]$$

$$E_{Galápagos} = 1.24 [V]$$

No existe variación considerable entre el voltaje termodinámico teórico de Quito y Galápagos por lo que se usan condiciones STP en el resto del estudio.

Curva i - V

La curva $i - V$ permite comprender el funcionamiento de la PEMFC en función de la corriente de operación. Estos valores, dependen de las condiciones de uso de la PEMFC. En este estudio se

utiliza un reóstato para variar la resistencia y de este modo influir en la corriente y voltaje de las celdas.

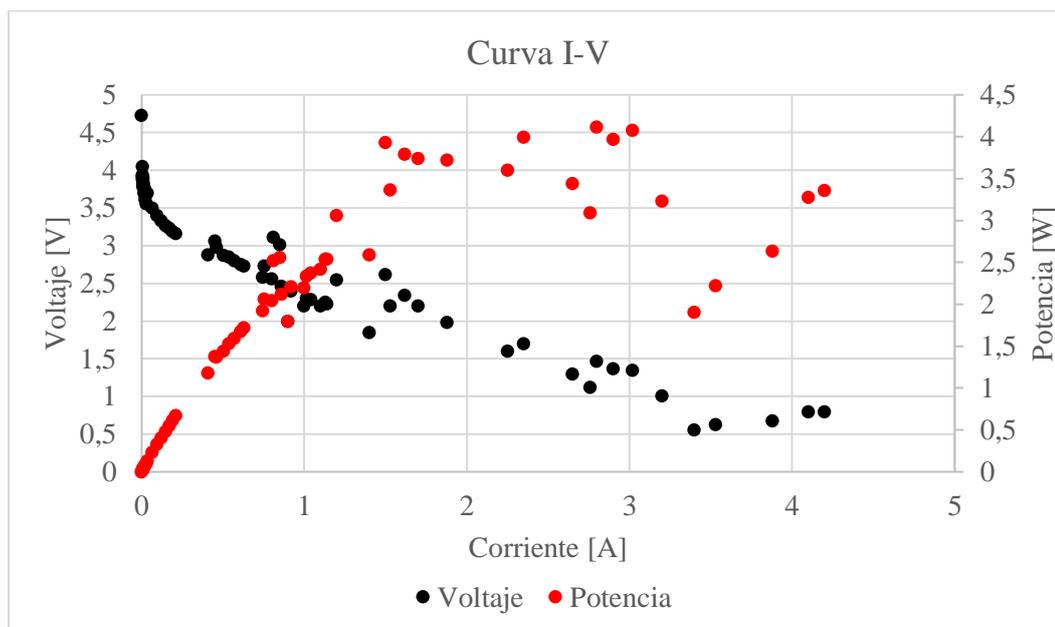


Figura 17 Curva experimental I-V de la PEMFC referencial

Eficiencia de la PEMFC

La eficiencia total del sistema está dada por las eficiencias termodinámicas, de voltaje y de combustible. La expresión [9] es utilizada para determinarla.

$$\varepsilon_{real} = (\varepsilon_{thermo})(\varepsilon_{voltage})(\varepsilon_{fuel}) \quad [9]$$

Eficiencia Termodinámica Reversible

La eficiencia termodinámica reversible (ε_{thermo}) es la relación entre la máxima cantidad de energía útil del proceso y la energía máxima generada en el proceso electroquímico de la PEMFC. Dicha relación se puede observar en la ecuación [10]

$$\varepsilon_{thermo} = \frac{\Delta g}{\Delta H} \quad [10]$$

$$\varepsilon_{thermo, Quito} = \frac{\Delta g_{rxn}}{\Delta H_{rxn}} = \frac{-239.11}{-286.21} = 0.835$$

$$\varepsilon_{thermo, Galapagos} = \frac{\Delta g^{\circ}_{rxn}}{\Delta H^{\circ}_{rxn}} = \frac{-237.16}{-285.83} = 0.829$$

$$|\Delta \varepsilon_{ubicación}| = |\varepsilon_{Quito} - \varepsilon_{Galápagos}| \quad [11]$$

$$|\Delta \varepsilon_{ubicación}| = |83.5\% - 82.9\%| = 0.6\%$$

Al comparar las eficiencias termodinámicas de ambas ubicaciones se obtiene una variación de 0.6%, siendo Quito la ubicación más eficiente en este aspecto.

Eficiencia de Voltaje

La eficiencia del voltaje relaciona con las pérdidas por efectos cinéticos en la celda. Los datos utilizados provienen de la curva experimental $i - V$ mostrada en la Figura 17. Esta relación se muestra en la ecuación [12].

$$\varepsilon_{voltage} = \frac{V}{E} \quad [12]$$

Donde, V es el voltaje real de operación de la celda y E es el voltaje termodinámico reversible ($5 \cdot 1.24V$) correspondiente a las 5 celdas.

Eficiencia del Combustible

Comúnmente, se utiliza la PEMFC con una válvula de salida normalmente cerrada y se realizan purgas cada cierto periodo de tiempo. De este modo se puede calcular la eficiencia del combustible mediante la ecuación [13]. El volumen de hidrógeno consumido está dado por la relación entre el voltaje de la PEMFC y el número de moles en el proceso $\left(\frac{i}{nF}\right)$. En esta ecuación i es la corriente de operación y v_{fuel} es la cantidad de combustible que ingresa a la celda en $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

$$\varepsilon_{fuel} = \frac{i/nF}{v_{fuel}} \quad [13]$$

Adicionalmente, para asegurar el funcionamiento adecuado de la PEMFC, se requiere la implementación de un regulador de presión antes del ingreso del hidrógeno en la celda ya que, como se menciona, estas funcionan con una válvula de salida normalmente cerrada. Sin embargo, debido a restricciones de presupuesto en este estudio no se emplea un regulador de presión, optando en su lugar por un suministro constante de $100 \left[\frac{cm^3}{min}\right]$ a la PEMFC. Dicho valor se transforma a $\left[\frac{mol}{s}\right]$ mediante la ley de los gases ideales.

$$v_{fuel} = 8 * 10^{-5} \left[\frac{mol}{s}\right]$$

Con los valores obtenidos previamente, se puede resolver la ecuación [13].

$$\varepsilon_{fuel} = \frac{i/(2)(96485 C/mol)}{8 * 10^{-5} mol/s}$$

Debido a que, en este estudio, la salida de la celda se encuentra abierta constantemente, la eficiencia del combustible se reduce drásticamente.

Dicho en otras palabras, la celda puede ser operada de dos formas, la primera es manteniendo una estequiometría constante, mientras que, en la segunda se mantiene un flujo másico constante. En caso de que se mantenga una estequiometría (λ) constante, como por ejemplo de 1.2

$$\lambda = \frac{v_{fuel}}{i/nF} \quad [14]$$

la eficiencia del combustible es del 83%, debido a la relación entre la ecuación [14] y [13]. Para la celda estudiada, la eficiencia máxima de combustible, con una salida constante de $100 \left[\frac{ml}{min} \right]$ de H_2 , es 24.71%. El efecto del impacto en el suministro de gas durante la operación se puede observar en la Figura 18. Es por esta razón, que la selección del método de operación de la PEMFC repercute significativamente el desempeño de esta.

Eficiencia Real

Se aplica la ecuación [9] para determinar la eficiencia real de la PEMFC. La Tabla 9 detalla los resultados obtenidos en base a la curva I-V experimental. Se debe considerar que la eficiencia termodinámica es constante.

$$\varepsilon_{thermo} = 83.5\%$$

Tabla 9 Resultados experimentales eficiencia real de la PEMFC

Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	$\varepsilon_{Voltaje}$	ε_{Fuel}	ε_{Real}	ε_{Real} ($\varepsilon_{Fuel} = 83\%$)
4,53	0.000	0	73,00%	0,00%	0,00%	51%
4,26	0,004	0,02	68,76%	0,03%	0,01%	50%
3,80	0,019	0,07	61,29%	0,12%	0,06%	42%
3,69	0,030	0,11	59,48%	0,19%	0,10%	41%
3,53	0,051	0,18	56,97%	0,33%	0,16%	39%
3,52	0,062	0,22	56,74%	0,40%	0,19%	39%
3,22	0,149	0,48	51,92%	0,96%	0,42%	36,0%
3,20	0,175	0,56	51,61%	1,13%	0,49%	35,8%
3,13	0,231	0,72	50,40%	1,50%	0,63%	34,9%
3,04	0,288	0,87	48,98%	1,87%	0,76%	33,9%
2,92	0,289	0,84	47,10%	1,87%	0,74%	32,6%
2,73	0,554	1,51	44,03%	3,59%	1,32%	30,5%
2,72	0,680	1,85	43,87%	4,40%	1,61%	30,4%
2,67	0,781	2,08	43,06%	5,06%	1,82%	29,8%

2,66	0,590	1,59	42,90%	3,87%	1,39%	29,7%
2,63	0,630	1,67	42,42%	4,11%	1,45%	29,4%
2,58	0,950	2,45	41,61%	6,15%	2,14%	28,8%
2,58	0,680	1,77	41,61%	4,43%	1,54%	28,8%
2,49	1,120	2,88	40,16%	7,482%	2,51%	27,83%
2,43	0,840	2,03	39,19%	5,42%	1,77%	27,2%
2,35	1,520	3,57	37,90%	9,846%	3,12%	26,27%
2,35	0,910	2,13	37,90%	5,88%	1,86%	26,3%
2,34	0,530	1,24	37,74%	3,42%	1,08%	26,2%
2,31	1,470	3,38	37,26%	9,490%	2,95%	25,82%
2,30	0,980	2,26	37,10%	6,35%	1,97%	25,7%
2,18	1,180	2,56	35,16%	7,611%	2,24%	24,37%
2,11	2,050	4,32	34,03%	13,25%	3,76%	23,59%
2,06	1,860	3,83	33,23%	12,05%	3,34%	23,03%
2,06	1,330	2,74	33,23%	8,62%	2,39%	23,0%
2,02	2,300	4,65	32,58%	14,90%	4,05%	22,58%
1,96	2,070	4,06	31,61%	13,41%	3,54%	21,91%

Los datos de la Tabla 9 se grafican para una mejor comprensión en Figura 18.

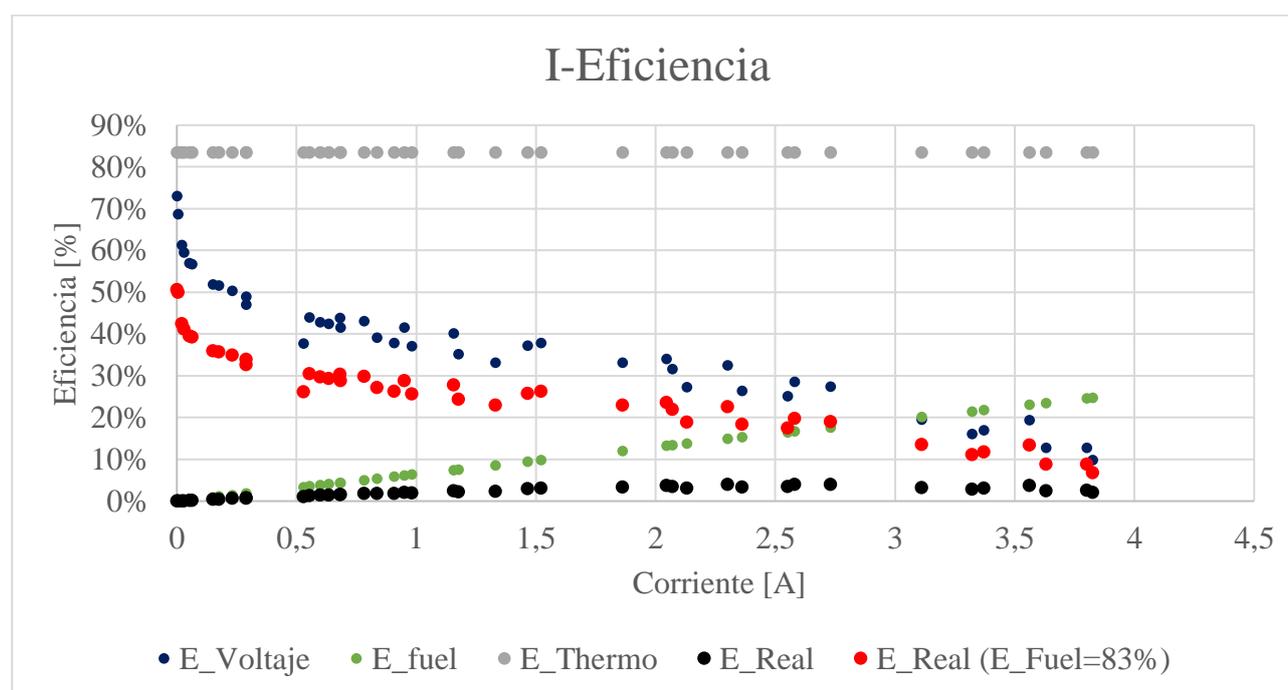


Figura 18 Curva corriente vs eficiencias PEMFC

Diseño y optimización experimental

El desempeño de las PEMFCs depende de ciertas variables, como la temperatura de operación, presión de operación, humedad de los gases, geometría de los canales de hidrógeno y aire, entre otros.

En la etapa de optimización experimental se lleva a cabo ensayos en celdas a las cuales se modificaron las geometrías de los canales de hidrógeno y los canales de aire. Las modificaciones mencionadas junto con los planos de la PEMFC se encuentran en el Anexo 5. Además, se realizan ensayos modificando el material de las estructuras de flujo.

Para cada ensayo se obtiene la curva I-V que permite analizar el efecto que tiene la geometría del canal sobre el rendimiento, así como la potencia entregada por la celda. A continuación, se presentan las geometrías de los canales utilizados.

Paralelo Base (PB)

La configuración “Paralelo Base” (PB), hace referencia, a las estructuras de flujo que fueron adquiridas, estas funcionan como base para posteriores análisis.

Para esta configuración, se realizan dos ensayos y se obtienen dos curvas I-V. Estos ensayos se los realiza con 5 Celdas.

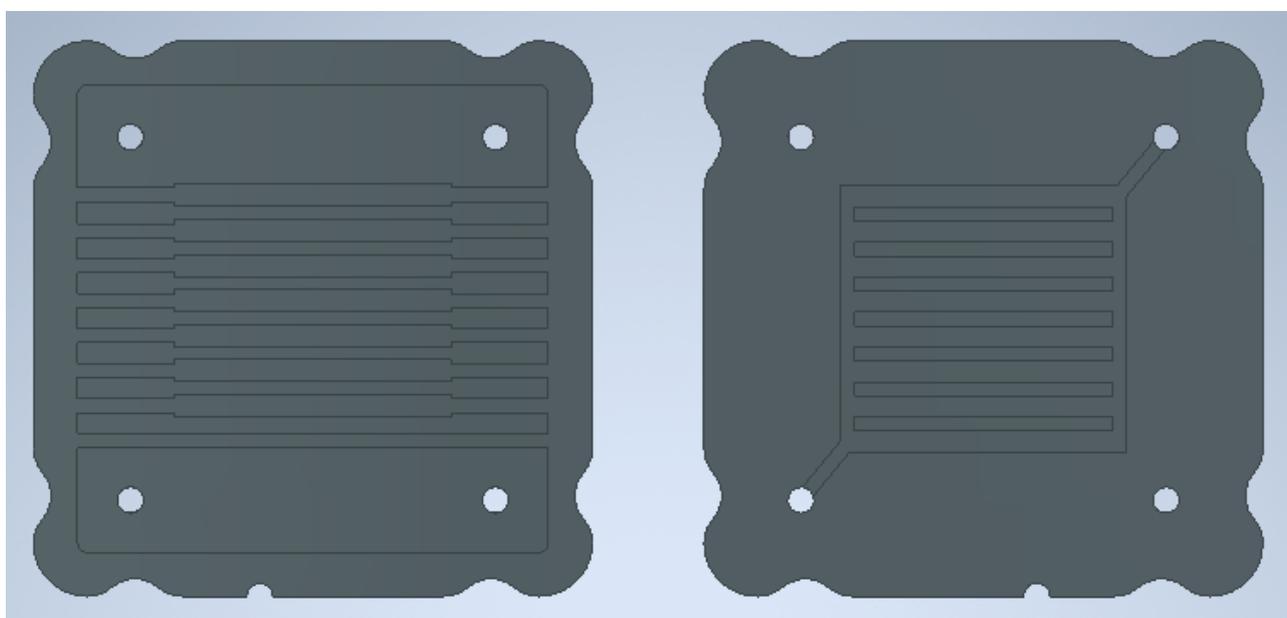


Figura 19 Paralelo Base: Geometría Referencia Tipo Paralelo

Paralelo Modificada (PM)

En esta configuración (PM) se mantiene constante la estructura de flujo del hidrógeno y se modifica la geometría del oxígeno. Al comparar la geometría de los canales del aire se observa que PB tiene, en el sector central, una longitud mayor que PM, lo que reduce el área de contacto del aire con la membrana MEA. Esto, con el objetivo de determinar y demostrar la influencia del área mencionada, en el desempeño general de la celda.

Para esta configuración, se realizan cuatro ensayos, dos pruebas con cinco celdas y dos con una sola celda. Los resultados se comparan con aquellos obtenidos en las pruebas de PB. Adicionalmente, se utiliza esta configuración como base y referencia para posteriores análisis.

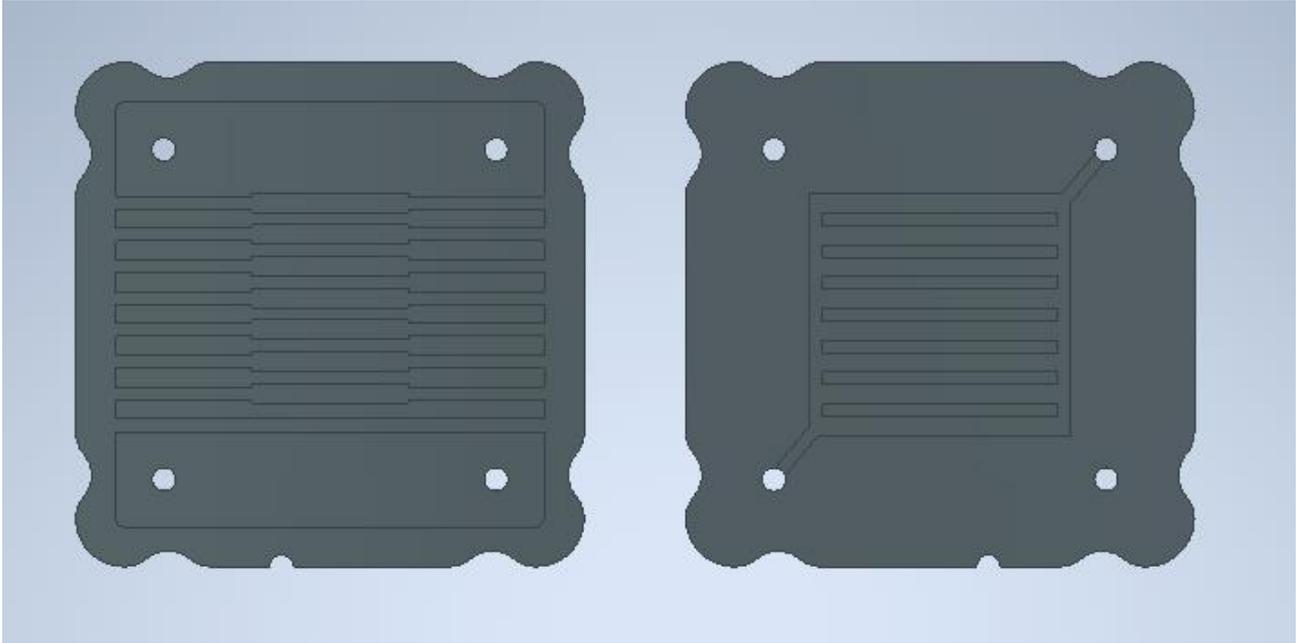


Figura 20 Paralelo Modificado: Geometría Modificada Tipo Paralelo

Mixto (M)

Para la configuración “Mixto” (M) se modifica la geometría de los canales a través de los cuales pasa H_2 . Esta configuración es conocida como mixta debido a que mezcla las características y ventajas de una configuración tipo serpentin y paralelo.

Para comparar el desempeño, se utiliza como referencia el desempeño de PM.

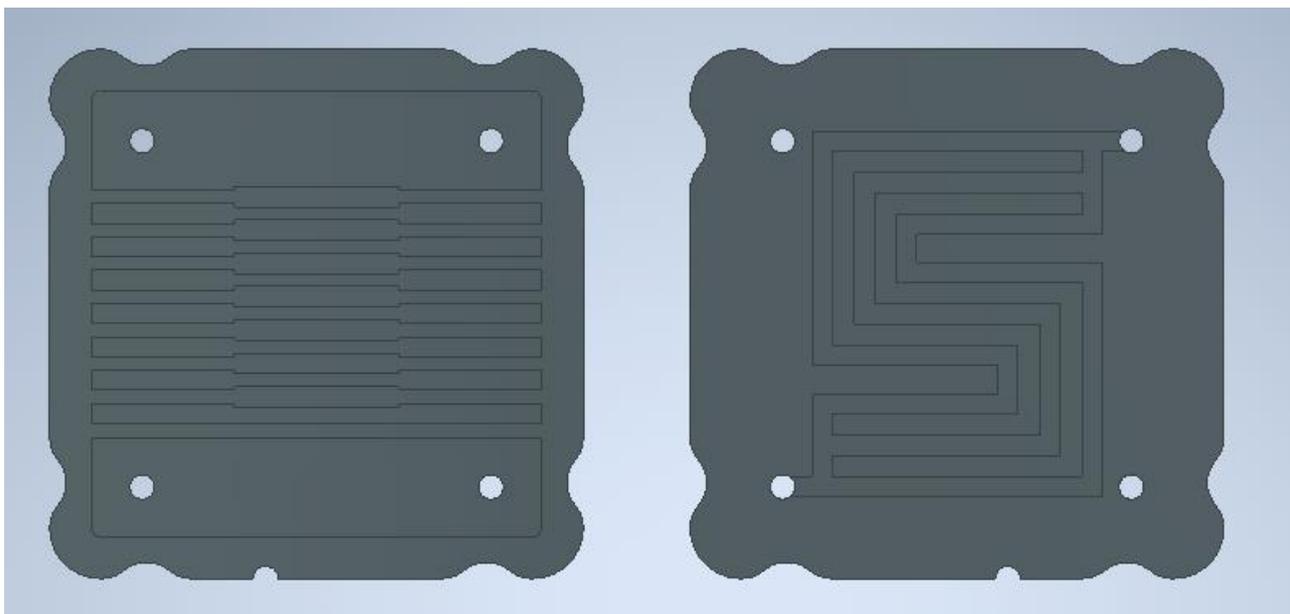


Figura 21 Mixta: Geometría Modificada Tipo Mixta

Modificación Oxígeno (MO)

La “Modificación Oxígeno” (MO), cambia la amplitud de los canales de la estructura de flujo del cátodo, con el objetivo de incrementar el área de contacto del oxígeno con la MEA. Los estudios realizados, para determinar el desempeño de esta configuración, se los aplica a una sola celda.

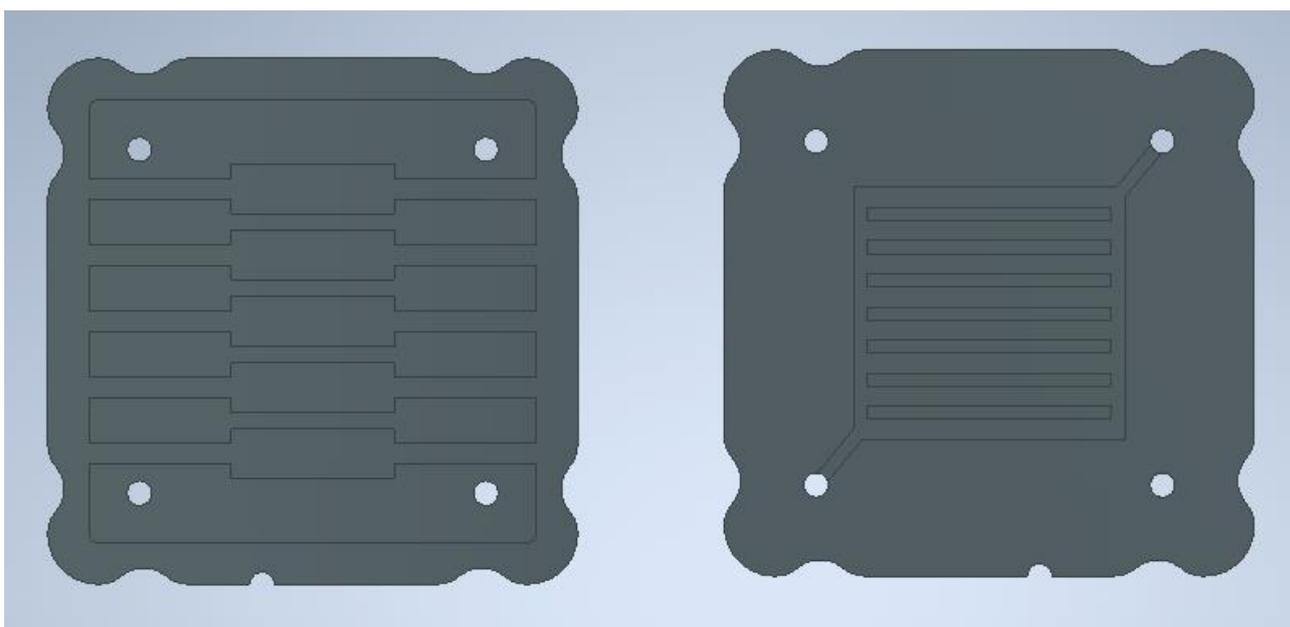


Figura 22 Modificación Oxígeno: Geometría Modificada con un Incremento en el Área del Oxígeno

Modificación Material (MM)

El material tiene un efecto directo en el desempeño de la celda debido a la diferencia en la resistencia eléctrica característica del mismo. En esta última modificación se analiza el cambio de material de grafito a acero inoxidable 304. La MM (1 celda) se compara a la configuración PM (1 celda).

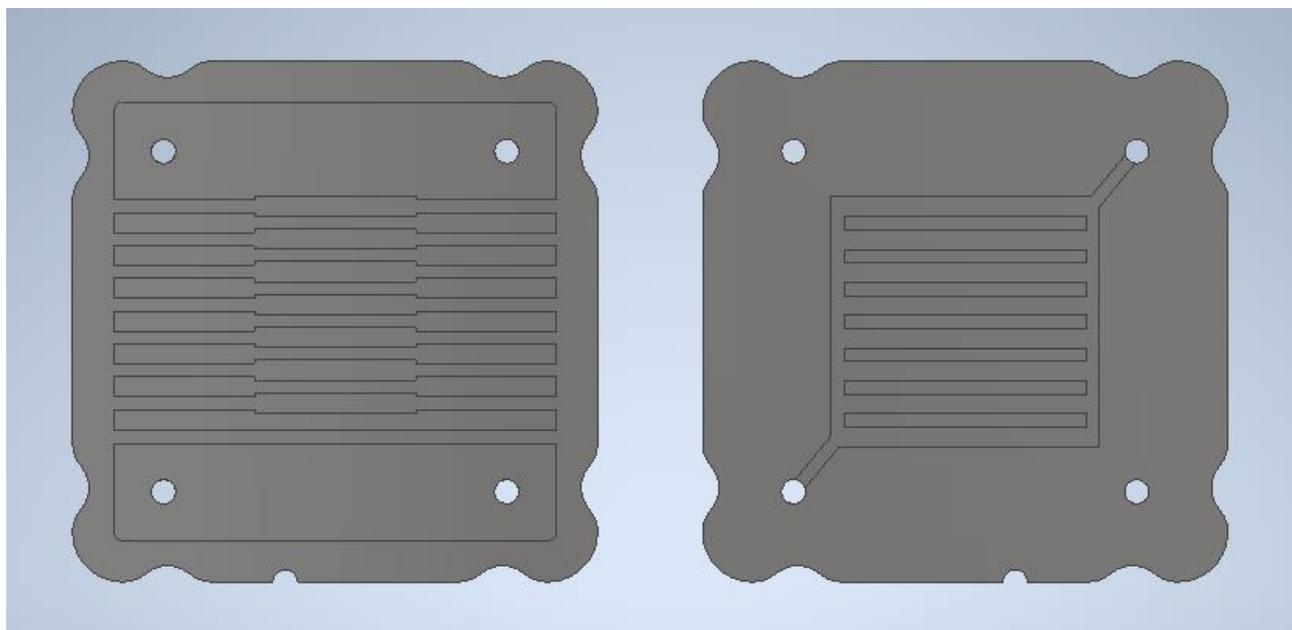


Figura 23 Inoxidable: Material Estructuras Modificado SS304

Curvas I-V

Como se menciona previamente, se realizan ensayos para las configuraciones PB, PM, M, MO, MM. En el caso de las configuraciones PB y PM los ensayos se realizan tanto con una sola celda como con cinco celdas.

5 Celdas

Se realizan, dos ensayos con 5 celdas para las configuraciones PB y PM. Para cada una, los resultados se los presentan en la Figura 24.

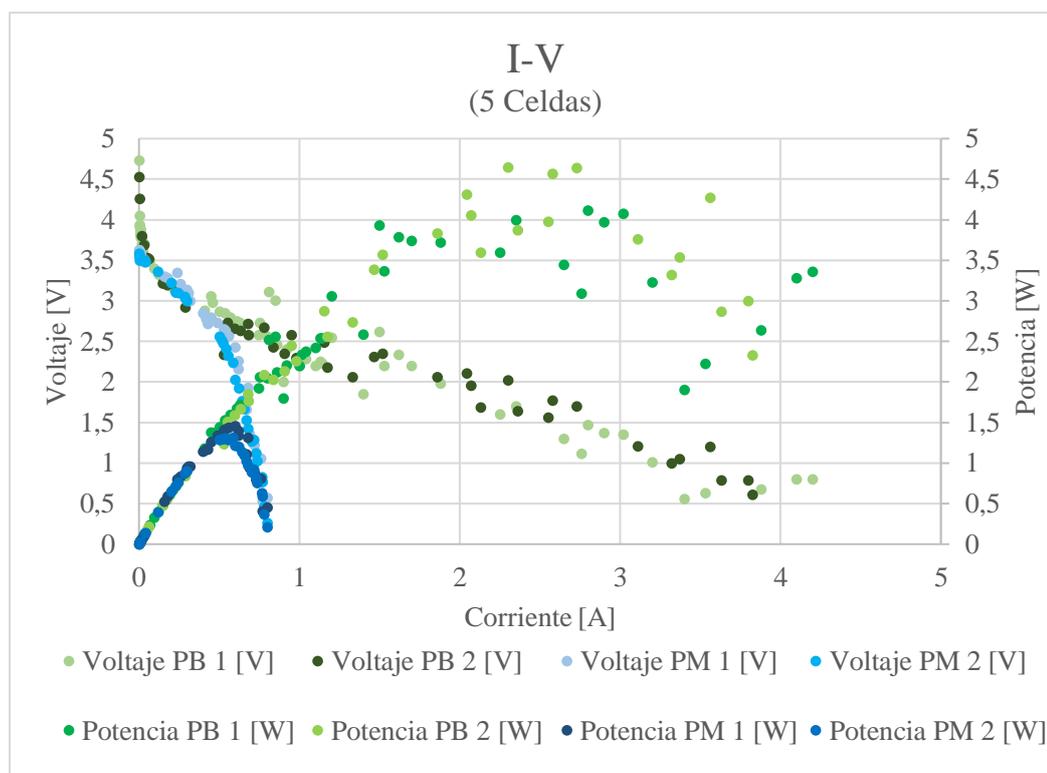


Figura 24 Curva I-V Compilación 5 Celdas

Para este análisis se realizan cuatro mediciones experimentales, dos para cada configuración, con el fin de comprobar la repetibilidad de los datos adquiridos. En la Figura 24 se observa en tonos de color verde los datos correspondientes a la celda adquirida, PB, mientras que, de color azul a los datos de la celda fabricada, PM.

Considerando el desempeño general de la celda, de acuerdo con los datos correspondientes a PB, se logra una potencia máxima de aproximadamente 4.5 [W]. La corriente máxima obtenida para esta celda es de 4.2 [A] y el voltaje máximo es de 4.73 [V]. Por otro lado, el voltaje, potencia y corriente máxima de la configuración PB son de 3.55 [V], 1.5 [W] y 0.8 [A], respectivamente. Se registra un decremento del 66% en la potencia de PM y PB, respecto al voltaje el decremento es del 25% y finalmente, la corriente máxima, se reduce en un 81%.

Las modificaciones realizadas en los canales de aire de PM tienen un efecto directo en el desempeño general, pues, se conoce que el área en contacto, del aire con la MEA, tiene una relación directa con la corriente máxima disponible. En este caso se redujo dicha área, consecuentemente, se redujo la corriente de salida y el desempeño. Es por esta razón que, para un análisis que permita la correcta comprensión, se requiere la normalización de los datos. Esto se logra calculando la densidad de corriente, y graficándola en vez de la corriente de operación.

$$j = \frac{I}{A_{\text{contacto}}}$$

Donde j es la densidad de corriente, y A_{contacto} es el área en la cual la membrana se encuentra en contacto con el aire al igual que con el hidrógeno. A continuación, se presentan dichas áreas para las configuraciones PB y PM.

Tabla 10 Área contacto de las configuraciones

Configuración	A_{contacto} [mm^2]	A_{contacto} [cm^2]
PB	583,98	5,84
PM	518,93	5,19

Para la comparación se realiza una gráfica j - V , donde V representa el Voltaje y j la densidad de corriente.

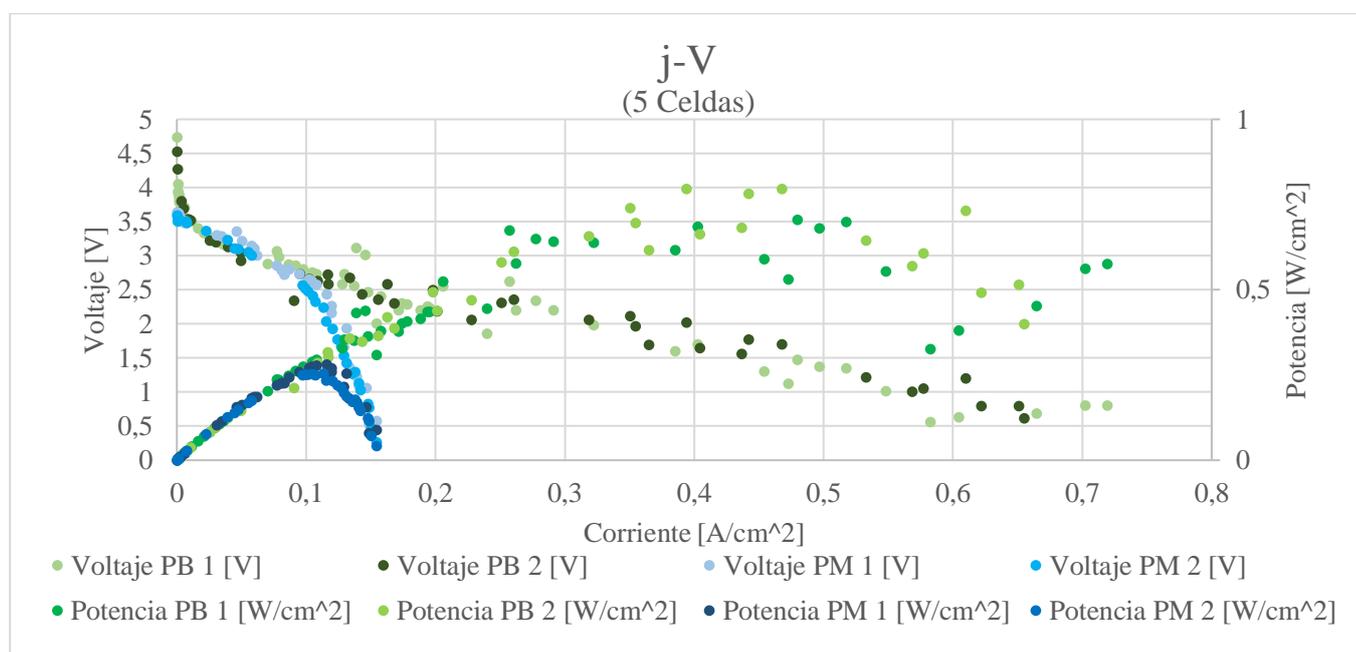


Figura 25 Curva j - V Compilación 5 Celdas

Previamente se comenta que en las curvas I - V existen tres secciones (Figura 14), mismas que son definidas y dominadas por distintos tipos de pérdidas. La sección con menores corrientes, por pérdidas de activación, la sección central por pérdidas eléctrica y finalmente, la sección con mayores corrientes, por pérdidas por transporte de masa.

En la Figura 24 se observa que, en la sección de densidades de corrientes bajas, se mantiene una tendencia y una curva similar, lo que refleja que las pérdidas por activación, mismas que dominan

esta sección, no se vieron afectadas. Esto debido a que, las modificaciones de los canales no están relacionadas con las pérdidas por activación.

El material utilizado, a simple vista, tiene un tono de gris distinto y carece del brillo característico de las estructuras de flujo adquiridas de PB, también, al tacto, el material utilizado para PM mancha y ensucia más que el material de PB. Este análisis cualitativo proporciona pruebas que permiten concluir que el grafito de PM y PB son distintos en calidad o pureza. Esto tiene un efecto directo en las pérdidas por transporte de carga, es decir pérdidas iónicas y eléctricas, sin embargo, no se puede determinar este efecto, ya que, no se observa una diferencia significativa en la PEMFC. Las pérdidas iónicas no se relacionan con el material, sin embargo, este, por el polvo que se desprende, puede ensuciar la membrana dificultando la difusión de gas, consecuentemente, se generan pérdidas por transporte de masa.

En la Figura 14, se observa una Curva I-V referencial y ejemplar. En la sección donde las pérdidas dominantes son debido al transporte de masa, se observa una caída inmediata del voltaje, este fenómeno ocurre cuando la corriente de operación supera la corriente disponible de las moles intervinientes de reactantes en la reacción electroquímica. Dentro de las pérdidas de masa también se encuentran pérdidas por difusión, por esta razón, un componente de la MEA es la membrana de difusión de gas, pues esta, permite un mejor transporte de masa hacia los catalizadores. Para PM se observa una caída abrupta de voltaje cuando la densidad de corriente supera los $0.99 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$. También, debido a la diferencia de calidad o grado del grafito, puede existir difusión a través de las estructuras, lo que se traduce en pérdidas de combustible. Por otro lado, los datos recopilados para PB no sufren de esta caída, demostrando que los $100 \left[\frac{ml}{min} \right]$ utilizados, eran suficientes para la operación de la celda.

1 Celda

En el análisis correspondiente a 5 celdas de las configuraciones PM y PB, se determina que el material entre ambas es distinto. Por lo que, para determinar el impacto en el desempeño de las modificaciones de los canales, se utiliza como referencia a la configuración PM. Se realizan ensayos a una sola celda, para un posterior análisis. Para cada configuración se realizaron dos tomas de datos y se presentan los resultados en un gráfico de dispersión (Figura 26 y Figura 27).

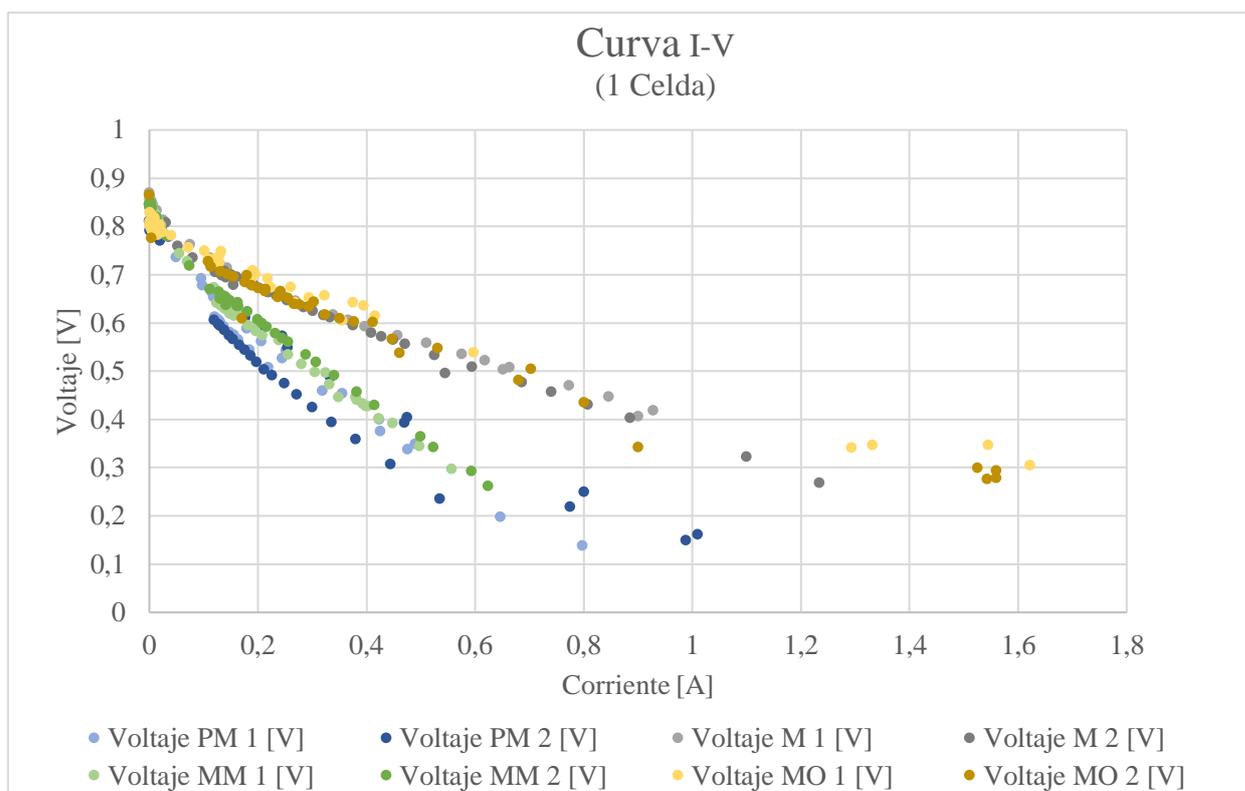


Figura 26 Curva I-V Compilación 1 Celda

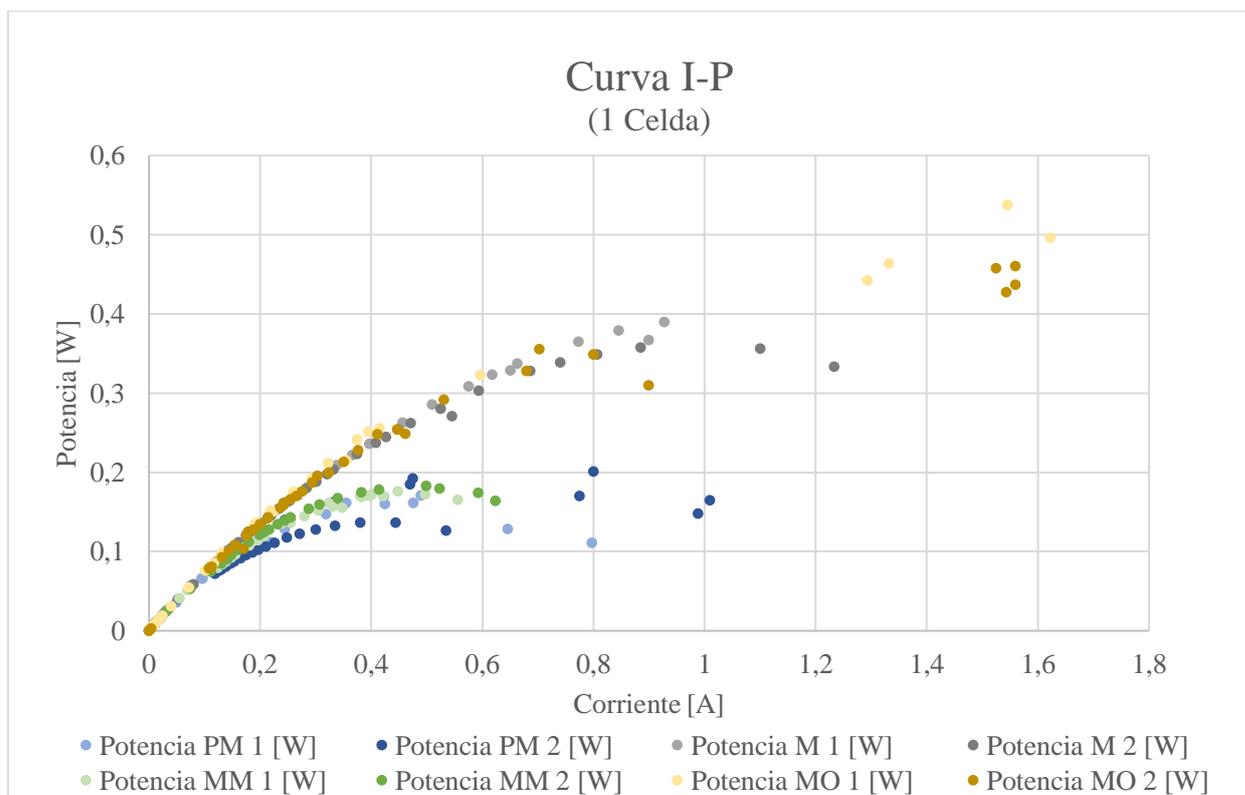


Figura 27 Curva I-P Compilación 1 Celda

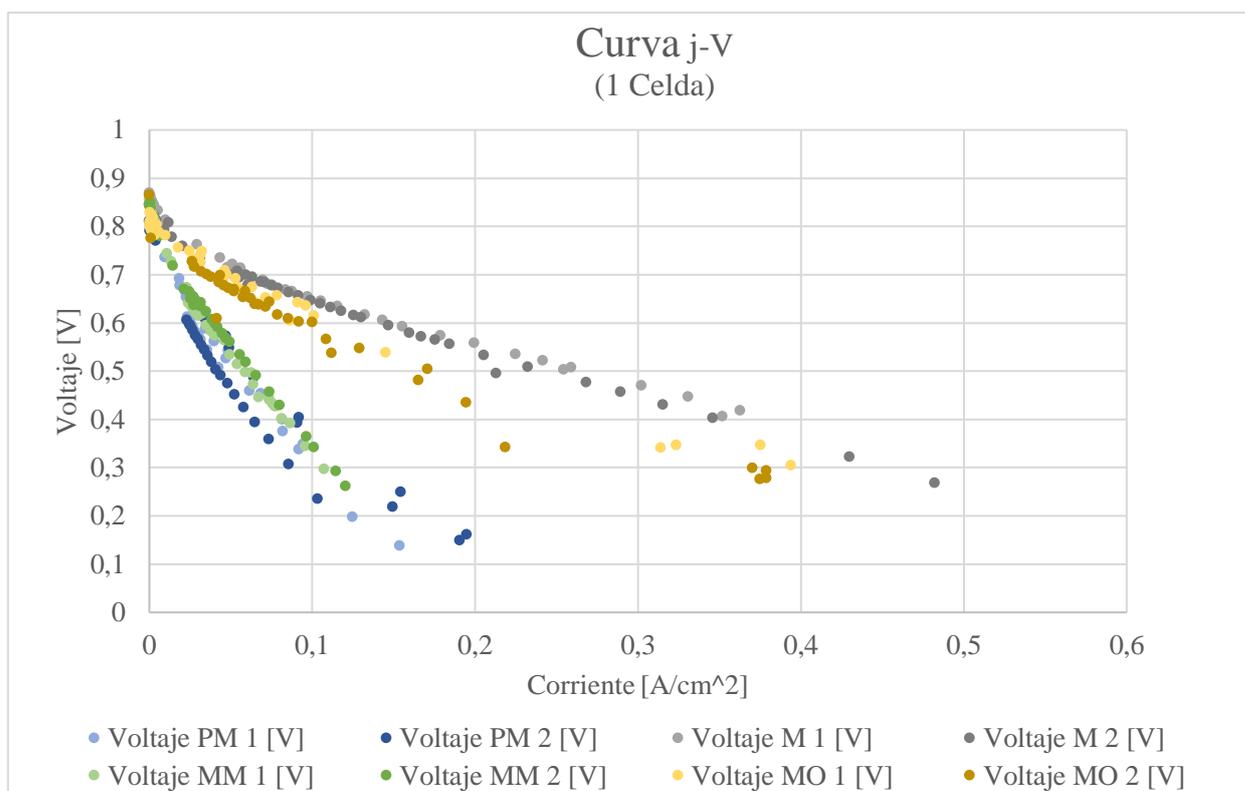


Figura 28 Curva j-V Compilación 1 Celda

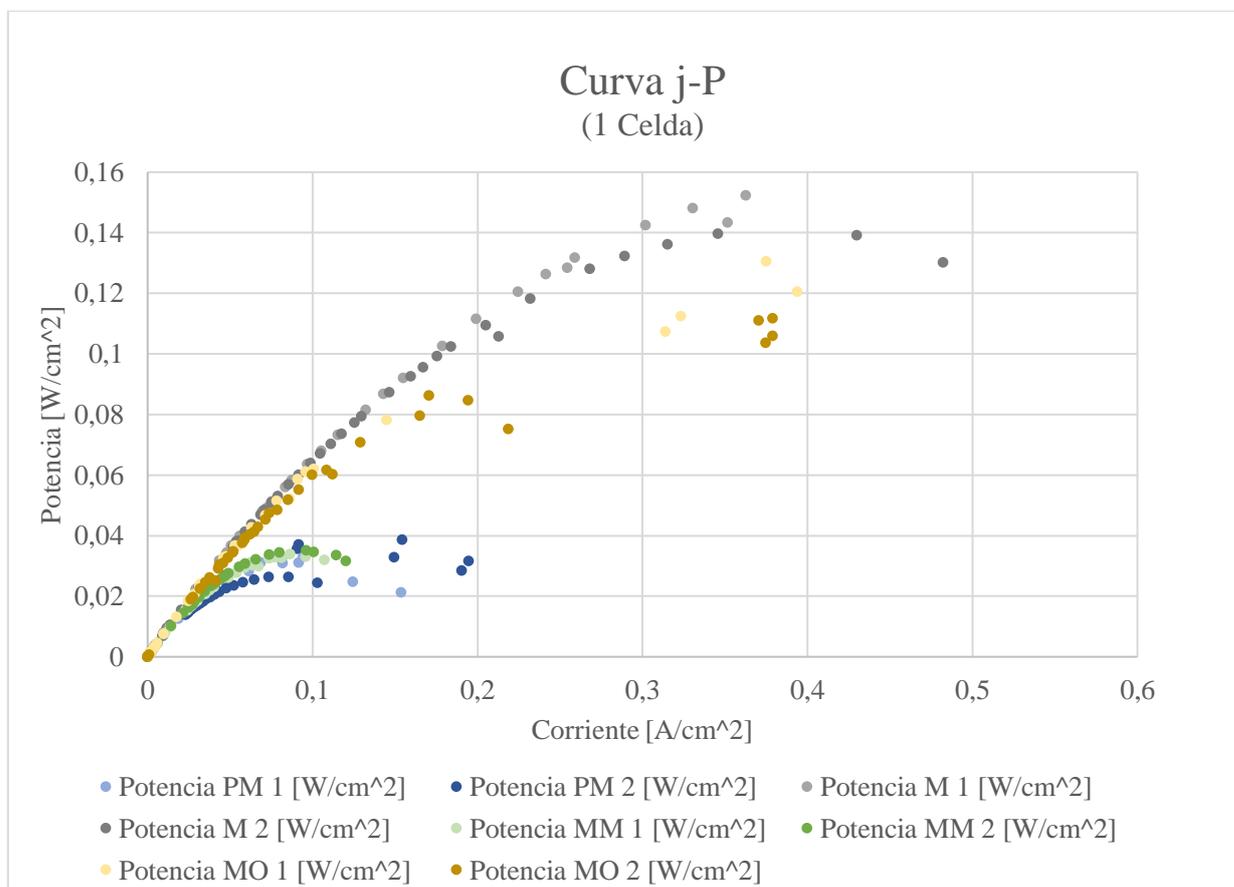


Figura 29 Curva j-P Compilación 1 Celda

Para esta comparación y análisis se normalizan los datos (Figura 28 y Figura 29), con el objetivo de determinar la configuración que permite un mejor desempeño tomando en consideración únicamente las modificaciones a los canales. PM, la referencia, tiene una densidad de potencia máxima de aproximadamente $0.04 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$, la densidad de corriente y voltaje máximo obtenido son $0.19 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$ y $0.846 [V]$, respectivamente. En el proceso de desensamble de la celda, se analiza visualmente, pues se buscan residuos de agua; en el caso de PM se encuentra acumulación de agua en la celda (Figura 30). Si bien la conductividad iónica, es directamente proporcional al contenido de agua (producto) absorbido por el Nafión, se podría concluir que en PM el Nafión absorbe más agua, sin embargo, la acumulación de producto en los canales de PM dificulta el transporte de hidrógeno, consecuentemente las pérdidas por transporte de masa incrementan, reduciendo la potencia máxima y el desempeño general del stack.

Los valores y características de PM son comparadas con aquellas de MO, M y MM.



Figura 30 Residuos de producto H_2O en configuración PM

Como se puede observar en las figuras Figura 28 y Figura 29 la configuración que permitió un mejor desempeño en términos de densidad de corriente y de potencia es la M, sin embargo, la configuración MO tiene el mayor desempeño general. M, de acuerdo con O'Hayre (2016), suma las ventajas de una configuración tipo paralelo y serpentin. Estas son la disminución de las pérdidas de presión entre el ingreso y la salida del canal para configuraciones tipo paralelo, mientras que, un serpentin, mejora el manejo y transporte de reactantes y productos (H_2O). En este caso, el rendimiento mejora y se observa un decremento de pérdidas por transporte de masa, lo que se refleja en la sección final de la curva j-V. Debido a que existe una mejora en la parte central de la curva y tomando en

consideración que la resistencia iónica es la dominante en esta zona, se puede concluir que, la resistencia iónica disminuye en comparación a PM, esto debido a la mejora en el manejo de productos que beneficia la absorción de agua en el Nafión.

La configuración MO permite un desempeño general mayor en comparación a PM, M, MM. Sin embargo, el desempeño normalizado es menor que el de M, pero mayor que el de PM. La configuración analizada incrementa la sección transversal a través de la cual ingresa el aire, de modo que, el flujo volumétrico de aire es mayor para cada canal. Esta configuración, a diferencia de PM, permite un correcto transporte de masa y de los productos de la reacción electroquímica en el lado del cátodo, esto debido a que posterior al uso de la celda no se refleja acumulación de agua líquida en los canales del cátodo ni del ánodo. Por estas razones, se observa una pendiente menor en la zona central de curva j-V de MO en comparación con PM. La máxima densidad de potencia, de corriente y voltaje incrementan y los valores obtenidos son $0.14 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$, $0.39 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$ y $0.87 [V]$, respectivamente.

En algunos estudios se utilizan PEMFCs con estructuras de flujo de acero inoxidable 316L (Yun et al., 2022), sin embargo, en el Ecuador existe reducida disponibilidad de este material a la venta al por menor. Por esta razón en este estudio se utiliza SS304, mismo que de acuerdo con ThyssenKrupp (2018) tiene una resistencia de $7.2 * 10^{-6} [\Omega \cdot m]$. La resistencia del grafito varía entre $4.88 [\Omega \cdot m]$, y $6310 [\Omega \cdot m]$ (AZO Materials, 2002). La variación en la resistencia tiene un efecto en el transporte de cargas, específicamente, en el transporte de electrones. Esta diferencia influye en la zona central de la curva de MM, sin embargo, no se observan modificaciones significativas a lo largo de la curva. Esto debido a que, en la región de pérdidas por transporte de cargas, las pérdidas iónicas dominan por encima de las eléctricas. Las perforaciones que se realizaron para facilitar el maquinado son otro factor que puede afectar el desempeño. Las perforaciones dejaron una marca en los canales (Figura 30), esto puede afectar al flujo de aire ya que se puede incrementar la turbulencia. Este fenómeno requiere de un estudio y análisis a mayor profundidad, por lo que, en análisis futuros, se pueden utilizar herramientas como CFD para la determinación del comportamiento del flujo y posterior análisis en el desempeño de la PEMFC.



Figura 31 Perforaciones en canales configuración MM (material: acero inoxidable 316L)

En la zona inicial de la curva, sección dominada por pérdidas de activación, no se observan modificaciones significativas, pues, se ha demostrado, en este estudio y en la teoría, que estas pérdidas no tienen una relación directa y significativa con la geometría de los canales de las estructuras de flujo.

Sistema Energético: Viaje San Cristóbal-Santa Cruz

La comprensión de una PEMFC permite la implementación de un sistema de generación que use estos aparatos. En este caso se considera un viaje entre la isla San Cristóbal y Santa Cruz para el análisis y diseño de un sistema energético con PEMFCs como fuentes de generación. A continuación, se presentan datos relacionados con el viaje, obtenidos del Parque Nacional de las Galápagos (2023).

$$d_{viaje} = 80 [km]$$

$$t_{viajeida} = 2.5 [h]$$

$$V_{viaje} = 32 \left[\frac{km}{h} \right] \approx 17[kn]$$

El análisis energético realizado se basa en el estudio por Choi (2016), en el cual desarrollan un barco híbrido (PEMFC-Baterías). El sistema del barco desarrollado requiere de 86 [kW] para el funcionamiento a una velocidad de 7.5 [kn].

Choi establece una relación entre la velocidad del barco con la potencia requerida por el mismo.

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt[3]{\frac{P_2}{P_1}} \quad [15]$$

V_1 y P_1 son la velocidad y potencia del barco estudiado por Choi en el 2016, mientras que, V_2 y P_2 son la velocidad y potencia del viaje entre las islas San Cristóbal y Santa Cruz, de modo que:

$$V_1 = 7.5 [kn]$$

$$P_1 = 86 [kW]$$

$$P_2 = \left(\frac{17 [kn]}{7.5 [kn]} \right)^3 * 86 [kW] = 1.00 * 10^3 [kW]$$

Para que el barco en cuestión mantenga 17 nudos durante el viaje de ida y vuelta, requiere de 1001.52 [kW].

Flujo másico de H₂

El flujo másico de H₂ necesario para recorrer la distancia Santa Cruz hacia San Cristóbal ida y vuelta, se calcula en base a los datos de consumo del estudio de Choi.

$$\dot{m}_{choi} = 53.1 \left[\frac{g}{min} \right] \rightarrow P_{choi} = 52.7 kW$$

Choi logra una potencia de 52.7 [kW] para un flujo másico de 53.1 $\left[\frac{g}{min} \right]$. Para incrementar la potencia de un sistema energético a base de PEMFCs, se debe incrementar el número de celdas o número de stacks. En este análisis, se considera un aumento en el número de stacks, consecuentemente, el incremento del consumo de hidrógeno es directamente proporcional a la potencia. Para este cálculo se normaliza el consumo de hidrógeno, de modo que las unidades de este sean $\left[\frac{g}{kW} \right]$. Este cálculo se basa en los datos de Choi y se detalla a continuación.

$$\dot{m}_{kW} = \frac{\dot{m}_{choi}}{P_{choi}} = \frac{53.1 \left[\frac{g}{min} \right]}{52.7 [kW]} = 1.00 \left[\frac{g}{kW * min} \right]$$

$$m_{kW} = \dot{m}_{kW} * t_{viaje} = 1.00 \left[\frac{g}{kW * min} \right] * 5.00 [h] * \frac{60.0 [min]}{1 [h]} = 300 \left[\frac{g}{kW} \right]$$

La potencia del barco para el viaje en las Galápagos es 1000 [kW] por lo que,

$$m_{H_2} = m_{kW} * P = 300 \left[\frac{g}{kW} \right] * 1.00 * 10^3 [kW] = 3.00 * 10^5 [g] = 300 [kg]$$

La masa necesaria para el viaje descrito es de 300 [kg] de hidrógeno.

Potencia necesaria para la producción de H₂

Para la producción de hidrógeno se utiliza el electrolizador “M SERIES CONTAINERIZED PEM Electrolyser (MC500)” (nel, 2023). Las especificaciones se muestran a continuación.

$$Producción = 492 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 1062 \left[\frac{kg}{24h} \right]$$

$$Consumo \text{ promedio de potencia} = 5,1 \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right]$$

Para la producción se considera que la máquina trabaja durante 8 horas al día. La capacidad máxima de producción en ese periodo se muestra a continuación.

$$Capacidad_{max} = Production * Hours \quad [16]$$

$$Capacidad_{max} = 1062 \left[\frac{kg}{24h} \right] * 8.00 \left[\frac{h}{dia} \right] = 354 \left[\frac{kg}{dia} \right]$$

Para determinar la energía necesaria para producir hidrógeno, se parte de la potencia total del equipo.

$$P = Consumo \text{ promedio} * producción \text{ neta} \quad [17]$$

$$P = 5.1 \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right] * 492 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 2.51 * 10^3 [kW]$$

$$E_{dia} = 2.51 * 10^3 [kW] * 8 \left[\frac{h}{día} \right] = 2.01 * 10^4 \left[\frac{kWh}{día} \right]$$

Se obtiene la energía consumida por kilogramo de hidrógeno, en función de la capacidad máxima de producción.

$$E_{kg} = \frac{E_{dia}}{Capacidad_{max}} \quad [18]$$

$$E_{kg} = \frac{2.01 * 10^4 \left[\frac{kWh}{día} \right]}{354 \left[\frac{kg}{día} \right]} = 56.8 \left[\frac{kWh}{kg} \right]$$

Se necesitan 56.8 [kW-h] para producir 1 kilogramo de hidrógeno. El barco en cuestión requiere de 300 kilogramos de hidrógeno, mismos que se producen en un periodo de ocho horas por día. Se calcula la energía y potencia requerida de producción como se detalla a continuación.

$$P_{requerida} = E_{kg} * \frac{Masa \text{ requerida}}{Horas \text{ de trabajo}} \quad [19]$$

$$E_{requerida} = E_{kg} * Masa\ requerida \quad [20]$$

$$P_{requerida} = 56.8 \left[\frac{kWh}{kg} \right] * \frac{300\ kg}{8\ h} = 2.13\ [MW]$$

$$E_{requerida} = 56.8 \left[\frac{kWh}{kg} \right] * 300 \left[\frac{kg}{día} \right] = 17.0\ [MWh]$$

La potencia y la energía para la producción de 300 [kg] de Hidrógeno con un “M SERIES CONTAINERIZED PEM Electrolyser (MC500)” es de 2.13 [MW] y 17.0 [MWh].

Dimensionamiento paneles solares

Para que las celdas de combustible de hidrógeno sean consideradas una fuente de energía limpia, es necesario que la energía invertida en la producción de hidrógeno sea generada a partir de recursos renovables. Es por este motivo que se calcula y se realiza el dimensionamiento del arreglo de paneles solares que permitan la generación necesaria. El sistema considerado es de tipo “On-Grid”, es decir que, el sistema del arreglo de paneles solares se conecta a la red pública de electricidad y no necesita de baterías para almacenar la energía producida. El sistema de generación de hidrógeno está diseñado para trabajar durante 8 horas al día debido a que este es el promedio de horas sol en las islas Galápagos (Global Solar Atlas, 2023), después de este periodo no se produce hidrógeno ya que en este caso se estaría utilizando energía de la red y no se podría considerar a este como hidrógeno verde. Para estos cálculos se parte de la energía requerida de la máquina para producir la masa deseada de hidrógeno.

$$E_{requerida} = 17.0[MWh]$$

El Global Solar Atlas (2023) establece que,

$$Horas\ de\ sol\ promedio\ al\ día = 8\ [h]$$

Existen pérdidas de energía por algunos factores del sistema de paneles (Solar Energy International, 2004), los cuales hay que tomar en cuenta para el cálculo de la potencia necesaria del sistema de paneles solares.

$$Pérdidas\ por\ Temperatura = 0.880$$

$$Pérdidas\ varias = 0.840$$

$$Pérdidas\ por\ inversor = 0.940$$

La potencia del arreglo de paneles solares se calcula como se detalla en la ecuación [21].

$$P_{PV} = E_{requerida} \div \text{horas promedio de sol} \div \text{pérdidas} \quad [21]$$

$$P_{PV} = 17.0[MWh] \div 8.00 [h] \div 0.880 \div 0.840 \div 0.940 = 3.06[MW]$$

A partir de la potencia del arreglo de paneles solares se seleccionan módulos de 430 [Wp] de la marca YHSunPro (2022). Con esta especificación técnica del panel solar, se puede calcular el número de módulos necesarios para generar la energía requerida para la electrólisis del agua.

$$Z_{paneles} = \frac{P_{PV}}{W_p} \quad [22]$$

$$Z_{paneles} = \frac{3060000 [W]}{430 [W]} = 7117 \text{ módulos}$$

Adicionalmente se calcula el número de inversores necesarios para el sistema. Se selecciona un inversor que soporta entre 12.5 [kW] y 16.85 [kW] de la marca SolarEdge (2020). El número de módulos inversores ($Z_{inversores}$) se lo calcula de la siguiente manera

$$\text{Max Watts invertidos} = 430 W * 7117 = 3060310 [W]$$

$$Z_{\frac{\text{módulos}}{\text{inversor}}} = \frac{P_{inversores}}{P_{paneles}} = \frac{12500 [W]}{430 [W]} = 29 \left[\frac{\text{módulos}}{\text{inversor}} \right]$$

$$Z_{inversores} = \frac{7117 \left[\frac{\text{módulos}}{\text{inversor}} \right]}{29 \left[\frac{\text{módulos}}{\text{inversor}} \right]} = 245 [inversores]$$

Adicionalmente, se realiza el presupuesto de la implementación de los paneles solares e inversores necesarios para la planta de generación eléctrica. En la Tabla 11 se detallan los precios unitarios de cada componente y las cantidades calculadas para abastecer la demanda energética para la producción de hidrógeno.

Tabla 11 Análisis económico componentes planta solar

Componente	Cantidad	Precio unitario [USD]	Precio Total [USD]
Paneles fotovoltaicos 430W	7 117	146.1	1 039 793.7
Inversores trifásicos 12.5 kW	245	3 120.37	764 490.65
Total			1 804 284.35

Este análisis económico considera únicamente los componentes detallados en la Tabla 11, no se toma en cuenta los costos de implementación, adaptación del terreno, construcción de la planta, materiales e insumos como cableado del sistema. Para analizar la viabilidad de implementación del proyecto en las islas Galápagos, es necesario realizar el análisis económico tomando en consideración todos los componentes mencionados.

Implementación PEMFC en Prototipo

Con el objetivo de demostrar el funcionamiento de una PEMFC en sistemas reales, se pretende desarrollar un prototipo que funcione en base a la energía generada por esta. Se selecciona un barco a control remoto como prototipo, debido a la relación de este estudio con la implementación de PEMFCs en las Galápagos, sin embargo, para la alimentación energética al barco se analizan varias alternativas.

Una alternativa de alimentación hace referencia a la instalación de una PEMFC sobre el barco, sin embargo, se descarta debido a los riesgos presentes como la probabilidad de daños irreversibles al stack, en caso de que este entre en contacto con el agua. También, la PEMFC en cuestión utiliza un flujo constante de hidrógeno, por lo que, el prototipo requiere de un tanque de almacenamiento de menor tamaño. De acuerdo con las normas y estándares presentados en la sección Estándares y Normas, el almacenamiento debe ser diseñado bajo determinadas especificaciones y requerimientos, como el material, sellado, presión, entre otros, que permitan un uso seguro y adecuado del H_2 , esto incluye el mantener la pureza del gas, la reducción de probabilidades de fuga, y el correcto funcionamiento para los requerimientos de la PEMFC.

La segunda opción, evita el diseño de un tanque, pero en esta se incrementa la longitud de las mangueras conductoras de combustible. Para esta opción se plantea la adaptación e instalación de la PEMFC sobre el barco. Los riesgos presentes son la probabilidad de daños irreversibles al stack, en caso de que este entre en contacto con el agua.

La tercera opción analizada es la carga de baterías con la energía generada por la PEMFC, de modo que, estas sean colocadas en el sistema de alimentación del barco, sin realizar ningún tipo de modificación al mismo. Esta opción, conlleva menos riesgos y permite la demostración del uso y aplicación de la energía generada por la PEMFC.

Tras un análisis de los riesgos y las consecuencias que cada opción conlleva, se selecciona la tercera alternativa. A continuación, se presenta una imagen que demuestra la implementación de esta alternativa.



Figura 32 Prototipo para la implementación de la energía generada por la PEMFC

Las baterías de 1.2 [V] se cargan mediante una conexión tipo paralelo con la celda. Se utiliza un led, mismo que cumple la función de diodo Zener, de modo que, el flujo de corriente sea en un solo sentido y se proteja la PEMFC. Además, este diodo es un indicador de que la batería está en proceso de carga. Finalmente se comprueba la carga de las baterías con ayuda de un voltímetro y se las coloca en el prototipo.

Manual de operación y mantenimiento

Esta sección se enfoca en recomendaciones para la operación y mantenimiento de la PEMFC, basándose en un análisis de los riesgos. Las recomendaciones brindadas se corroboran en los estudios de Gerbec, Jovan y Petrovcic (2008) . Adicional, se presenta una breve explicación del ensamble y lista de partes que conforman la PEMFC, se presentan subconjuntos de partes como la estructura exterior, estructura de flujo, entre otras; que conforman la celda.

Para la operación de la celda de combustible se tiene dos modos de uso: flujo constante y presión constante. Ambas configuraciones necesitan las conexiones del tanque de hidrógeno a la celda y un ventilador que proporcione el flujo de aire. El modo de flujo constante utiliza un flujo de $100 \left[\frac{ml}{min} \right]$, donde se necesita el paso de hidrógeno para conectar a la carga eléctrica y producir electricidad. El modo de presión constante necesita mantener una presión de 2[psi] en la celda, para activar el paso de hidrógeno y conectar la carga eléctrica. Es necesario es este modo de uso realizar purgas para evitar posibles fallas.

En el anexo A4, se especifica con mayor detalle la información de seguridad, que de igual forma hace referencia a parámetros para tomar en cuenta y normas a las que se rige la celda. Un plan de mantenimiento recomendado que expone en periodos de tiempo (diario, semanal, mensual y semestral) varias actividades a realizar entre las que se puede destacar: inspecciones, purgas, limpieza y pruebas a realizar para garantizar la vida útil de la PEMFC.

CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto consta de la caracterización de una PEMFC adquirida, manufactura de una PEMFC, recopilación de datos y optimización experimental, análisis de los requerimientos para la implementación en las islas Galápagos. A partir de los datos adquiridos experimentalmente se realizan gráficas I-V, I-P y j-V para obtener valores característicos como la potencia máxima, densidad de potencia máxima y eficiencias. Para la caracterización de la PEMFC, se analiza la curva I-V, mediante la cual se realizan cálculos de eficiencias. La PEMFC puede ser operada bajo dos condiciones, estequiometría constante o flujo de hidrógeno constante, el método seleccionado tiene un impacto significativo en la eficiencia real del equipo. En el caso analizado se opera a un flujo constante y bajo este método se obtiene una eficiencia real del 5%. Igualmente, se analiza el método de estequiometría constante, asumiendo una eficiencia del combustible del 83%, lo que permite una eficiencia real del 51%. Para el análisis de la PEMFC de 5 celdas, se realizan ensayos a la celda adquirida (PB de 5 celdas) y a la celda propia (PM de 5 celdas), se obtuvieron potencias máximas de 4.646 [W] y 1.458 [W], respectivamente. Esta disminución en las potencias de las PEMFC se debe a la modificación en los canales de flujo de oxígeno en PM, reduciendo su área de contacto y consecuentemente menor difusión del gas a través de la MEA. Otro factor que influye es la diferencia de la calidad de grafito utilizado en cada configuración. Durante el desarrollo de la PEMFC, existieron ciertas complicaciones en el proceso de maquinado de cada material. Estos hitos fueron solucionados a lo largo del trayecto del maquinado de cada una de las partes, obteniendo como resultado la PEMFC fabricada localmente.

En la etapa de optimización se realizaron cinco configuraciones distintas, en las que se modifica la geometría para las estructuras de flujo del oxígeno e hidrógeno y el cambio de material para estos componentes. Entre los resultados, se obtiene que la configuración que permite la mayor potencia es la configuración de la modificación del canal de oxígeno (MO) con 0.537 [W]. Esto se debe al incremento del área de los canales de flujo del oxígeno, consecuentemente, existe mayor contacto con la MEA, por ende, la difusión del oxígeno incrementa y se mejora el rendimiento general de la PEMFC. Sin embargo, la configuración que refleja la mayor densidad de potencia es la configuración mixta (M) con 0.152 [W/cm²]. La configuración mixta incrementa el rendimiento de la PEMFC ya que esta mejora el transporte de masa a lo largo del canal de hidrógeno. Tras la comparación de todas las configuraciones se determina que la que optimiza el desempeño de la PEMFC es M, debido a que esta tiene una mayor densidad de potencia, además, en esta configuración las pérdidas por transporte de masa son menores que en el resto de las configuraciones.

Para la demostración del uso y aplicación de la energía generada por la PEMFC, se utilizan pilas recargables. La PEMFC es capaz de cargar estas baterías hasta llegar al máximo de la pila que es 1.2[V]. Para la implementación de esta tecnología en las Islas Galápagos, se analiza el dimensionamiento de una planta de electrolisis y planta de paneles solares. El análisis se realiza en base al barco del estudio de Choi. El barco considerado cumple un trayecto ida y vuelta desde la isla San Cristóbal hacia la isla Santa Cruz a una velocidad de 17 nudos. Bajo estas condiciones y una relación de potencia – velocidad, se determina que la potencia requerida es 1000 kilowatts, para lo que se requieren 300 kilogramos de hidrógeno. A partir de estos requerimientos se dimensiona una planta de electrólisis de 17.0 [MWh] y una planta solar de 3.06 [MW] y 7117 módulos para generar esta energía. Adicional a los parámetros mencionados, se recomienda realizar un análisis económico, ambiental, social y político para analizar la viabilidad de implementación del proyecto en las islas Galápagos.

Trabajo futuro

Durante el desarrollo de este estudio se detectaron oportunidades de trabajos a futuro como el análisis másico y térmico de una PEMFC. Este tema es un desafío en la actualidad. A pesar de que los flujos másicos son el hidrógeno, aire, y agua, la determinación del porcentaje de agua líquida o vapor requiere un análisis a mayor profundidad, adicional, se requieren instrumentos de medición que permitan esta comprensión. Respecto al análisis térmico, los coeficientes de convección, la temperatura de los gases, los flujos másicos de la membrana (del ánodo al cátodo y viceversa), flujos másicos de los productos y reactantes, resistencias de contacto, entre otros, dificultan dicho análisis. Es por esta razón que, se recomienda el uso de software de elementos finitos y CFD para la simulación y análisis másico y térmico.

La información recopilada de un análisis térmico y másico de la PEMFC sirven como datos para el modelado y simulación del comportamiento eléctrico de una PEMFC mediante el uso de herramientas computacionales.

La generación de energía para un sistema de producción de hidrógeno no posee un análisis exhaustivo. En este se debe considerar el costo de implementación de toda la planta, en el cual se considera el cálculo del área, máquinas y equipos requeridos, sistema de cableado, tuberías, transporte, despacho, logística, operación y mantenimiento. Los temas mencionados, son algunas de las consideraciones que se deben tomar en cuenta para determinar la viabilidad económica, adicional a esto, se debe tomar en cuenta el contexto político y social que influye en la implementación de barcos turísticos que se impulsen mediante hidrógeno en las Islas Galápagos.

La parte técnica de la implementación de barcos turísticos que se impulsen mediante hidrógeno en las Islas Galápagos es necesaria, por lo que se puede desarrollar e implementar un sistema de estos, mediante la adaptación o fabricación de un barco.

Adicional, para el 2030, se pretende reducir el precio de producción del hidrógeno (Eterovic et al., 2022). En consecuencia, se recomienda el planteamiento y estudio del efecto de la implementación de oportunidades que permitan las condiciones políticas, económicas y sociales para la reducción a 1 USD/kg de hidrógeno en el 2030. De esta forma, se lograría un incremento en la competitividad del hidrógeno en comparación con los hidrocarburos.

Para la producción de H_2 en las islas Galápagos, se debe analizar a profundidad la producción de hidrógeno, esto aborda el cálculo del área y construcción de la planta, equipos de electrólisis, bombas, tanques, sistema de tuberías, logística de conexión entre subsistemas, transporte, despacho y operación de la planta. Para esto también se debe tomar en cuenta la desalinización del agua extraída del mar.

REFERENCIAS

- Acosta, V., & Ortiz, G. (2023). *Análisis técnico para la producción de Hidrógeno Verde en Ecuador Presentado por.* ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- ASME. (2019). *B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines.*
- AZO Materials. (2002). *Graphite (C) - Classifications, Properties & Applications.* Graphite (C) - Classifications, Properties & Applications. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1630>
- Baroutaji, A., Arjunan, A., Robinson, J., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2023). Additive manufacturing for Proton Exchange Membrane (PEM) hydrogen technologies: merits, challenges, and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.033>
- Bodkhe, R. G., Shrivastava, R. L., Soni, V. K., & Chadge, R. B. (2023). A review of renewable hydrogen generation and proton exchange membrane fuel cell technology for sustainable energy development. *International Journal of Electrochemical Science, 18(5).* <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100108>
- Choi, C. H., Yu, S., Han, I. S., Kho, B. K., Kang, D. G., Lee, H. Y., Seo, M. S., Kong, J. W., Kim, G., Ahn, J. W., Park, S. K., Jang, D. W., Lee, J. H., & Kim, M. (2016). Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy, 41(5), 3591–3599.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.186>
- Energy Institute. (2023). *Statistical Review of World Energy.*
- Eterovic, J., Alterini, F., Lohigorry, A., & Blanco, G. (2022). Hidrógeno verde: una oportunidad sustentable para el transporte. *ReDDI, 7(1).* <http://reddi.unlam.edu.arPág:1Artículooriginal>
- Ferreira, R. B., Santos, D. F. M., Pinto, A. M. F. R., & Falcão, D. S. (2023). Development and testing of a PEM fuel cell stack envisioning unmanned aerial vehicles applications. *International Journal of Hydrogen Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.090>
- Gerbec, M., Jovan, V., & Petrovčić, J. (2008). Operational and safety analyses of a commercial PEMFC system. *International Journal of Hydrogen Energy, 33(15), 4147–4160.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.063>
- Global Solar Atlas. (2023). *Parroquia Puerto Baquerizo Moreno.*

- Godula-Jopek, A., & Westenberger, A. (2016). Hydrogen-fueled aeroplanes. In *Compendium of Hydrogen Energy* (pp. 67–85). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-364-5.00004-x>
- Hussain, M. M., Dincer, I., & Li, X. (2007). A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles. *Applied Thermal Engineering*, 27(13), 2294–2299. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.015>
- ISO. (2015). *ISO/TR 15916:2015*.
- Li, H., Niu, R., Li, W., Lu, H., Cairney, J., & Chen, Y. S. (2022). Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 105, 104709. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2022.104709>
- nel. (2023). *M Series Containerized*.
- O’Hayre, R. P., Cha, S.-W., Colella, W. G., & Prinz, F. B. (2016). *Fuel cell fundamentals* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Parque Nacional Galápagos. (2023). *Transporte entre islas pobladas*. Parque Nacional Galápagos. <https://galapagos.gob.ec/transporte-entre-islas-pobladas/>
- Qin, Y., Liu, G., Chang, Y., & Du, Q. (2018). Modeling and design of PEM fuel cell stack based on a flow network method. *Applied Thermal Engineering*, 144, 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.050>
- Riba, C. (2002). *Diseño concurrente* (1st ed.). EDICIONS UPC.
- Sáinz, D. (2014). *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de Automoción*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Pública de Navarra.
- Sergi, J. (2010). *Characterization of two-phase flow in a transparent PEM fuel cell using simultaneous anode and cathode visualization and digital image processing*. <http://scholarworks.rit.edu/theses>
- Solar Energy International. (2004). *Photovoltaics: Design and Installation Manual* (1st ed.).
- SolarEdge. (2020). *Three Phase Inverter SE12.5K - SE27.6K*. <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-temperature-derating-note.pdf>
- Taner, T. (2021). The novel and innovative design with using H₂ fuel of PEM fuel cell: Efficiency of thermodynamic analyze. *Fuel*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121109>
- thyssenkrupp. (2018). *Stainless Steel 1.4301 - 304*.

YHSUNPRO. (2022). *M10 TOPCON MONO*. www.sunpropower.com

Yun, Q., Wu, H., Zhang, Z., Li, D. G., & Liang, P. (2022). Corrosion Behaviors of 316L Stainless Steel with Various Grain Sizes in a Simulated Cathodic Environment of a PEMFC. *International Journal of Electrochemical Science*, *17*(8). <https://doi.org/10.20964/2022.07.04>

A2. Ponderación de alternativas

1.- Evaluación del peso específico de cada criterio

DISCUSIÓN

Precio > facilidad de procura > Eficiencia > Facilidad de manufactura

CRITERIO	Precio	Procura	Eficiencia	Manufactura	Suma+1	Ponderado del Criterio
Precio		1	1	1	4	0.4
Procura	0		1	1	3	0.3
Eficiencia	0	0		1	2	0.2
Manufactura	0	0	0		1	0.1
					10	1

2.- Evaluación del peso específico del criterio 1: BAJO precio

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas tiene menor peso

solución A > solución D > solución C > solución B

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	1	4	0.40
Solución B	0		0	0	1	0.10
Solución C	0	1		0	2	0.20
Solución D	0	1	1		3	0.30
					10	1

3.- Evaluación del peso específico del criterio 2: Facilidad de procura

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de regular

solución A > solución D > solución B > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	1	4	0.40
Solución B	0		1	0	2	0.20
Solución C	0	0		0	1	0.10
Solución D	0	1	1		3	0.30
					10	1.00

4.- Evaluación del peso específico del criterio 3: Eficiencia energética

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de mantener (falla menos)

solución C = solución A = solución B > solución D

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		0.5	0.5	1	3	0.30
Solución B	0.5		0.5	1	3	0.30
Solución C	0.5	0.5		1	3	0.30

Solución D	0	0	0		1	0.10
					10	1.00

5.- Evaluación del peso específico del criterio 4: Facilidad de manufactura

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más barata

solución D > solución A > solución C = solución B

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	0	3	0.30
Solución B	0		0.5	0	1.5	0.15
Solución C	0	0.5		0	1.5	0.15
Solución D	1	1	1		4	0.40
					10	1.00

A3. Matriz de Riesgos

Matriz de Riesgo					
Título	Descripción	Impacto	Probabilidad	Prioridad	Decisión
Costo de MEAs	Costo Alto de la MEAs debido a los materiales que utiliza	5	5	25	Opción 1: Solicitar un incremento en el presupuesto. Opción 2. Reutilizar las MEA que se adquirieron en el kit de Fuel Cell Store.
Carencia de hidrógeno (Tanque Vacío)	Indisponibilidad de H ₂	5	4	20	Adquisición de un tanque de hidrógeno y búsqueda de disponibilidad en otras áreas de la USFQ.
Maquinado de placas de grafito	Maquinado complicado debido a la fragilidad del material	5	4	20	Maquinado del grafito a velocidades adecuadas y con herramientas adecuadas. Extremo cuidado en la selección de herramientas.
Daño o Fallo de las MEAs	Daño o Fallo de las MEAs	5	3	15	Manejo de Parámetros recomendados por el fabricante.
Costo de placas de grafito	Elevado costo de grafito	3	4	12	Adquisición de placas de grafito y/o placas de inoxidable.
Impuntualidad en Importación de Materiales	Dificultad en la importación de componentes y materiales	4	3	12	Adquisición placas de acero inoxidable dentro del país y reutilizar las MEAs del kit adquirido.
Indisponibilidad de Instrumentos de Medición	Indisponibilidad de Instrumentos de Medición	4	3	12	Opción 1: Búsqueda de Instrumentos de medición en áreas donde se emplea hidrógeno. Opción2: Importación de instrumentos.
Fugas de Hidrógeno en el Transporte	Fugas de Hidrógeno en el Transporte	4	2	8	Revisión de conexiones a lo largo de todo el sistema de tuberías previo al proceso de generación.
Golpes (Caída) en la PEMFC	Ruptura de la PEMFC y componentes	4	2	8	Sujeción durante el proceso de generación de energía y transporte de la PEMFC en la caja correspondiente.

Control del flujo y presión del H2	Dificultad en el control del flujo y de la presión	4	2	8	Manejar bajo supervisión las válvulas y el software del sistema de transporte de H.
Hundimiento de prototipo con componentes Electrónicos	Hundimiento de prototipo con componentes Electrónicos	3	2	6	Cálculos adecuados para evitar este riesgo. Diseño de Caja impermeable.
Incompatibilidad en las conexiones de transporte de H2	Conexiones de tuberías y componentes incompatibles	3	2	6	Adquisición de los acoples a las medidas de las tuberías que se encuentran en los laboratorios.

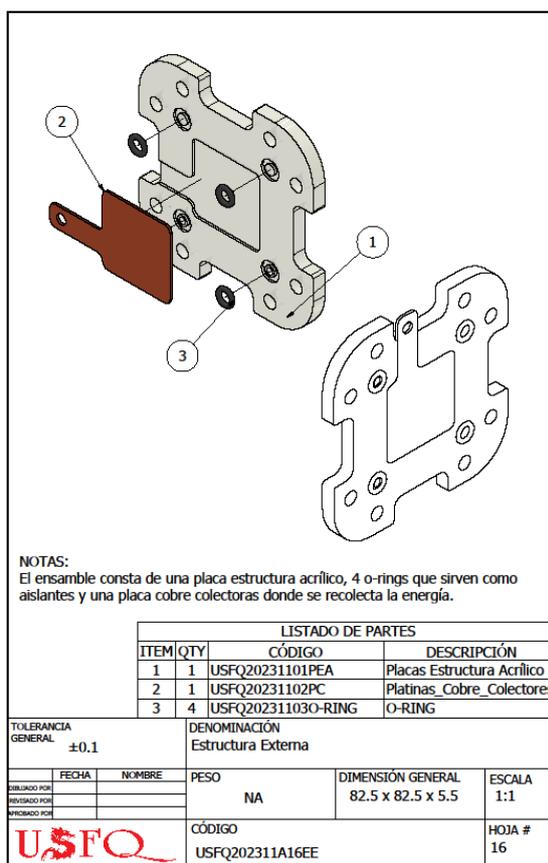
A4. Manual de operación y mantenimiento

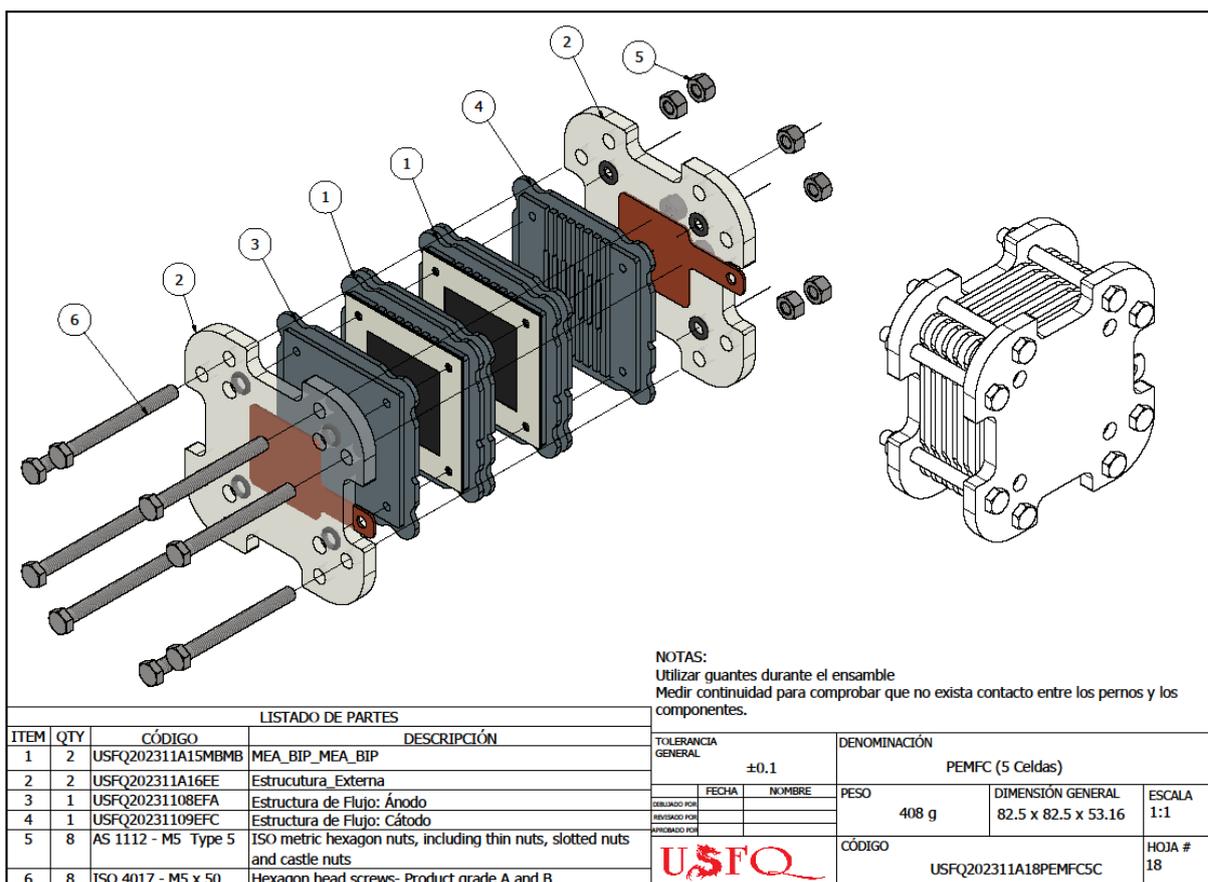
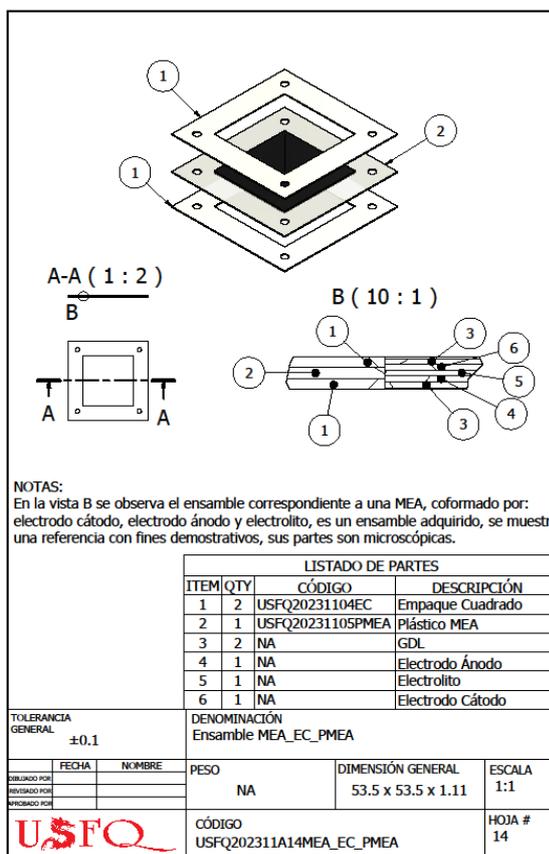
Esta sección se enfoca en recomendaciones para la operación y mantenimiento de la PEMFC, basándose en un análisis de los riesgos. Las recomendaciones brindadas se corroboran en los estudios de Gerbec, Jovan y Petrovic (2008) . Adicional, se presentan planos de ensamble y listados de partes.

Ensamble y lista de partes

En las figuras a continuación, se detalla el proceso de ensamble para la PEMFC. El proceso de armado se resume en:

1. Ensamblar la estructura exterior
2. Ensamblar las estructuras de flujo bipolares con las MEAs y empaques cuadrados.
3. Realizar el ensamble final juntando los subensambles y componentes restantes.





Operación de una Celda de combustible

Operación (Flujo constante)

1. Conectar las mangueras al suministro de hidrógeno.
2. Verificar, visualmente, el estado de las tuberías, tanques y otros componentes.
3. Ubicar un ventilador en la parte superior de la PEMFC.
4. Activar el ventilador.
5. Establecer los parámetros de flujo de hidrógeno:

$$Flujo = 100 \left[\frac{ml}{min} \right]$$

6. Abrir la válvula de salida.
7. Activar el flujo de hidrógeno.
8. Conectar la carga eléctrica.
9. Una vez terminada la generación eléctrica, desconectar la carga eléctrica.
10. Desactivar el flujo de hidrógeno.

Operación (Presión Constante):

1. Conectar las mangueras al suministro de hidrógeno.
2. Verificar, visualmente, el estado de las tuberías, tanques y otros componentes.
3. Ubicar un ventilador en la parte superior de la PEMFC.
4. Activar el ventilador.
5. Establecer los parámetros recomendados por el fabricante:

$$Presión = 2[psi]$$

6. Abrir la válvula de salida.
7. Activar el flujo de hidrógeno.
8. Después de 30 segundos, cerrar la válvula de salida
9. Conectar la carga eléctrica.
10. Realizar purgas (Referirse al Plan de Mantenimiento Diario para la definición de purgas).
11. Una vez terminada la generación eléctrica, desconectar la carga eléctrica.
12. Desactivar el flujo de hidrógeno.

Información de seguridad

- La principal fuente de combustible de las PEMFC es el hidrógeno, este posee propiedades inflamables, por lo que, debe ser almacenado y transportado bajo las normas ASME B31.12 e ISO/TR 15916:2015.

- No existe riesgo de quemaduras, pues la PEMFC opera a temperaturas bajas.
- La carga eléctrica debe soportar al menos 4.5 [W] y 4.7 [V].
- Las PEMFC no producen gases tóxicos.
- Retirar inmediatamente la carga conectada, una vez que se corte el suministro de H_2 .
- No exceder la presión recomendada por el fabricante. En caso de realizar estudios a la PEMFC, asegurarse de no exceder este valor.

Plan de Mantenimiento Recomendado

Gerbec, Jovan y Petrovcic en su análisis presentan las posibles fallas para un sistema de generación a base de PEMFCs (2008). En su estudio se presenta un diagrama de árbol con los efectos de las fallas, los mecanismos y los modos de falla de un sistema a base de PEMFCs. Las recomendaciones de mantenimiento se basan en estos diagramas. Cabe destacar que el mantenimiento recomendado es de tipo basado en condición, por lo que, se recomienda un registro continuo de los fallos, problemas y acciones realizadas.

Diario

- Purgar durante 30 segundos en el inicio de operación. Es decir, abrir la válvula de salida y permitir la salida de hidrógeno por 30 segundos cuando la celda inicie la operación, posterior a esto, cerrar la válvula de salida. Adicional, realizar purgas de 0.5 segundos cada 15 segundos (Ferreira et al., 2023).
- Inspección visual de posibles fugas de H_2 a lo largo del transporte de masa. Se recomienda el uso de sensores de presión para determinar la existencia de fugas.
- Medición de continuidad en los componentes de la PEMFC.
- Registro de condiciones de operación (Temperatura, Presión, Humedad).

Semanal

- Revisión de corrosión galvánica en componentes metálicos y en conexiones.
- Limpieza superficial del ventilador.

Mensual

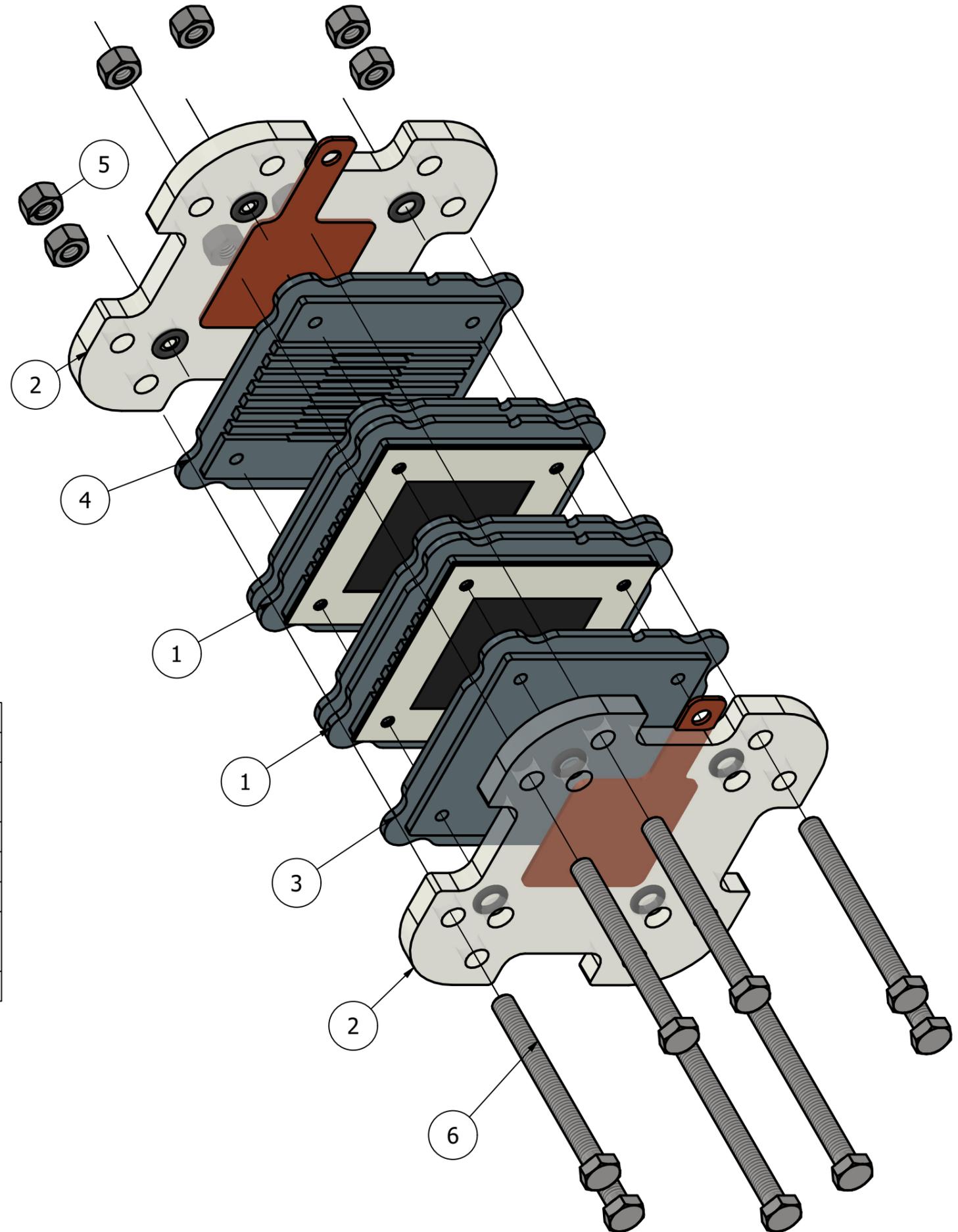
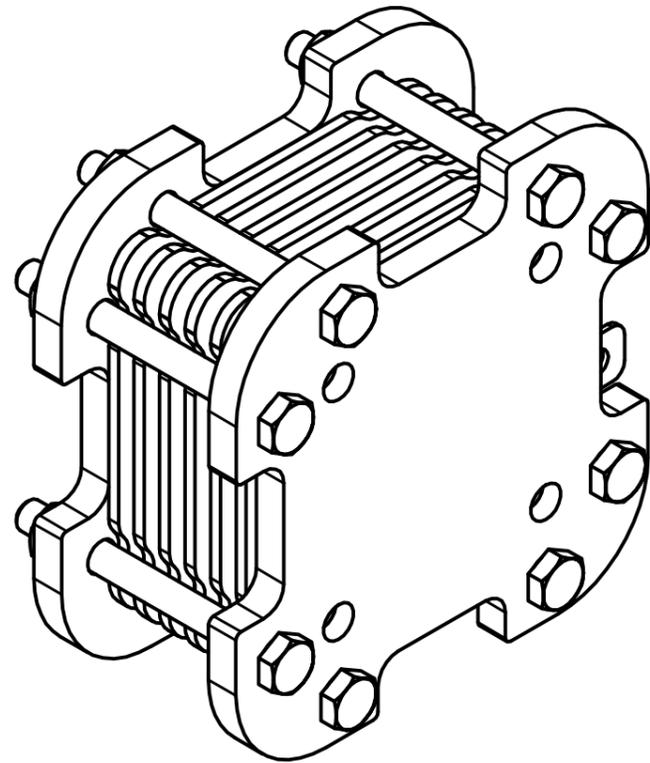
- Revisión y registro del consumo de hidrógeno mensual.
- Desensamble y reensamble de PEMFC, limpieza de canales y componentes.
- Pruebas de desempeño y registro. En caso de caídas en el desempeño, realizar un análisis a la curva I-V.

Semestral

- Inspección visual de válvulas y componentes del sistema, dependiendo de la condición, realizar el cambio del componente.

- Verificación del funcionamiento y sellado de los empaques, de ser el caso, cambiarlos.

A5. Planos de la PEMFC y Modificaciones.



NOTAS:

Utilizar guantes durante el ensamble

Medir continuidad para comprobar que no exista contacto entre los pernos y los componentes.

Utilizar Threaded Inserts M5 x 6 y Racors M5 para la conexión de entrada y salida de hidrógeno

LISTADO DE PARTES

ITEM	QTY	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
1	2	USFQ202311A15MB	MEA_BIP_MEA_BIP MB
2	2	USFQ202311A16EE	Estructura_Externa
3	1	USFQ20231108EFA	Estructura de Flujo: Ánodo
4	1	USFQ20231109EFC	Estructura de Flujo: Cátodo
5	8	AS 1112 - M5 Type 5	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts
6	8	ISO 4017 - M5 x 50	Hexagon head screws- Product grade A and B

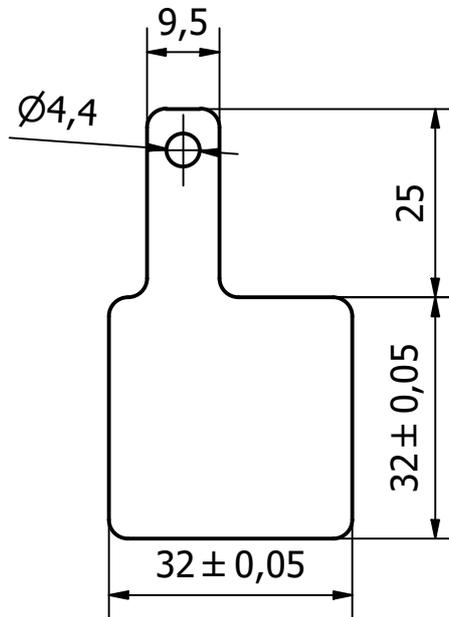
DENOMINACIÓN

PEMFC (5 Celdas)

DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	PESO	DIMENSIÓN GENERAL	ESCALA
18/09/2023	Emilio Tamayo	408 g	82.5 x 82.5 x 53.16	1:1	
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB			
APROBADO POR					

	CÓDIGO	HOJA #
	USFQ202311A01PEMFC5C	1

N^o5



Notas

Espesor: 1 mm

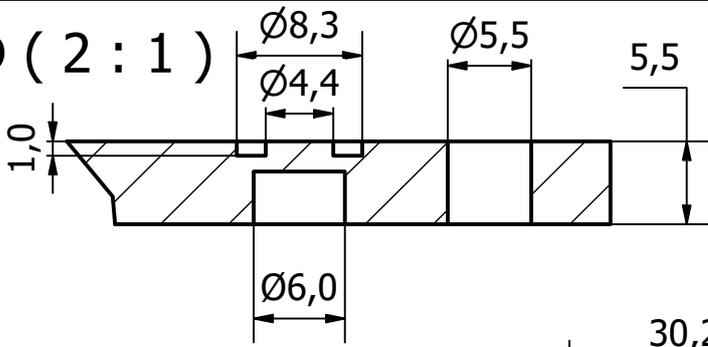
Redondeados 2.5 mm

TOLERANCIA GENERAL			DENOMINACIÓN	
±0.1			Platinas Colectoras	
	FECHA	NOMBRE	MATERIAL	ESCALA
DIBUJADO POR	18/09/2023	Emilio Tamayo	Cobre	1:1
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB		
APROBADO POR				
			CÓDIGO	HOJA #
			USFQ20231102PC	2

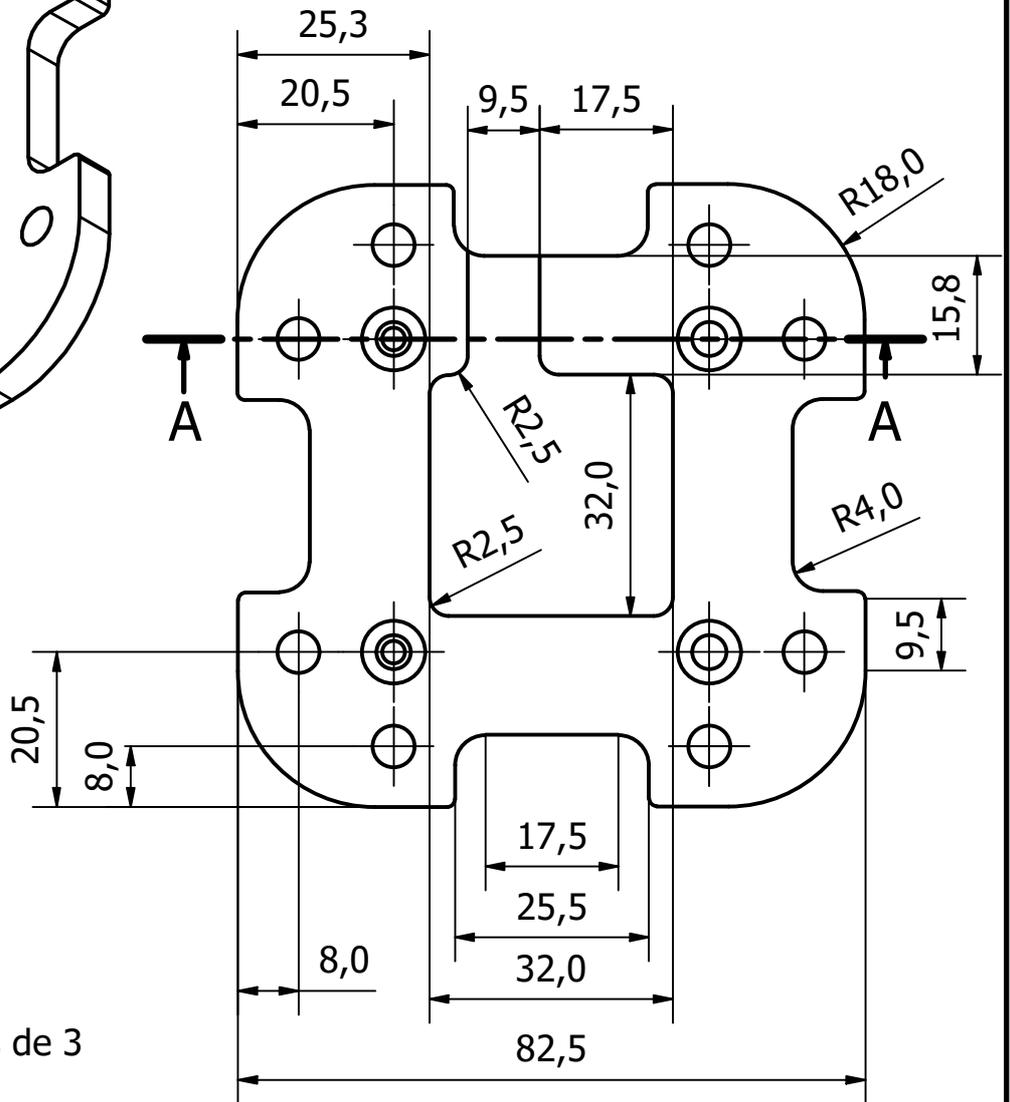
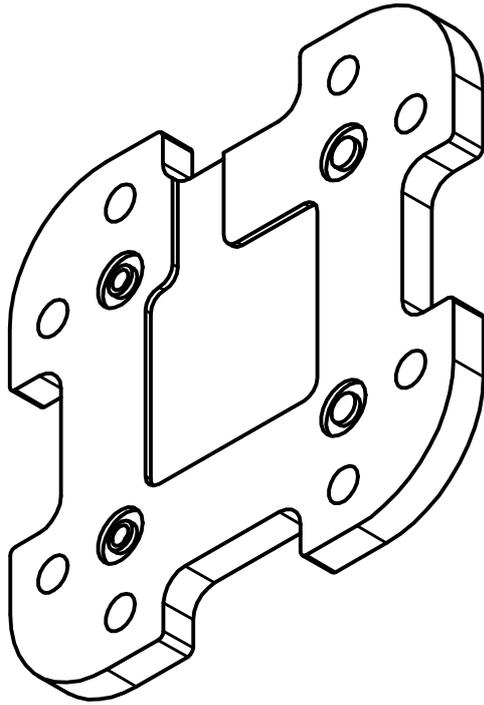
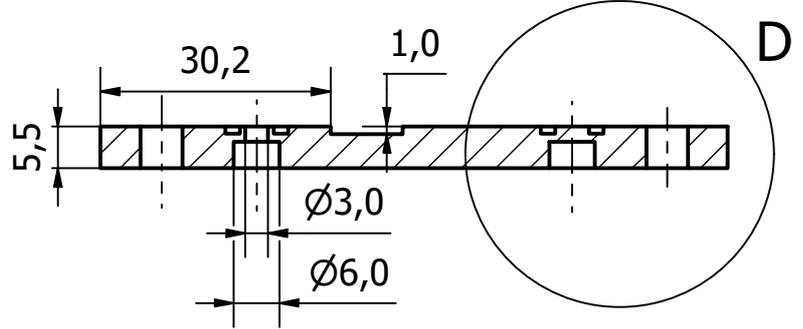
D (2 : 1)

76

N5

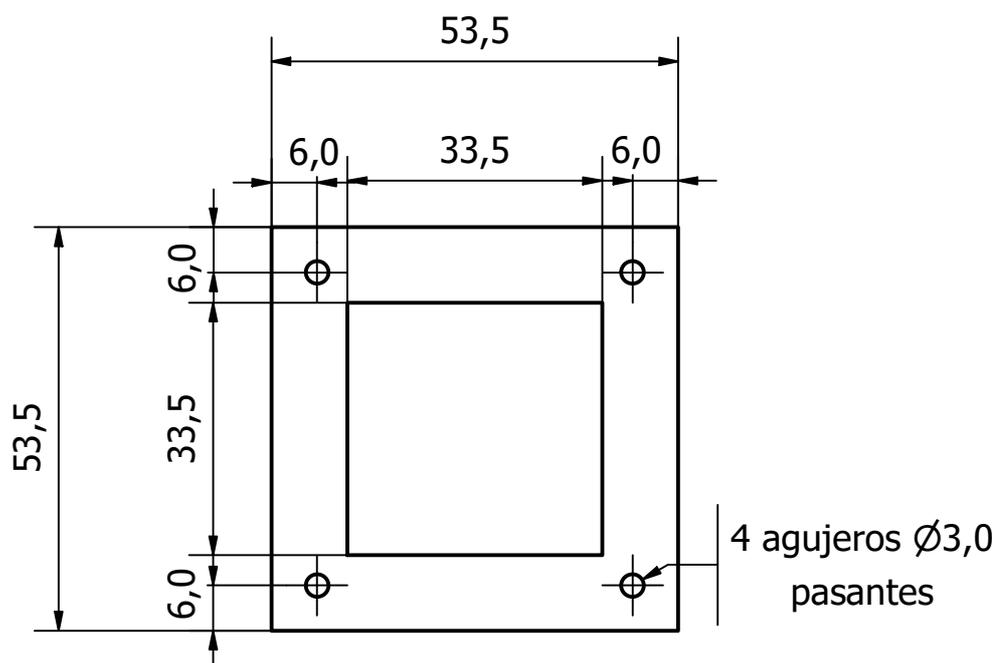


A-A (1 : 1)



Notas:
 Eliminar aristas vivas
 Radio de Acuerdo=1
 Fresado CNC con fresas de 3 mm y 1.5 mm

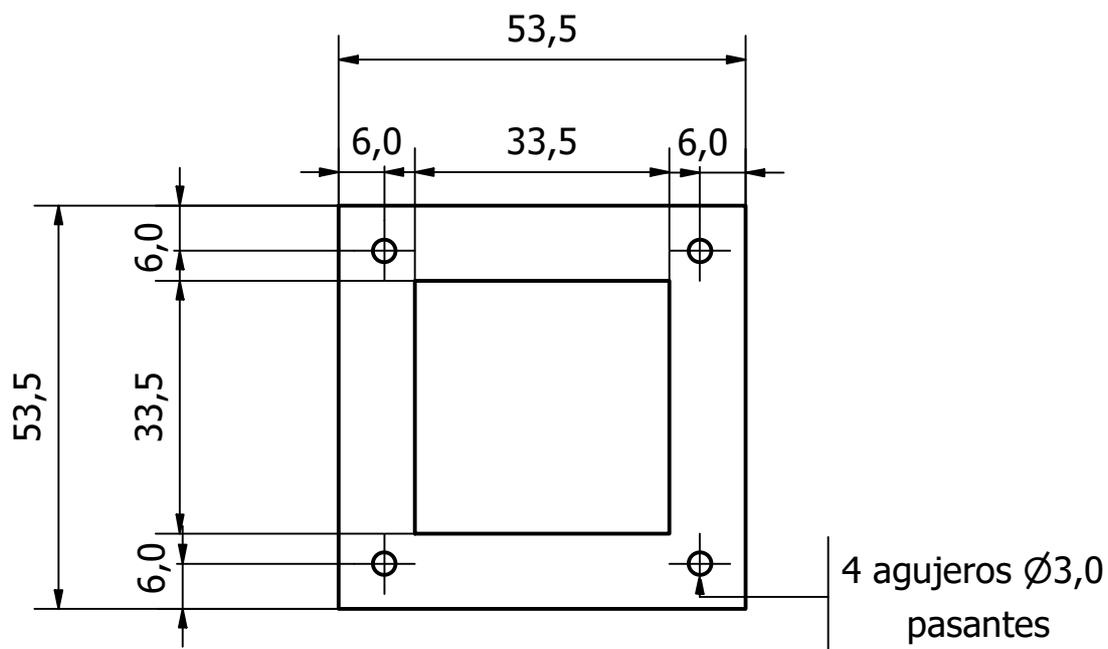
TOLERANCIA GENERAL ± 0.1		DENOMINACIÓN Placa Estructura Acrílico	
DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
REVISADO POR			
APROBADO POR			
USFQ		CÓDIGO USFQ20231103PEA	ESCALA 1:1
			HOJA # 3



Notas

Espesor: 0,37 mm

TOLERANCIA GENERAL		DENOMINACIÓN	
± 0.1		Empaque cuadrado	
	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
DIBUJADO POR	18/09/2023	Mateo Espín	
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB	
APROBADO POR			Teflón
USFQ		CÓDIGO	ESCALA
		USFQ20231104EC	1:1
			HOJA #
			4



Notas

Espesor: 0,37 mm

TOLERANCIA GENERAL		±0.1	DENOMINACIÓN Plástico MEA	
	FECHA	NOMBRE	MATERIAL Plástico	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR	18/09/2023	Mateo Espín		
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB		
APROBADO POR				
			CÓDIGO 20231105PMEA	HOJA # 5

33,5

33,5

Notas
Espesor: 0,2 mm

TOLERANCIA
GENERAL ± 0.1

DENOMINACIÓN
MEA (Adquirido)

	FECHA	NOMBRE
DIBUJADO POR	18/09/2023	Mateo Espín
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB
APROBADO POR		

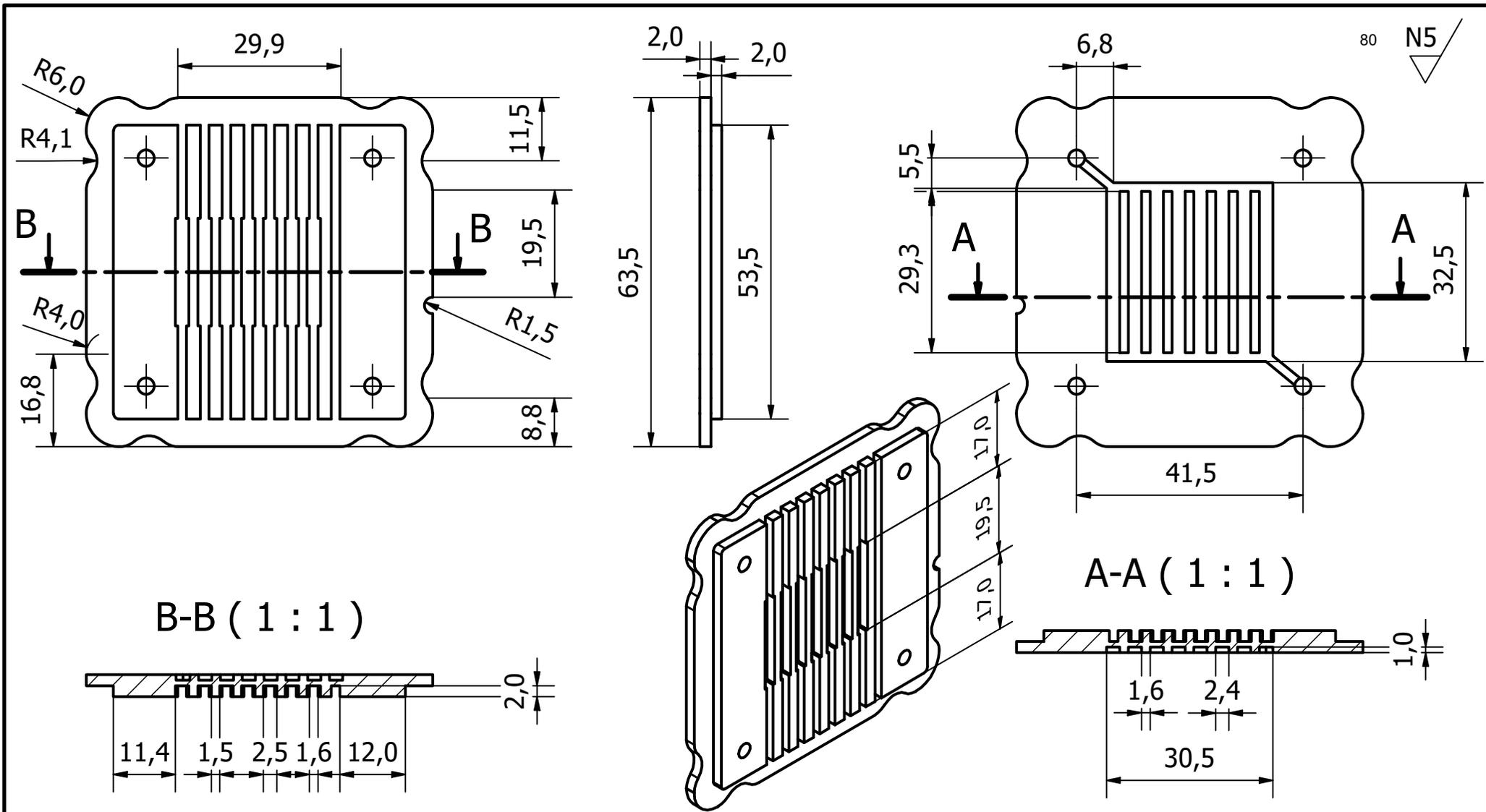
MATERIAL
Nafión, Platino, Carbono

ESCALA
2:1



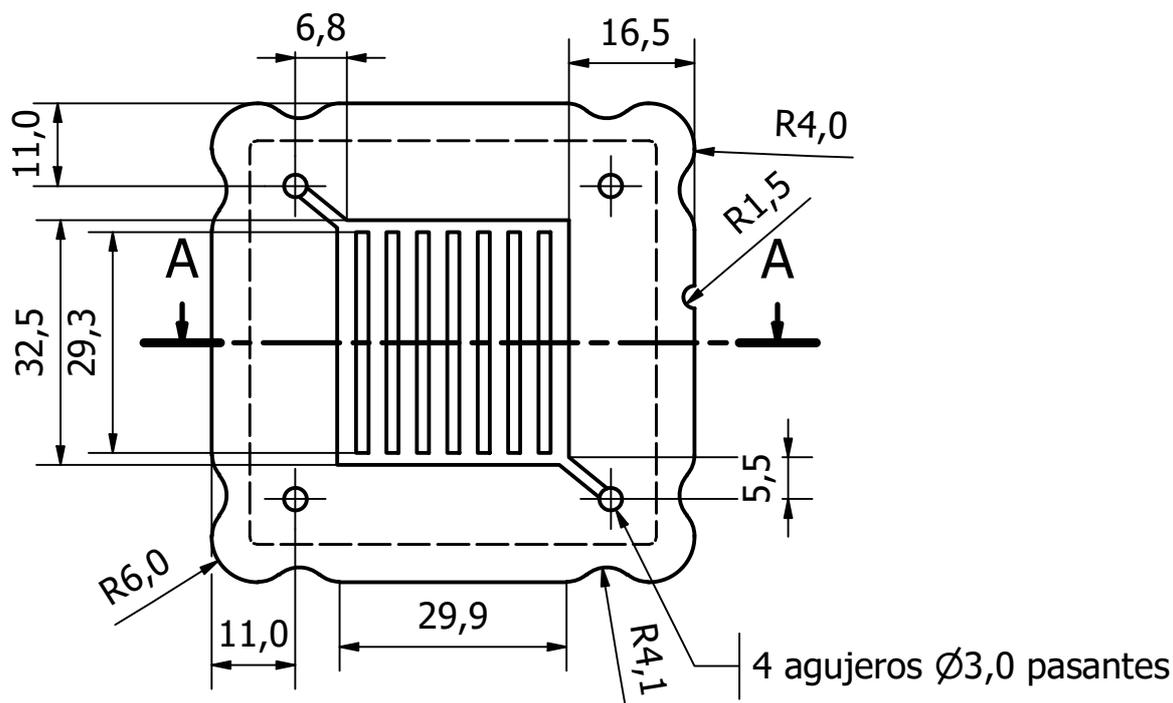
CÓDIGO
USFQ20231106MEA

HOJA #
6

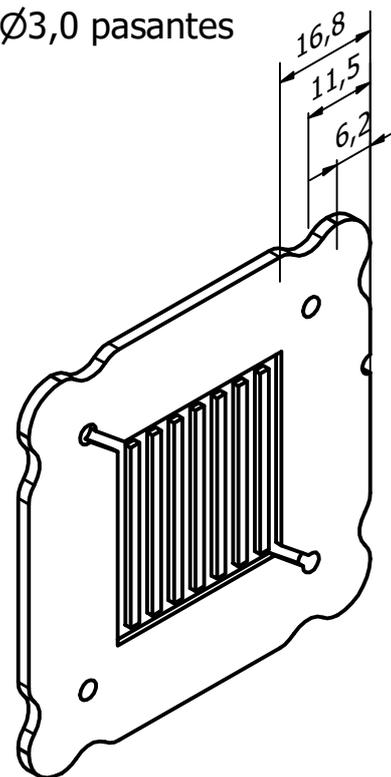
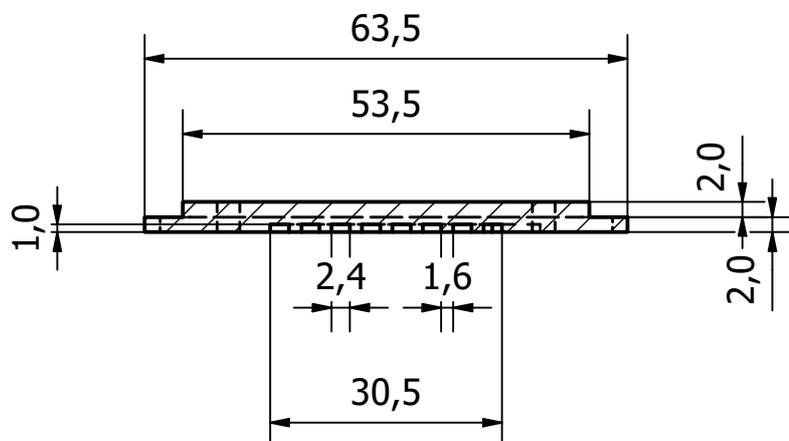


TOLERANCIA GENERAL ± 0.1		DENOMINACIÓN Estructura de Flujo: Bipolar	
DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB	Grafito (200x100x10)
APROBADO POR			
USFQ		CÓDIGO USFQ20231107EFB	ESCALA 1:1
			HOJA # 7

NOTAS:
 Espesor de los canales derecho: 1 mm.
 Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y brocas de 3 mm.



A-A (1 : 1)

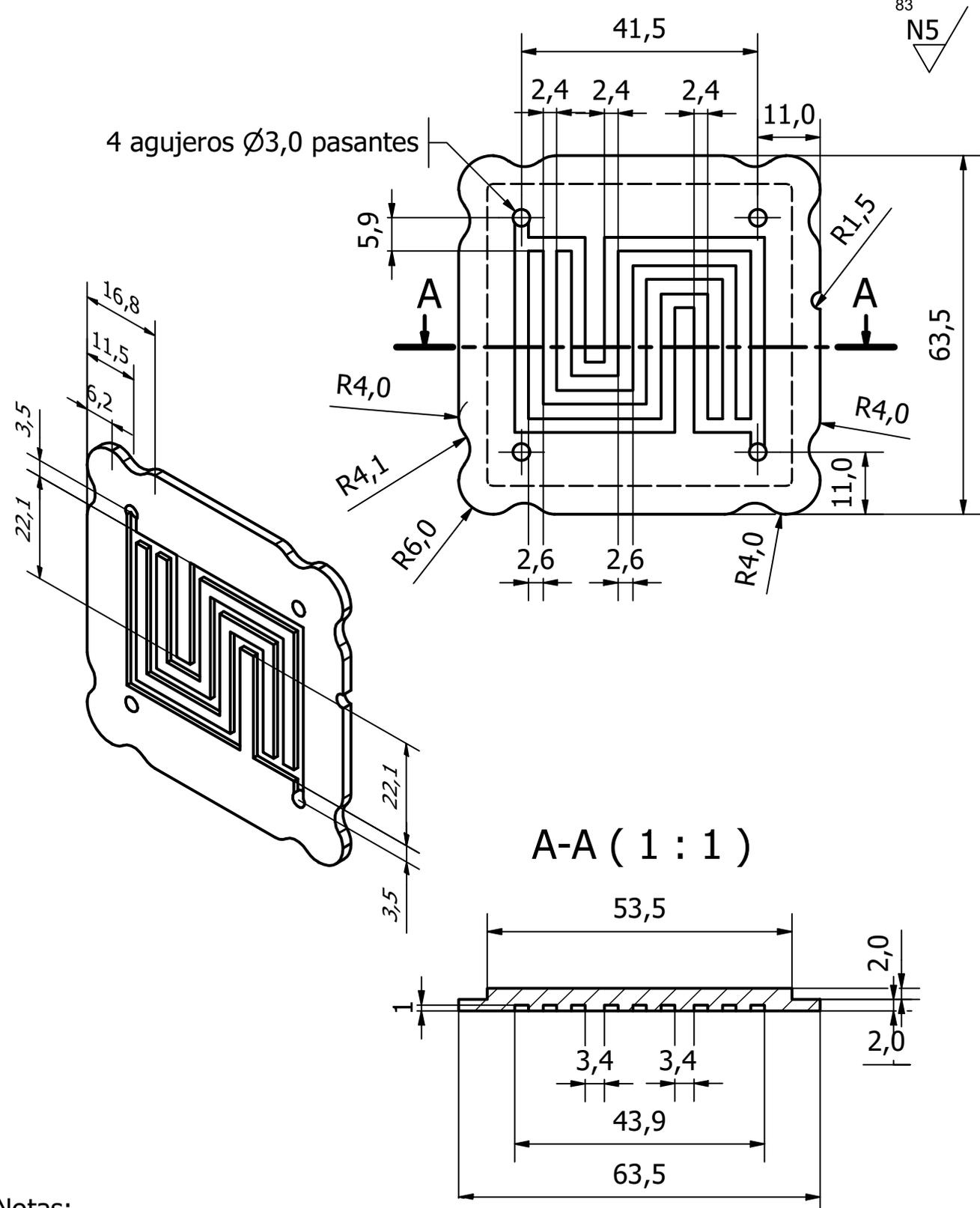


NOTAS:

Espesor de los canales: 1 mm.

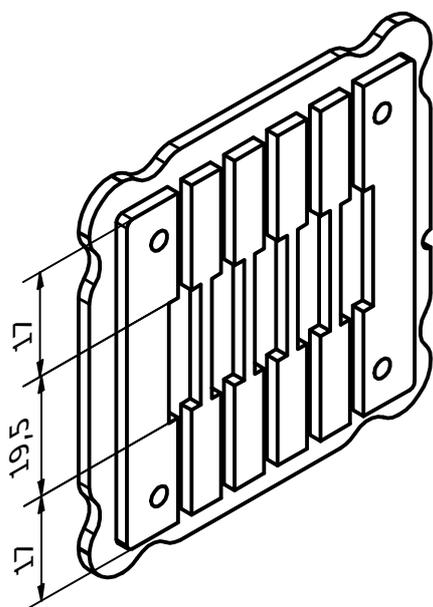
Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y brocas de 3 mm.

TOLERANCIA GENERAL ± 0.1			DENOMINACIÓN Estructura de Flujo: Ánodo	
	FECHA	NOMBRE	MATERIAL	ESCALA
DIBUJADO POR	18/09/2023	Emilio Tamayo	Grafito (200x100x10)	1:1
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB		
APROBADO POR				
			CÓDIGO USFQ20231108EFA	HOJA # 8

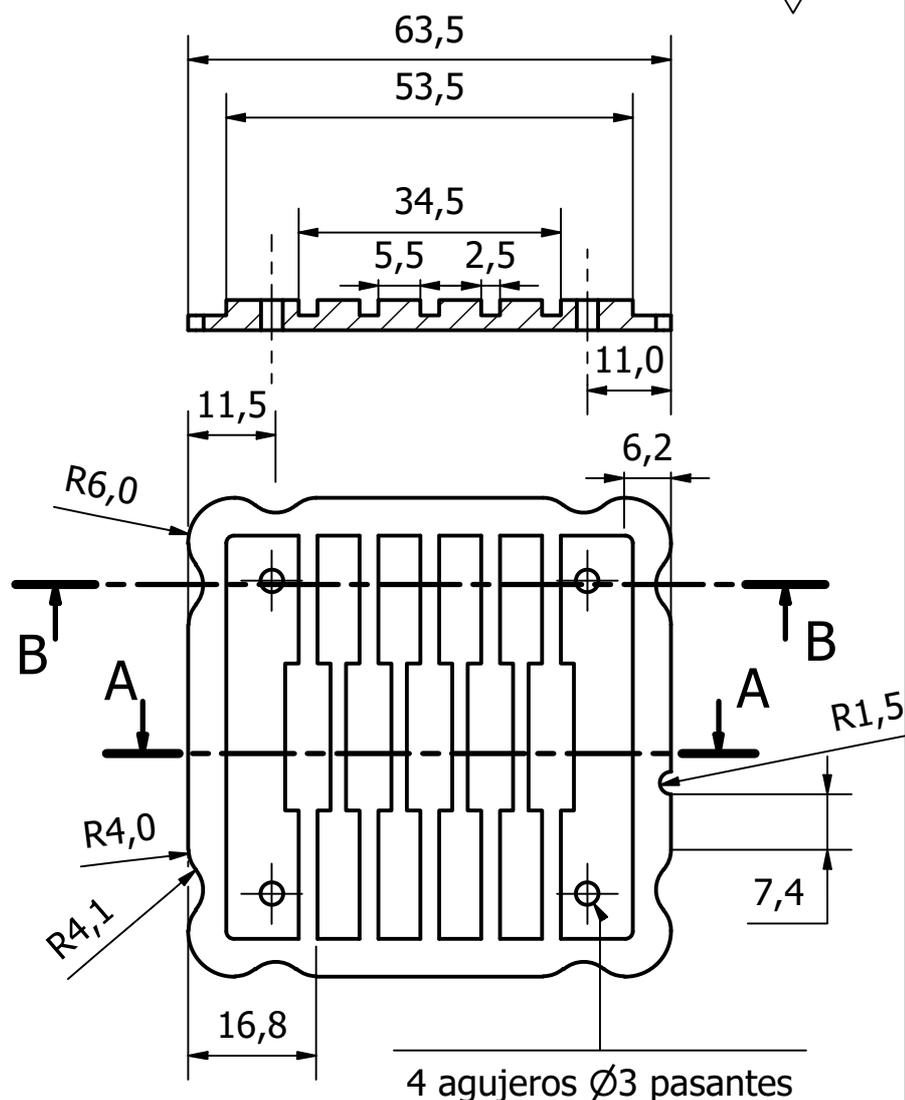


Notas:
Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y 3 mm,
y brocas de 3 mm

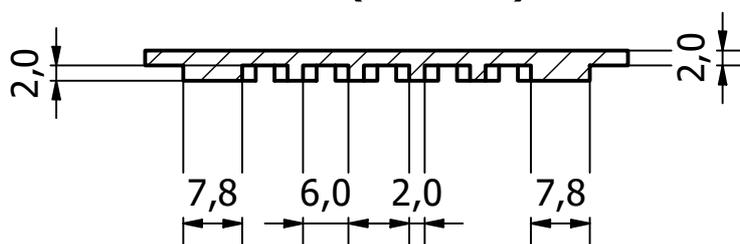
TOLERANCIA GENERAL ±0.1		DENOMINACIÓN Estructura de Flujo: Ánodo Mixto	
DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	MATERIAL Grafito (200x100x10)
REVISADO POR	5/12/2023	Emilio Tamayo	
APROBADO POR		ME, ET, EY, CB	
USFQ		CÓDIGO USFQ20231110EFAM	ESCALA 1:1
			HOJA # 10



B-B (1 : 1)



A-A (1 : 1)



Notas:

Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y 3 mm, y brocas de 3 mm

TOLERANCIA
GENERAL
 ± 0.1

DENOMINACIÓN
Estructura de Flujo: Cátodo Oxígeno

	FECHA	NOMBRE
DIBUJADO POR	18/09/2023	Emilio Tamayo
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB
APROBADO POR		

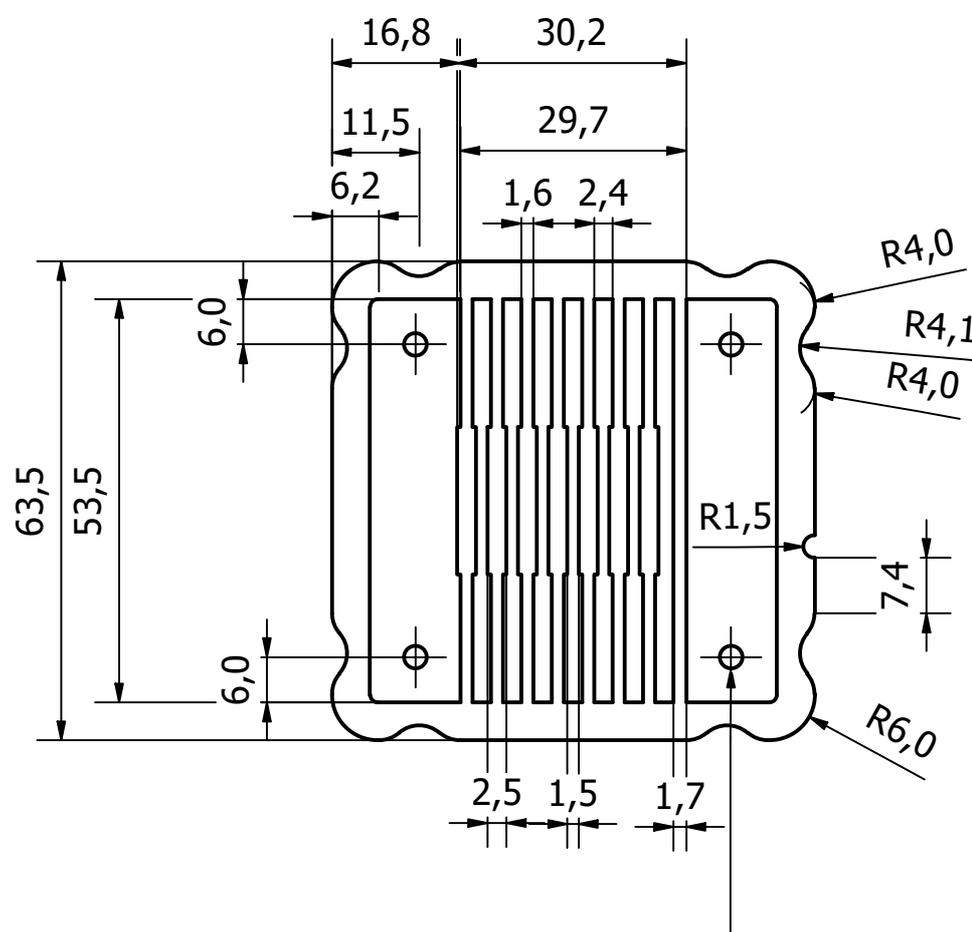
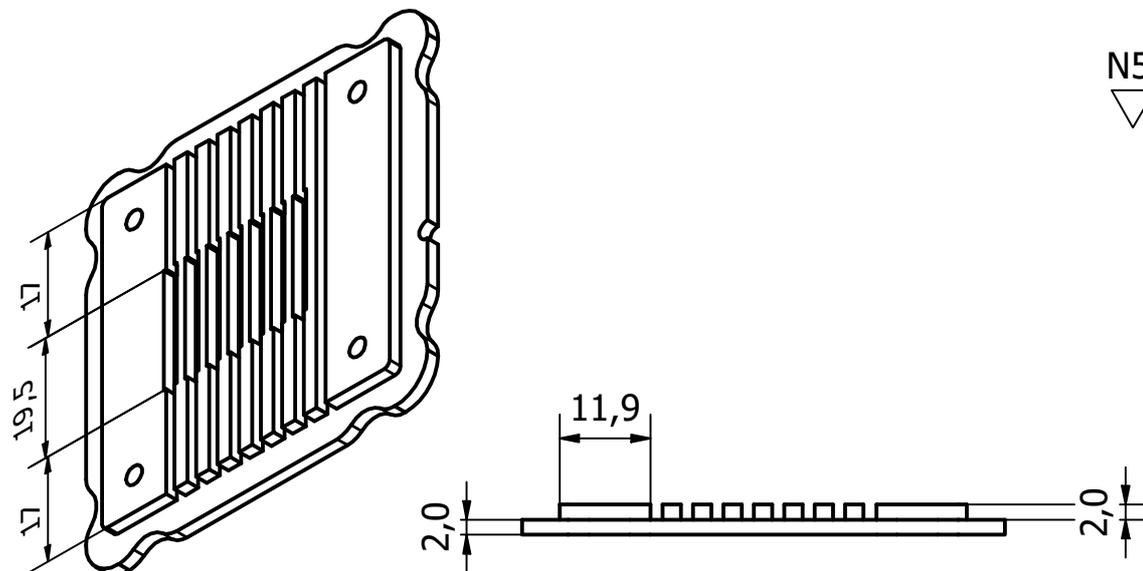
MATERIAL
Grafito (200x100x10)

ESCALA
1:1



CÓDIGO
USFQ20231111EFCO

HOJA #
11

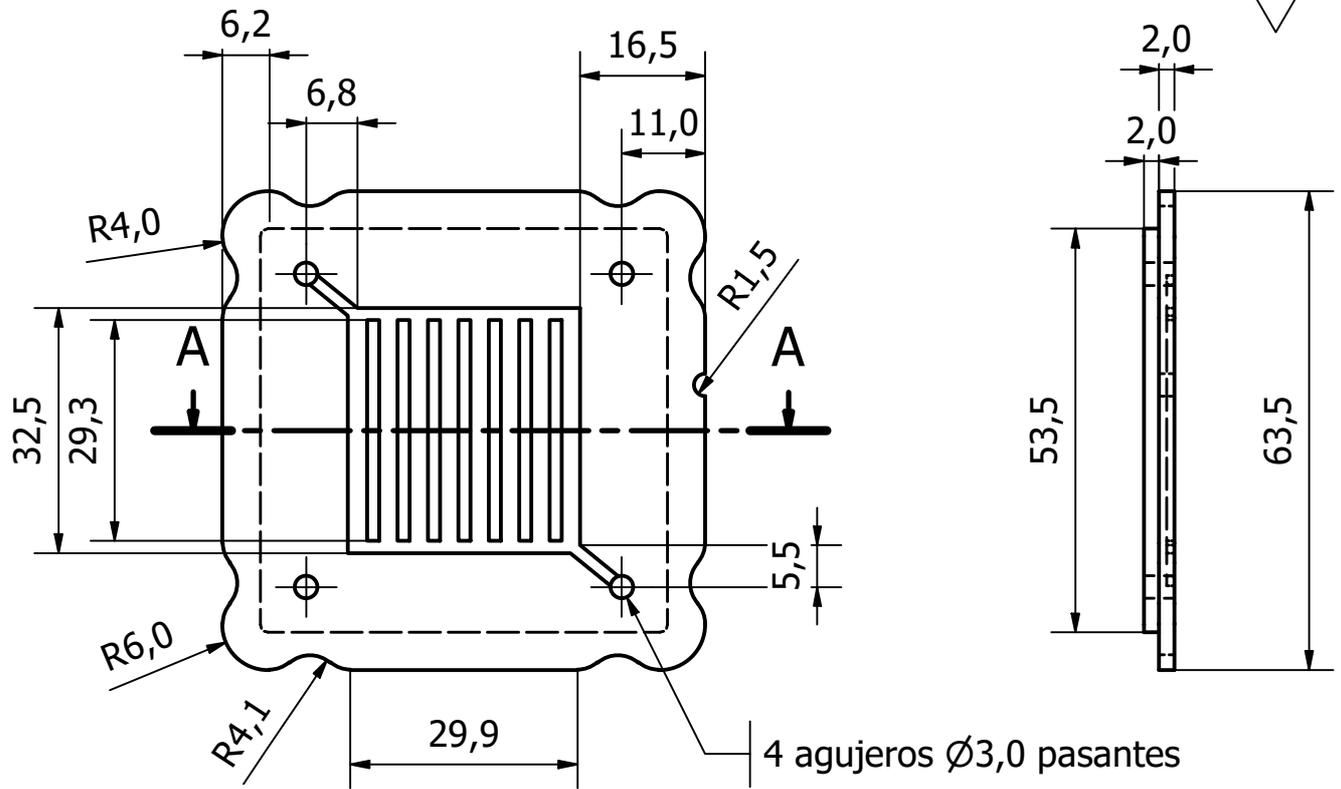


4 agujeros $\varnothing 3$ pasantes

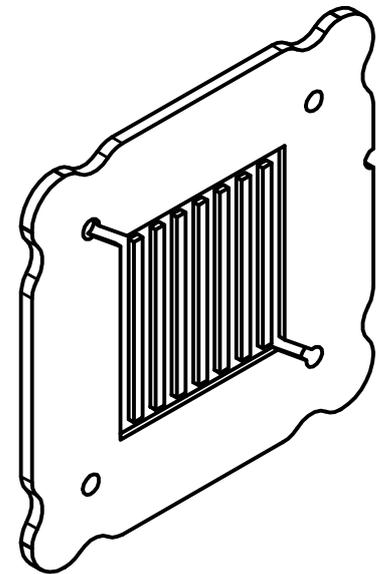
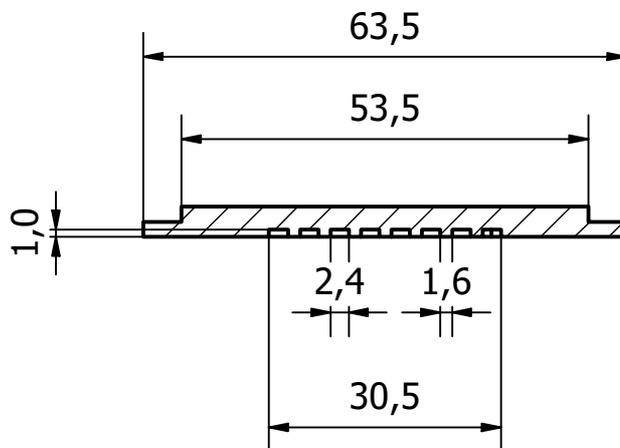
Notas:

Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y 3 mm,
y brocas de 3 mm

TOLERANCIA GENERAL ± 0.1		DENOMINACIÓN Estructura de Flujo: Cátodo	
DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB	Acero Inoxidable 304 (100x100x6)
APROBADO POR			ESCALA 1:1
		CÓDIGO	HOJA #
		USFQ20231112XEFC	12



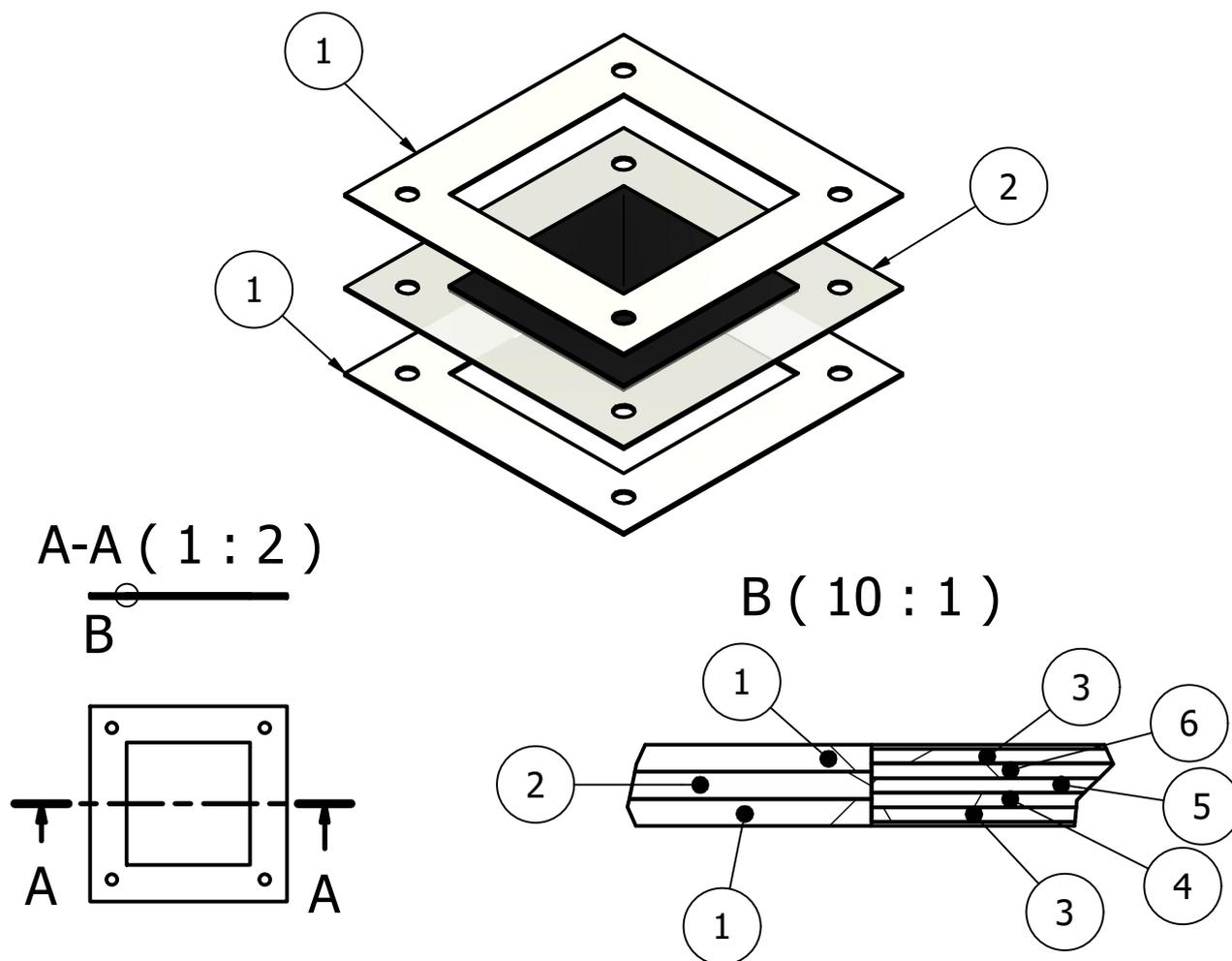
A-A (1 : 1)



Notas:

Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y 3 mm,
y brocas de 3 mm

TOLERANCIA GENERAL		DENOMINACIÓN	
± 0.1		Estructura de Flujo: Ánodo	
	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
DIBUJADO POR	18/09/2023	Emilio Tamayo	Acero Inoxidable 304 (100x100x6)
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB	
APROBADO POR			
USFQ		CÓDIGO	HOJA #
		USFQ20231113XEFA	13



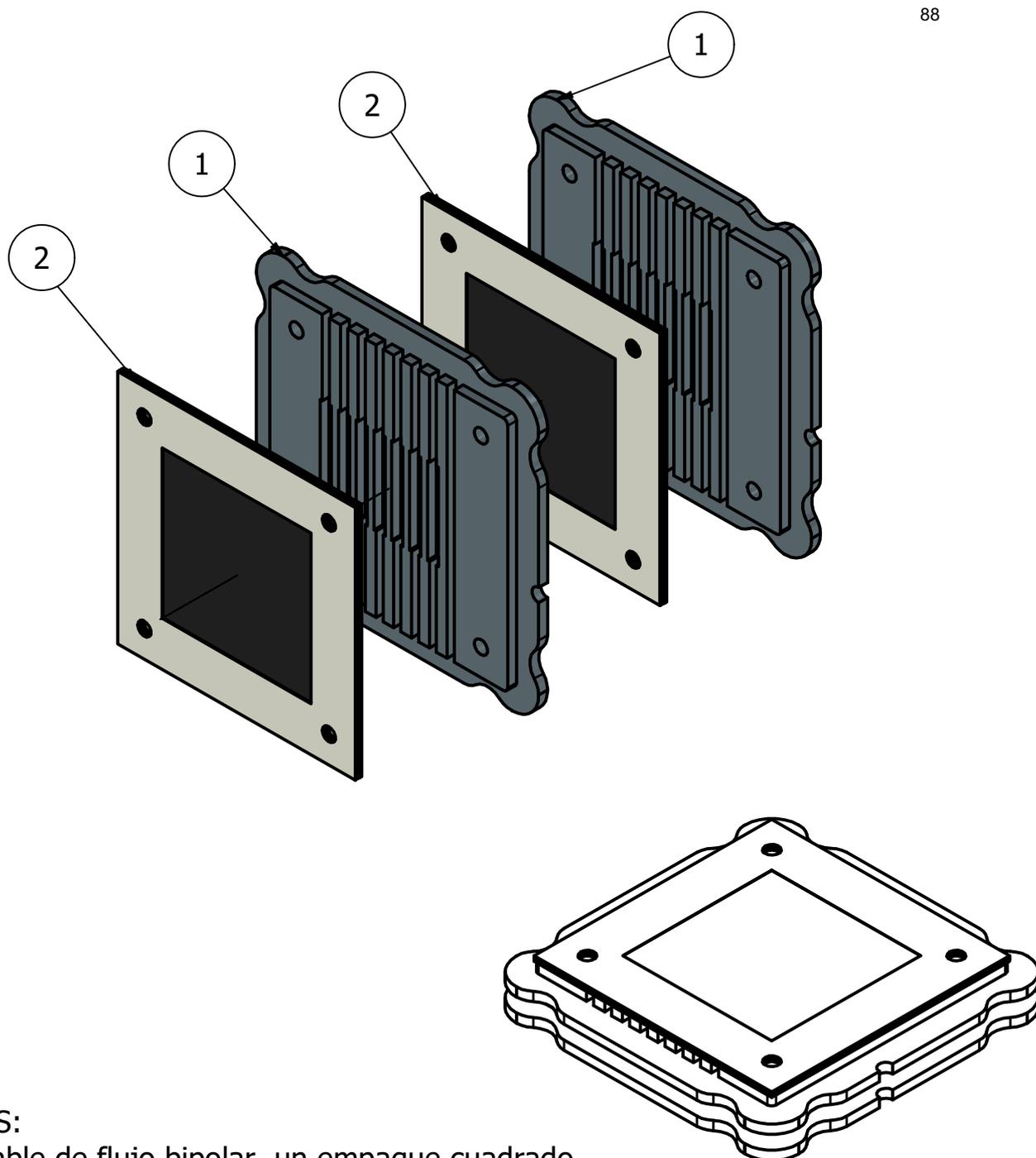
NOTAS:

En la vista B se observa el ensamble correspondiente a una MEA, conformado por: electrodo cátodo, electrodo ánodo y electrolito, es un ensamble adquirido, se muestra una referencia con fines demostrativos, sus partes son microscópicas.

LISTADO DE PARTES

ITEM	QTY	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
1	2	USFQ20231104EC	Empaque Cuadrado
2	1	USFQ20231105PMEA	Plástico MEA
3	2	NA	GDL
4	1	NA	Electrodo Ánodo
5	1	NA	Electrolito
6	1	NA	Electrodo Cátodo

TOLERANCIA GENERAL		DENOMINACIÓN			
±0.1		Ensamble MEA_EC_PMEA			
	FECHA	NOMBRE	PESO	DIMENSIÓN GENERAL	
DIBUJADO POR	18/09/2023	Mateo Espín	NA	53.5 x 53.5 x 1.11	
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB			ESCALA
APROBADO POR					1:1
			CÓDIGO	HOJA #	
			USFQ202311A14MEA_EC_PMEA	14	



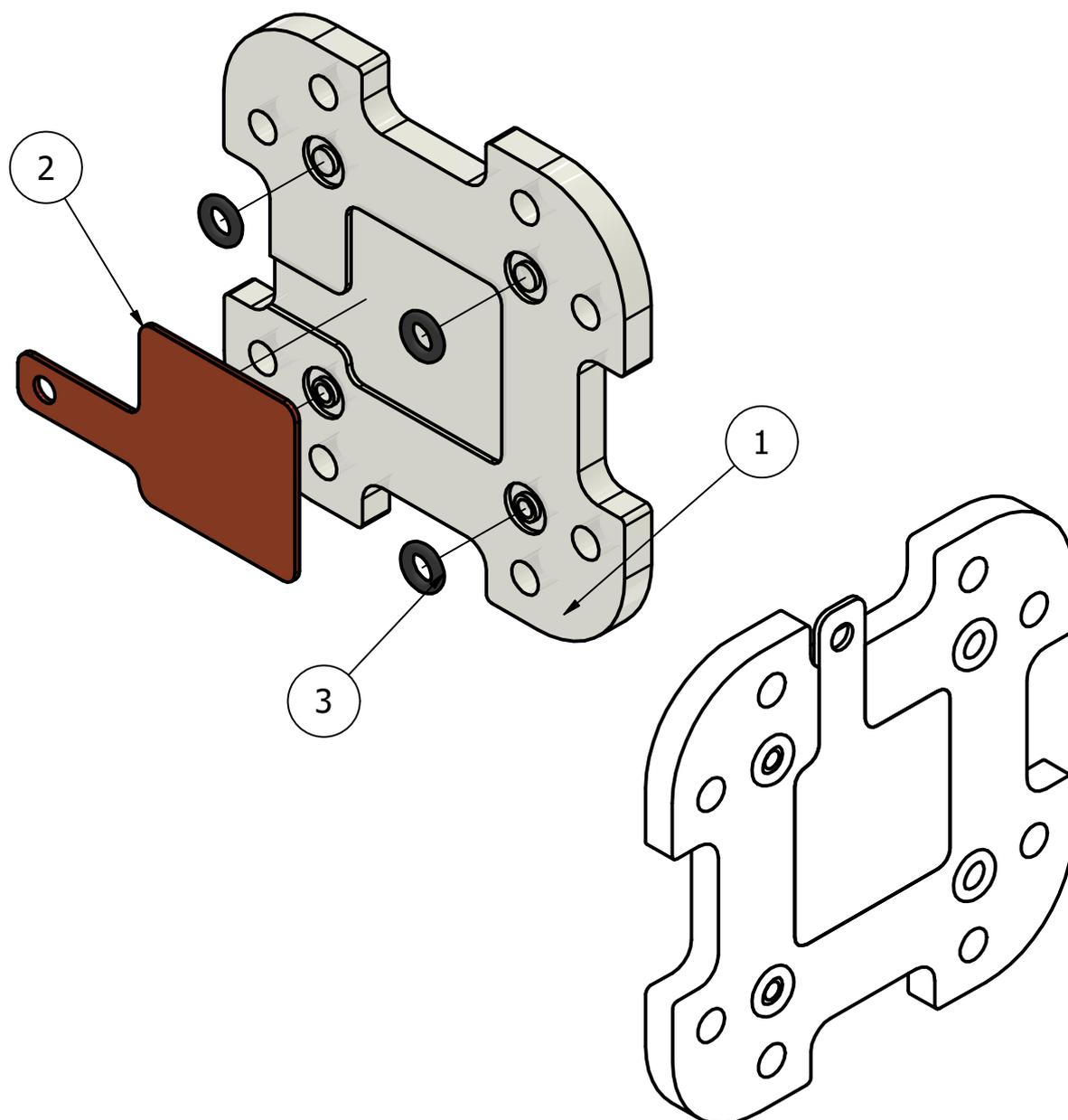
NOTAS:

Ensamble de flujo bipolar, un empaque cuadrado,
una placa MEA, otro empaque cuadrado.

Se repite el ensamble para el número de celdas
requeridas

LISTADO DE PARTES

ITEM	QTY	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN		
1	2	USFQ20231107EFB	Estructura de Flujo: Bipolar		
2	2	USFQ202311A14MEA_EC_PMEA	Ensamble MEA_EC_PMEA		
TOLERANCIA GENERAL		DENOMINACIÓN			
±0.1		MEA_BIP_MEA_BIP			
FECHA		PESO		DIMENSIÓN GENERAL	
18/09/2023		NA		63.5 x 63.5 x 11.4	
NOMBRE		ESCALA		1:1	
Mateo Espín					
REVISADO POR		CÓDIGO		HOJA #	
5/12/2023		USFQ202311A15MBMB		15	
ME, ET, EY, CB					
APROBADO POR					



NOTAS:

El ensamble consta de una placa estructura acrílico, 4 o-rings que sirven como aislantes y una placa cobre colectoras donde se recolecta la energía.

LISTADO DE PARTES

ITEM	QTY	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
1	1	USFQ20231101PEA	Placas Estructura Acrílico
2	1	USFQ20231102PC	Platinas_Cobre_Colectores
3	4	NA	O-RING

TOLERANCIA
GENERAL ± 0.1

DENOMINACIÓN
Estructura Externa

	FECHA	NOMBRE
DIBUJADO POR	18/09/2023	Mateo Espín
REVISADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB
APROBADO POR		

PESO
NA

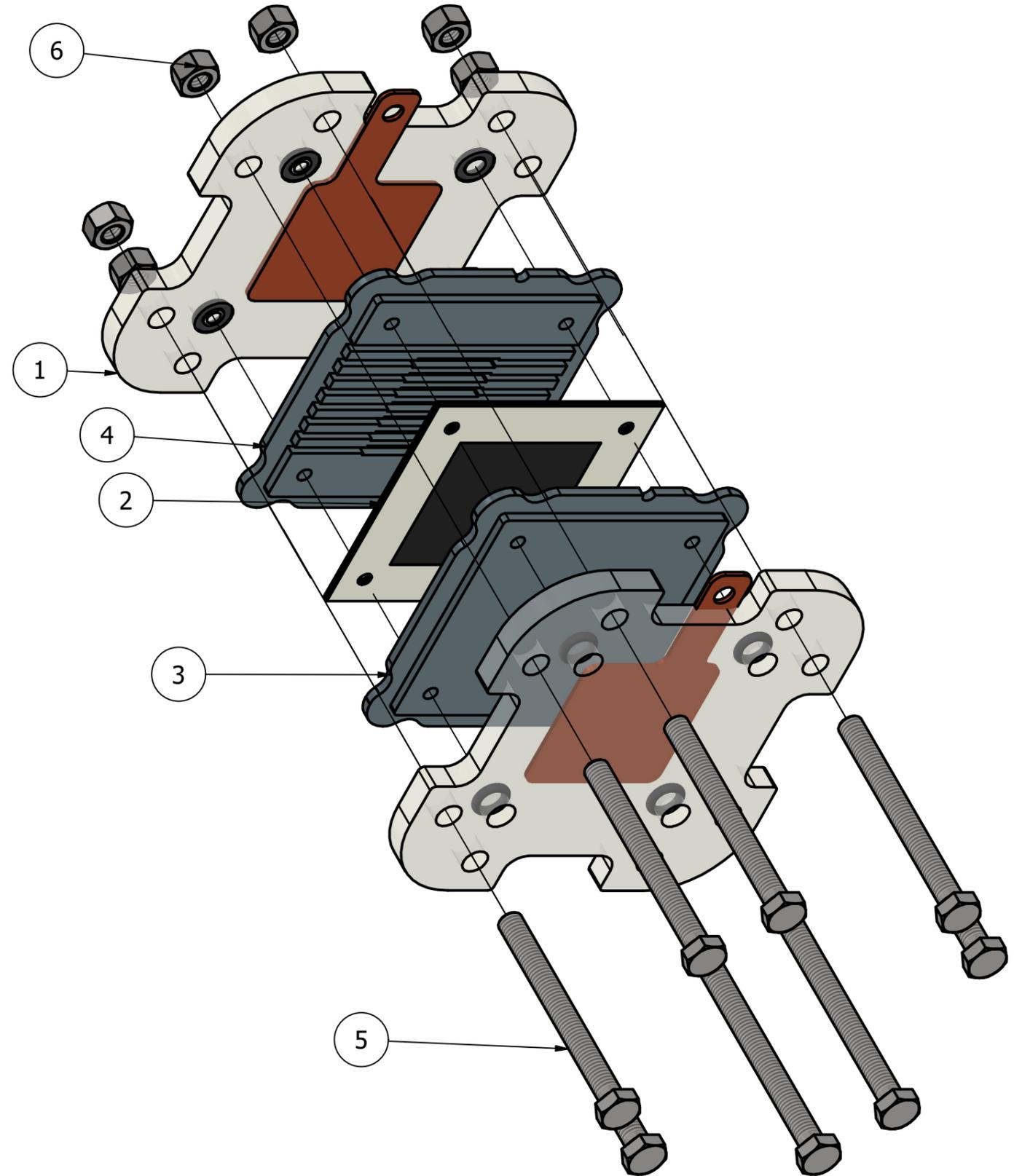
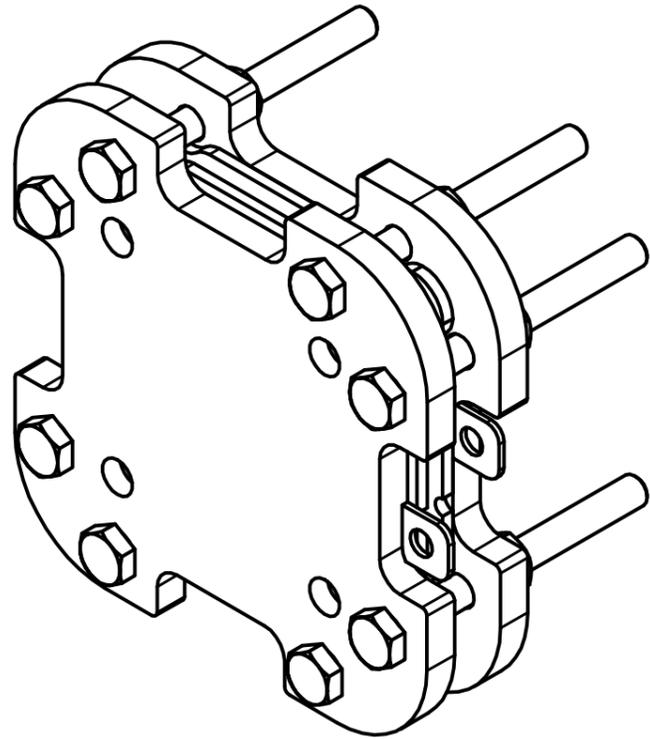
DIMENSIÓN GENERAL
82.5 x 82.5 x 5.5

ESCALA
1:1



CÓDIGO
USFQ202311A16EE

HOJA #
16



NOTAS:
Se ajustan las tuercas con un torque de 0.678 - 0.791 [Nm]

LISTADO DE PARTES

ITEM	QTY	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
1	2	USFQ202311A16EE	Estructura_Externa
2	1	USFQ202311A14MEA_EC_P MEA	Ensamble MEA_EC_PMEA
3	1	USFQ20231108EFA	Estructura de Flujo: Ánodo
4	1	USFQ20231109EFC	Estructura de Flujo: Cátodo
5	8	ISO 4017 - M5 x 50	Hexagon head screws- Product grade A and B
6	8	AS 1112 - M5 Type 5	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts

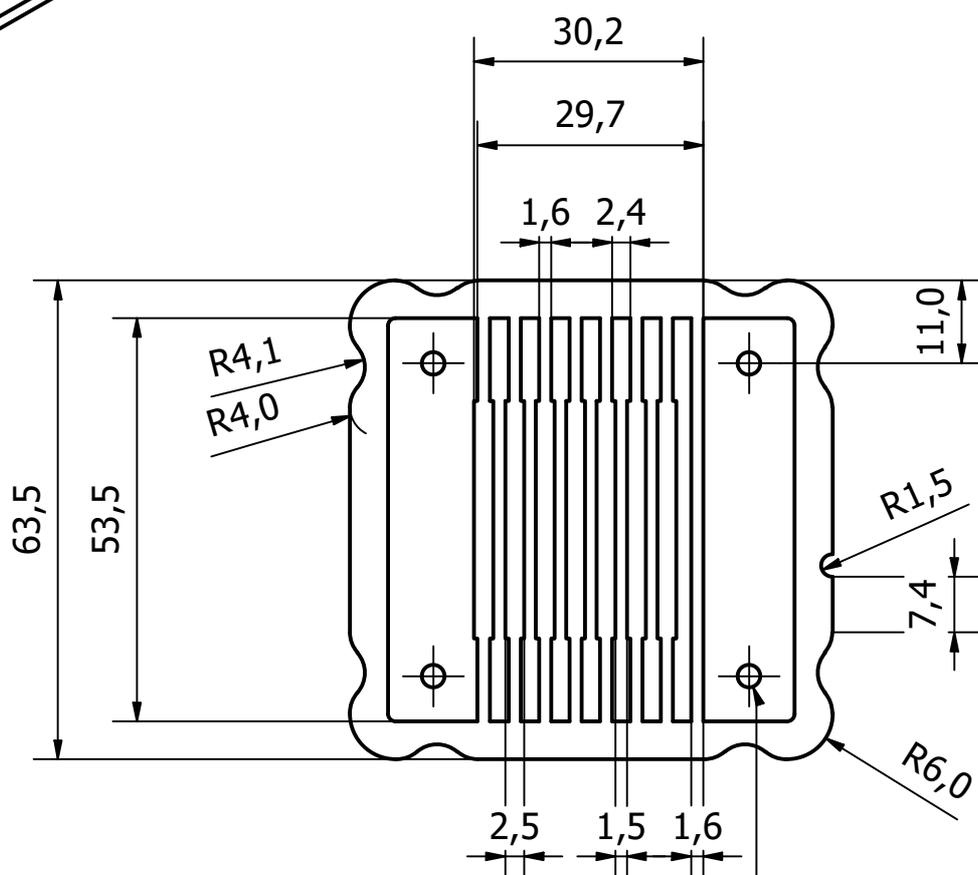
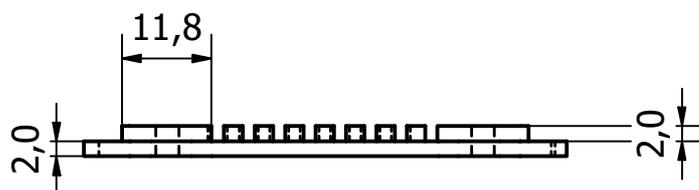
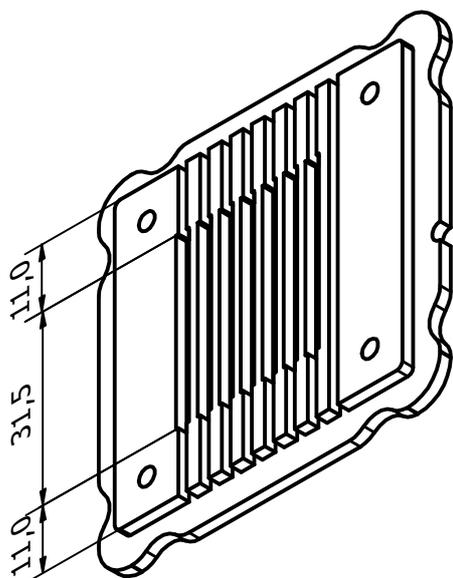
DENOMINACIÓN

PEMFC (1 Celda)

DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	PESO	DIMENSIÓN GENERAL	ESCALA
REVISADO POR	18/09/2023	Emilia Yáñez	209.5 g	82.5 x 82.5 x 53.16	1:1
APROBADO POR	5/12/2023	ME, ET, EY, CB			



CÓDIGO	HOJA #
USFQ202311A17PEMFC1C	17



4 agujeros $\varnothing 3$ pasantes

NOTAS:

Espesor de los canales: 1 mm.

Maquinado CNC con fresas de 1.5 mm y brocas de 3 mm.

TOLERANCIA GENERAL ± 0.1		DENOMINACIÓN Estructura de Flujo: Cátodo (Adquirida)	
DIBUJADO POR	FECHA	NOMBRE	MATERIAL
REVISADO POR			
APROBADO POR			
USFQ		CÓDIGO USFQ20231118EFC	ESCALA 1:1
			HOJA # 18