



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE PEMFCs USANDO UNA CELDA DE TESTEO
COMERCIAL**

POR

Catalina Hernández Vargas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniera Civil Química

Profesor Guía

Luis Felipe Montoya R.

Profesor Co-Guía

Felipe Sanhueza

Ingeniero Supervisor

Daniel Cáceres

Enero 2025

Concepción (Chile)

© 2025 Catalina Hernández Vargas

© 2025 Catalina Hernández Vargas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, sin la cual nada de esto sería posible. Especialmente a mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo. A mi mamá, por sus palabras llenas de motivación y por ser mi mayor confidente. A mi papá, por todas esas veces que me fue a buscar tarde, siempre dispuesto a brindarme su ayuda. Les agradezco profundamente, ya que, gracias a ellos, he aprendido la importancia de la perseverancia y los valores que me han permitido convertirme en la persona que soy hoy.

A mi amiga María Paz, quien hizo este paso por la carrera mucho más llevadero. Gracias por todas esas horas de estudio compartido, por las veces que nos superamos juntas y por todo el apoyo incondicional.

Finalmente, quiero agradecer a mis profesores por su guía y enseñanzas durante este proceso.

Resumen

En el escenario global actual, donde la transición hacia las tecnologías energéticas y sostenible es crucial, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) han surgido como una opción prometedora para la generación de electricidad a partir de hidrógeno verde. Estas celdas destacan por su alta densidad de potencia, operación a bajas temperaturas y capacidad de respuesta rápida, características que la convierten en una alternativa ideal para aplicaciones futuras en transporte y generación estacionaria. Sin embargo, su proceso de desarrollo enfrenta desafíos relacionados con la optimización de componentes y las condiciones de operación que impactan directamente en su rendimiento.

Por lo anterior, este trabajo de tesis se enfoca en la integración de una celda de prueba comercial Leancat en un banco de pruebas para evaluar componentes de la celda PEMFC. La investigación abarca desde el diseño y ensamblaje del sistema hasta su validación experimental. Para ello, se emplean técnicas de caracterización electroquímica, como curvas voltaje-corriente (V-I), análisis estructural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y evaluación molecular a través de espectroscopía Raman. Además, se realizó un análisis ANOVA para interpretar los resultados obtenidos. Se desarrolló también un manual detallado que incluye los procedimientos de configuración, calibración y mantenimiento del banco de pruebas, con el objetivo de garantizar un uso eficiente y seguro del sistema.

Entre los resultados obtenidos, las curvas voltaje-corriente (V-I) mostraron que una humidificación adecuada de los gases reactivos mejora considerablemente la eficiencia electroquímica de la celda. En particular, se observó que al aumentar la humidificación relativa del hidrógeno del 66.7 % al 76.9% y la del oxígeno del 60.2% al 70.5%, la corriente promedio se incrementó en un 45.8%, mientras que el voltaje promedio aumentó un 2.50%. Sin embargo, al aumentar aún más los niveles de humidificación, alcanzando un 82.3% para el hidrógeno y un 78% para el oxígeno, el voltaje continuó incrementándose en un 54.6%, pero la corriente experimentó una disminución del 34.9%, lo que sugiere que una humidificación excesiva podría afectar negativamente la dinámica de transferencia de carga. Además, operar la celda a temperaturas superiores a los 80 °C puede provocar deshidratación de la membrana, resultando en una disminución en la eficiencia de la celda. Por otro lado, los análisis estructurales como la espectroscopía Raman y SEM revelaron cambios significativos en la membrana y catalizadores después de su uso, identificando defectos que impactan en la durabilidad y el

rendimiento del sistema. El análisis ANOVA corroboró que los diferentes niveles de humedad y las temperaturas de la celda influyen directamente en el voltaje y corriente de la celda, lo que destaca la importancia de evaluar estas variables para optimizar su rendimiento.

Abstract

In the current global scenario, where the transition towards sustainable energy technologies is crucial, Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) have emerged as a promising option for generating electricity from green hydrogen. These cells stand out for their high-power density, low-temperature operation, and rapid response capability, characteristics that make them an ideal alternative for future applications in transportation and stationary generation. However, their development process faces challenges related to the optimization of components and operating conditions that directly impact their performance.

For this reason, this thesis focuses on the integration of a commercial Leancat test cell into a test bench to evaluate PEMFC components. The research covers everything from the design and assembly of the system to its experimental validation. For this purpose, electrochemical characterization techniques, such as voltage-current (V-I) curves, structural analysis using scanning electron microscopy (SEM), and molecular evaluation through Raman spectroscopy, are employed. Additionally, an ANOVA analysis was performed to interpret the results obtained. A detailed manual was also developed, including the configuration, calibration, and maintenance procedures of the test bench, with the aim of ensuring the efficient and safe use of the system.

Among the results obtained, the voltage-current (V-I) curves showed that adequate humidification of the reactant gases significantly improves the electrochemical efficiency of the cell. Specifically, it was observed that by increasing the relative humidification of hydrogen from 66.7% to 76.9% and that of oxygen from 60.2% to 70.5%, the average current increased by 45.8% while the average voltage rose by 2.50%. However, by further increasing the humidification levels, reaching 82.3% for hydrogen and 78% for oxygen, the voltage continued to increase by 54.6%, but the current decreased by 34.9%, suggesting that excessive humidification may negatively affect the charge transfer dynamics. Additionally, operating the cell at temperatures above 80 °C can lead to membrane dehydration, resulting in a decrease in cell efficiency. On the other hand, structural analyses such as Raman spectroscopy and SEM revealed significant changes in the membrane and catalysts after use, identifying defects that impact the durability and performance of the system. The ANOVA analysis corroborated that the different humidity levels and cell temperatures directly influence the cell voltage and current, highlighting the importance of evaluating these variables to optimize its performance.

Índice

Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Abstract	6
1. Introducción	10
2. Objetivos	13
2.1. Objetivo general	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. Metodología	14
3.1. Búsqueda de bancos de prueba.....	14
3.2. Diseño de proceso	14
3.3. Montaje de los componentes del proceso.....	15
3.3.1. Gestión Eléctrica	15
3.3.2. Gestión de gases	16
3.3.2.1. Controladores de Flujo de Hidrógeno y Oxígeno	16
3.3.3. Manómetro de Acero Inoxidable.....	17
3.3.4. Gestión de humedad	18
3.3.5. Gestión Térmica	19
3.3.5.1. Calentadores de tipo cartucho	19
3.3.5.2. Termocuplas	20
3.4. Seguimiento de variables	20
3.5. Validación de la celda comercial.....	22
3.5.1. Curva Voltaje-Corriente (V-I).....	22
3.5.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	23
3.5.3. Espectroscopia Raman	24
3.5.4. Análisis de Varianza (ANOVA).....	24
4. Resultados y discusión	25
4.1. Curvas Voltaje-Corriente (V-I)	25
4.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	28
4.3. Espectroscopía Raman	30
4.1. Análisis de Varianza (ANOVA).....	32
5. Conclusiones	41
6. Referencias.....	43

7. Anexos	47
7.1. Anexo 1: Estado del Arte	47
7.1.1. Tipos y Funcionamiento de las Celdas de Combustible	47
7.2. Composición y diseño de las celdas de combustible PEMFC.....	48
7.3. Mecanismos de degradación en celdas PEMFC	50
7.4. Bancos de Pruebas de Celdas PEMFC	51
7.5. Aplicaciones actuales y potenciales de las PEMFC en la industria	55
7.6. Normativas y estándares relevantes para las celdas PEMFC	56
Anexo 2: Componentes y Funcionamiento del Sistema de Gestión Eléctrica	57
Anexo 3: Información Técnica Adicional sobre el Controlador de Flujo GFC 17	59
Anexo 5: Hoja de datos de seguridad del hidrógeno.	62
Anexo 6. Hoja de datos de seguridad del oxígeno.....	65

Índice de Figuras

Figura 3.1. Diagrama de proceso de la celda PEMFC	15
Figura 3.2. Diseño experimental del banco de prueba de la celda PEMFC.	15
Figura 3.3. Sistema correspondiente a la gestión eléctrica del sistema.....	16
Figura 3.4. Controlador de Flujo modelo GFC 17 de Aalborg.	17
Figura 3.5. Manómetro de acero inoxidable de la marca Swagelok.	17
Figura 4.1. Mediciones de voltaje en función de la corriente para diferentes % de humidificación (Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).....	25
Figura 4.2. Voltaje y Corriente en función del tiempo a diferentes % de humidificación (Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).	26
Figura 4.3. Mediciones de voltaje en función de la corriente a diferentes temperaturas de la celda.	27
Figura 4.4. Voltaje y corriente en función del tiempo a diferentes temperaturas de la celda.	27
Figura 4.5. Imágenes SEM (Microscopía electrónica de barrido) de una MEA (Conjunto de electrodos de membrana) A) antes de su uso y B) después de su uso.....	28
Figura 4.6. Gráfico de análisis de espectroscopía Raman de la MEA (Conjunto de electrodos de membrana) antes y después de su uso de una celda PEMFC.	30
Figura 4.9. Gráfico de media para el voltaje [V] a diferentes temperaturas de la celda [°C] (Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).	37
Figura 4.10. Gráfico de media para la corriente [A] a diferentes temperaturas de la celda [°C] (Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).	39
Figura 7.1. Funcionamiento y condiciones de operación de los diferentes tipos de celdas de combustible.	47
Figura 7.2. Banco de pruebas de celdas PEMFC de la empresa CEA Liten.....	53
Figura 7.3. Banco de prueba de una celda PEMFC de la Universidad de Michigan.	55

1. Introducción

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes del siglo XXI, impulsado por las actividades humanas que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos gases atrapan el calor, generando un aumento en las temperaturas globales, alteraciones en los patrones climáticos y una mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. La necesidad de reducir drásticamente las emisiones de carbono es fundamental para mitigar los efectos del cambio climático, y en este contexto, las tecnologías de energía sostenible juegan un rol clave en la transición hacia un futuro más limpio [1].

Una de las soluciones más prometedoras para mitigar la intermitencia de las fuentes renovables es el hidrógeno verde, producido a través de electrólisis del agua alimentada por fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica. El hidrógeno verde, a diferencia del hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, es una opción mucho más limpia y sostenible. Su alta densidad energética y la capacidad de almacenarse y reconvertirse en energía sin generar emisiones de gases de efecto invernadero hacen que su desarrollo sea crucial para la integración de energías renovables intermitentes. Además, el hidrógeno puede ser utilizado tanto en celdas de combustible como en procesos de combustión limpia, ofreciendo flexibilidad en su uso y contribuyendo a una reducción significativa de la huella de carbono [2].

En este contexto, las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) están experimentando un notable desarrollo a nivel mundial, impulsadas por la necesidad de soluciones energéticas sustentables y limpias. A nivel mundial se han llevado a cabo importantes investigaciones y proyectos que buscan mejorar la eficiencia y disminuir los costos de estas tecnologías. Según datos recientes, el tamaño del mercado de celdas de combustible fue valorado en 3.558 millones de dólares en 2022, con una proyección de crecimiento hasta los 39.012 millones de dólares para 2032. Este crecimiento está impulsado por varios factores clave, como la mejora en la eficiencia del combustible, una mayor autonomía de conducción, el rápido desarrollo de la producción de hidrógeno verde y el abastecimiento rápido de combustible. Estas tendencias en el mercado resaltan el creciente interés global en las celdas de combustible como una solución viable para la descarbonización y la diversificación energética. [3]

En el caso de Chile, el país ha tomado medidas decisivas para posicionarse como un líder en la producción de hidrógeno verde, combustible esencial para el funcionamiento de las celdas PEMFC.

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, lanzada en noviembre de 2020, tiene como objetivo aprovechar el potencial renovable del país para producir hidrógeno a bajo costo. Se estima que la Región de Magallanes podría llegar a producir hasta el 13% del hidrógeno verde del mundo gracias a su excelente potencial eólico y la infraestructura existente [4].

Las celdas PEMFC se destacan por su capacidad para convertir la energía química del hidrógeno en electricidad de manera eficiente [5]. Durante su operación, estas celdas no emiten gases de efecto invernadero ni otros contaminantes nocivos, lo que las convierte en una tecnología preferida para diversas aplicaciones energéticas, incluyendo el transporte y la generación de energía estacionaria [6]. Sin embargo, la eficiencia y el rendimiento de estas celdas están directamente relacionadas con la calidad de sus componentes.

Del mismo modo es relevante considerar la degradación de los componentes de la celda PEMFC, lo cual es un desafío crítico para su eficiencia y durabilidad en aplicaciones a largo plazo. La prevención de la degradación es esencial para garantizar la mayor vida útil de los componentes y el máximo rendimiento operativo, lo que resulta fundamental para asegurar la competitividad de esta nueva tecnología [2].

El desarrollo y optimización de las celdas de combustibles requiere equipos de prueba avanzados que permitan evaluar su rendimiento en diversas condiciones. Estos equipos suelen encontrarse en centros de investigación y desarrollo, como, por ejemplo, institutos, las universidades y los centros de enseñanza superior o los departamentos de investigación y desarrollo de fabricantes y proveedores de automóviles, con el objetivo de garantizar la funcionalidad básica del objeto examinado [7]. Sin embargo, a pesar de la importancia de contar con estos equipos especializados, la Universidad de Concepción no dispone de bancos de pruebas específicos para celdas de combustible tipo PEMFC. Esta falta de instalaciones limita las oportunidades para avanzar en la investigación en energías renovables y en el desarrollo de nuevas tecnologías en celdas de combustible dentro de la institución. Además, se observa una falta de datos significativa para la celda comercial de la marca Leancat.

Por esta razón, la presente memoria de título busca abordar esta situación integrando una celda de testeo comercial Leancat en un banco de pruebas de celdas de combustible. Este enfoque permitirá evaluar de manera integral los componentes de celdas PEMFC, desarrollar protocolos de prueba y contribuir a la formación de profesionales capacitados en esta área. Los objetivos específicos de este trabajo incluyen el diseño y ensamblaje de un sistema que incorpore la celda de testeo comercial

Leancat, su evaluación mediante curvas de voltaje-corriente (V-I), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de Raman y análisis de varianza ANOVA, y la elaboración de un manual de uso detallado para el banco de pruebas, que incluya procedimientos de configuración, calibración y mantenimiento del sistema.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Integración de una celda de testeo comercial Leancat, en un banco de pruebas de celdas de combustible, para la evaluación de componentes de celdas tipo PEMFCs.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar y ensamblar un sistema que incorpore la celda de testeo comercial de Leancat
- Desarrollar un manual de uso para el banco de pruebas, con un documento completo que abarque los procedimientos de configuración, calibración y mantenimiento detallado del sistema.
- Evaluar celdas PEMFC comerciales, mediante curvas de voltaje-corriente (V-I), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de Raman y análisis de varianza (ANOVA).

3. Metodología

3.1. Búsqueda de bancos de prueba

Se realizó la búsqueda de artículos sobre la “Evaluación de componentes de PEMFCs usando una celda de testeo comercial”, a través de bases de datos como Google Scholar, Scopus y ScienceDirect. Utilizando palabras claves como, “*PEMFC*”, “*PEMFC Components*”, “*SEM*”, “*Raman Spectroscopy*”, “*Voltage-Current Curves (V-I)*”, “*Fuel Cell Test Bench*”, “*Leancat Testing Cell*”, entre otras, lo que permitió refinar la búsqueda y seleccionar los estudios más relevantes.

3.2. Diseño de proceso

En base a la revisión bibliográfica, se estableció que un banco de pruebas para la evaluación de componentes de celdas PEMFC debía contar, al menos, con los siguientes componentes: un humidificador para ambos gases, controladores de flujo tanto para el hidrógeno como para el oxígeno, y bombonas de oxígeno e hidrógeno. Además, se consideró necesario incluir válvulas reguladoras y un multímetro digital para registrar datos de corriente y voltaje.

Asimismo, se recomendó la incorporación de sensores de temperatura, un controlador de temperatura para mantener condiciones óptimas de operación, indicadores de presión, y una válvula de purga para el correcto manejo de los gases.

En la figura 3.1 se presenta un diagrama de proceso que ilustra la disposición y funcionamiento de cada uno de estos componentes dentro del banco de pruebas.

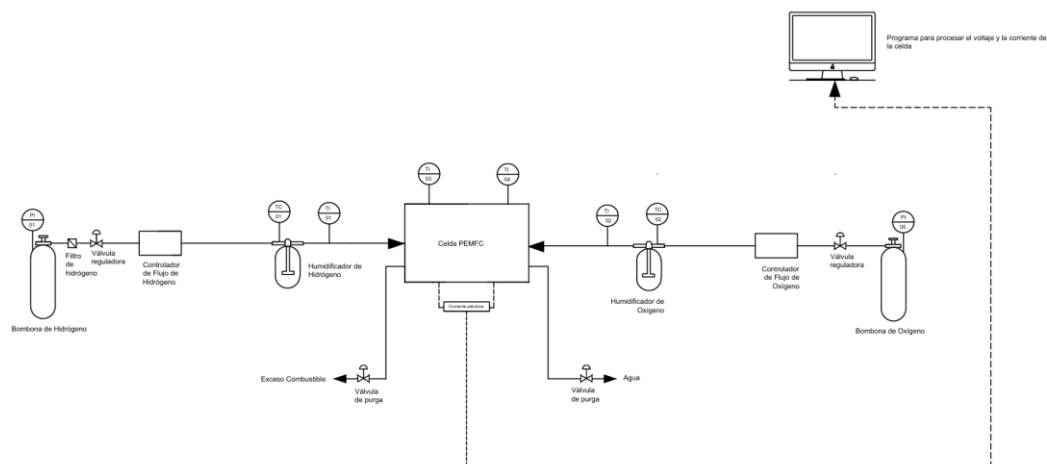


Figura 3.1. Diagrama de proceso de la celda PEMFC

Por otro lado, en la figura 3.2 se muestra el diseño experimental del banco de prueba de la celda PEMFC ocupada para este trabajo de tesis.

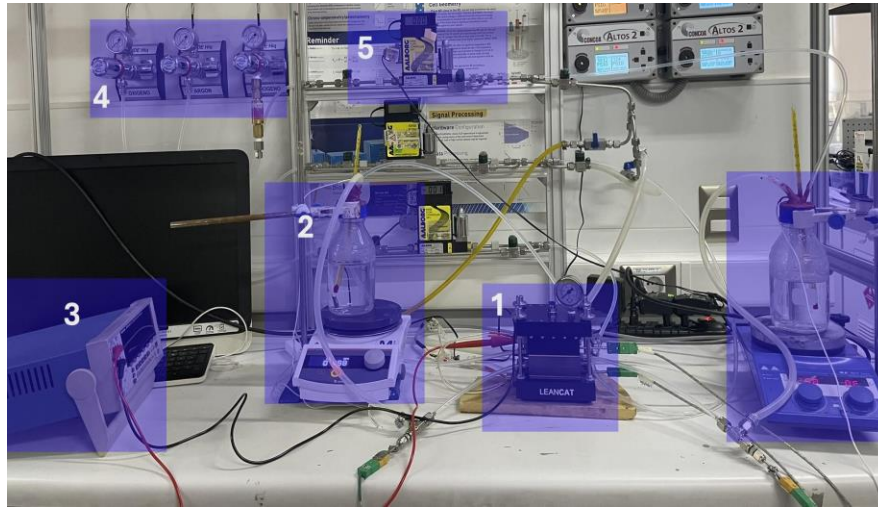


Figura 3.2. Diseño experimental del banco de prueba de la celda PEMFC.

En ella, se identifican los principales componentes del sistema: (1) La celda comercial Leancat; (2) El humidificador equipado con un agitador térmico; (3) El multímetro digital; (4) El sistema de suministro de gases reactivos; (5) Controladores de flujo.

3.3.Montaje de los componentes del proceso

Para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema de prueba de celdas de combustible de tipo PEMFC, se diseñó un sistema integral que incluye los componentes esenciales para la regulación de gases, el monitoreo de variables críticas y el mantenimiento de condiciones ideales de operación. A continuación, se describen los equipos necesarios y sus funciones dentro del sistema.

3.3.1. Gestión Eléctrica

El sistema eléctrico para el control de temperatura de la celda PEMFC ha sido diseñado por la empresa *Comatic*. Este sistema se ha desarrollado para asegurar un control preciso y eficiente de las temperaturas en el ánodo y el cátodo, lo que es fundamental para el funcionamiento óptimo de la celda. Su diseño integral no solo incluye todos los componentes eléctricos necesarios, sino que también optimiza el monitoreo y la gestión de las variables críticas del sistema, como el control de la temperatura interna de la celda y el seguimiento de las temperaturas de los gases reactivos. A continuación, se presenta una visualización de la gestión eléctrica correspondiente a la celda PEMFC.

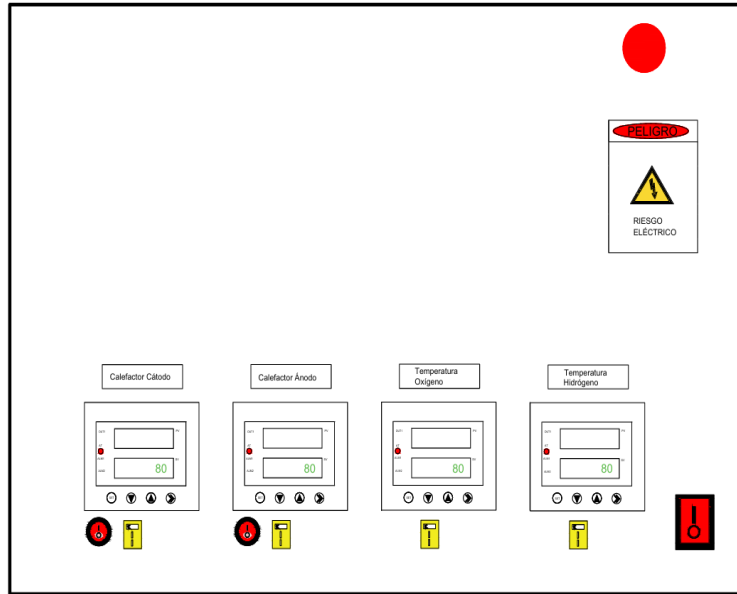


Figura 3.3. Sistema correspondiente a la gestión eléctrica del sistema.

Para un entendimiento más detallado sobre los componentes principales y el funcionamiento de este sistema, revisar el Anexo 2.

3.3.2. Gestión de gases

La gestión de gases es un aspecto crucial en el funcionamiento eficiente de un sistema de celdas de combustible PEMFC. Un control preciso del flujo de hidrógeno y oxígeno no solo optimiza el rendimiento, sino que también garantiza la seguridad del sistema. Para ello, se emplean controladores de flujo, manómetros y sensores de gases que permiten monitorizar y ajustar las condiciones operativas, asegurando así un funcionamiento adecuado y eficaz del sistema.

3.3.2.1. Controladores de Flujo de Hidrógeno y Oxígeno

A continuación, se presenta el controlador de flujo modelo GFC 17 de Aalborg, un equipo esencial para la regulación del flujo de gases en el sistema. Este equipo permite controlar con precisión la cantidad de hidrógeno y oxígeno que se inyecta en la celda de combustible.

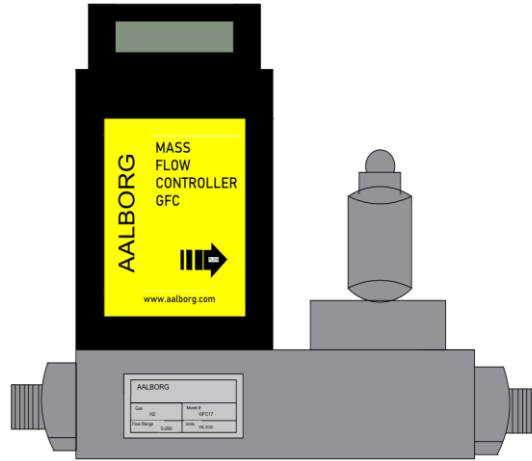


Figura 3.4. Controlador de Flujo modelo GFC 17 de Aalborg.

Para más detalle sobre las especificaciones técnicas, instrucciones de ajuste y operación del modelo GFC 17, se recomienda revisar el Anexo 3.

3.3.3. Manómetro de Acero Inoxidable

En segundo lugar, se encuentra el manómetro, que es de acero inoxidable, el cual está ubicado directamente en la celda. A continuación, se presenta una figura que ilustra estos componentes esenciales.

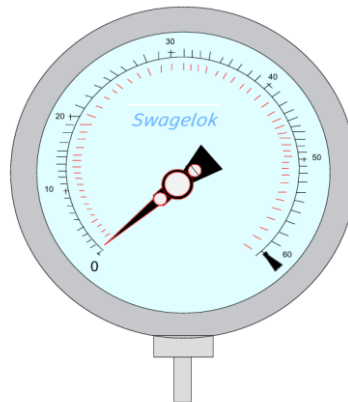


Figura 3.5. Manómetro de acero inoxidable de la marca Swagelok.

Los manómetros son indicadores analógicos utilizados para medir la presión de un gas o líquido, como agua, aceite o aire. A diferencia de los transductores de presión tradicionales, estos son dispositivos analógicos con un dial circular y un puntero accionado mecánicamente que han estado en uso durante décadas [8]. Estos son un parámetro crucial en el sistema debido a que garantizan la consistencia de

un producto y son una medida de seguridad para detectar fugas o el aumento de presión en un sistema [9].

Por otro lado, el uso de un manómetro permite equilibrar la presión interna de la celda, lo que es crucial para maximizar la producción de energía y minimizar las pérdidas parásitas. Mantener una presión adecuada contribuye a reducir la sobretensión de activación en el cátodo, lo que puede elevar la tensión de circuito abierto (OCV) y, en consecuencia, mejorar la eficiencia general del sistema [10].

3.3.4. Gestión de humedad

La humedad es una variable clave en el rendimiento de la celda PEMFC, ya que la conductividad protónica de la membrana depende en gran medida de la humedad misma. Esta hidratación se puede lograr mediante un equilibrio de la humidificación de los gases de entrada, la cantidad de agua generada en el cátodo y la cantidad de agua extraída por los gases que no reaccionaron [11]. Una membrana adecuadamente hidratada asegura alta conductividad de protones, pero el exceso de agua puede causar inundación de poros, aumentando la resistencia a la transferencia de masa. Por lo tanto, es esencial un manejo óptimo del agua para un funcionamiento eficiente de la celda [12].

Por otra parte, es de gran importancia elegir la estrategia de humidificación adecuada para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, para aplicaciones portátiles o de vehículos, se prefiere humidificación interna para reducir peso; en aplicaciones estacionarias, métodos externos como burbujeo o inyección directa de agua son más adecuados. La humidificación externa utiliza dispositivos como humidificadores de burbujeo, rueda entalpia, membrana tubular o plana, que permiten un control preciso de la humedad [13].

En este caso, lo más común a utilizar es el método de humidificación externa que utiliza un humidificador adicional para suministrar vapor de agua a la PEMFC [13]. La humidificación por burbujeo consiste en aumentar la humedad del gas que se introduce en la celda de combustible, como lo son el hidrógeno y el oxígeno.

El proceso de humidificación por burbujeo implica varios pasos que son esenciales para lograr una adecuada saturación del gas con vapor de agua. Una vez que el gas seco ingresa al humidificador, es forzado a pasar a través un líquido, generalmente agua, para así formar burbujas. Cuanto más pequeñas sean estas burbujas, mayor será la superficie de contacto entre el gas y el agua, lo que optimiza la transferencia de vapor de agua al gas. A medida que estas burbujas ascienden a través del agua, se produce un intercambio de calor y masa, donde la diferencia de presión y temperatura entre el agua y

el gas favorece esta transferencia, ya que las burbujas tienden a calentarse durante su ascenso, aumentando su capacidad para retener vapor de agua [14].

El proceso de saturación del gas transcurre a medida que este se desplaza por el humidificador y continua hasta que se alcanza un estado de equilibrio en el que el gas no puede absorber más vapor de agua. En este punto, el gas sale del humidificador con un contenido óptimo de humedad, preparado para ingresar a la celda de combustible [14]. Su monitoreo consiste principalmente a partir de un controlador de temperatura en el humidificador y un sensor de temperatura a la salida.

En la figura 3.6 se puede visualizar más a detalle cómo funciona la humidificación por burbujeo.

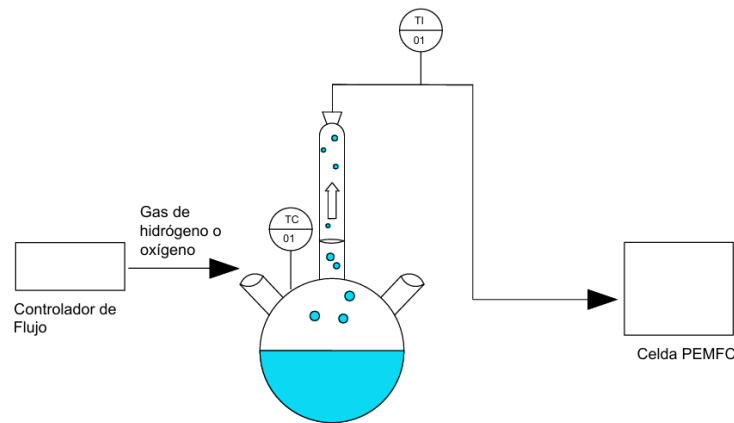


Figura 3.6. Funcionamiento de la humidificación por burbujeo en una celda PEMFC.

3.3.5. Gestión Térmica

La gestión térmica es fundamental en diversos sistemas, especialmente en aquellos que requieren un control preciso de la temperatura como lo son las celdas PEMFC. Un aspecto clave de esta gestión involucra el uso de calentadores de tipo cartucho y termocuplas.

3.3.5.1. Calentadores de tipo cartucho

Son elementos de calentamiento industrial con forma de tubo que se puede insertar en orificios perforados. Estos dispositivos proporcionan un calentamiento localizado y preciso. Los calentadores de tipo cartucho se utilizan comúnmente para calentar piezas de metal, donde su diseño permite una fabricación personalizada según la densidad de vatios requerida para cada aplicación específica [15].

Los calentadores de tipo cartucho son una excelente opción para usar como fuente conductora para calentar placas, bloques y matrices de metal sólido o como fuente de calor convectivo para usar en una variedad de líquidos y gases, tal como, en las celdas de combustible [16] .

3.3.5.2. Termocuplas

Asimismo, la celda incorpora dos termocuplas tipo K para medir la temperatura. Estas termocuplas, fabricadas con Chromel y Alumel, operan en un rango de -200 a 1250 °C [17]. Al ser transductores analógicos, no requieren alimentación externa y generan una señal eléctrica proporcional a la temperatura, que es registrada por un instrumento de medición [18].

3.4. Seguimiento de variables

Es importante considerar como parámetros críticos la temperatura y la humedad de una celda PEMFC, debido a que afectan significativamente el rendimiento y durabilidad de esta misma.

Por un lado, la temperatura de operación es un parámetro crucial que afecta el rendimiento de las celdas PEMFC. La temperatura óptima para este tipo de celdas generalmente se encuentra entre 60 y 80°C. Operar a temperaturas superiores a 80°C puede llevar a la deshidratación de la membrana compuesta de Nafion, lo que incrementa la resistencia al transporte de protones y disminuye la eficiencia de la celda [19] [20].

La temperatura de igual manera influye en la cinética de reacción, ya que a medida que la temperatura aumenta, la velocidad de las reacciones electroquímicas también se incrementa. Esto se traduce en una mayor densidad de corriente y, por ende, en una mayor producción de energía. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden provocar un aumento en el crossover de hidrógeno, lo cual, significa que el hidrógeno que debería ser utilizado en el ánodo, atraviesa la membrana y llega al cátodo, donde no puede participar en la reacción electroquímica prevista, lo que puede llevar a una disminución en la eficiencia general [11].

Otra característica en la que influye la temperatura es la deshidratación de la membrana a altas temperaturas que provoca una resistencia de esta, afectando negativamente la conductividad iónica. Esto puede resultar en un rendimiento deficiente de la celda, ya que la membrana se vuelve menos efectiva en el transporte de protones [19] [20]. Asimismo, a temperaturas elevadas, la inhomogeneidad térmica puede provocar la formación de puntos calientes en la membrana, lo que puede causar perforaciones y, en última instancia, la falla de la celda [11].

Con respecto a la humedad relativa de la celda se tiene que es otro parámetro crítico que influye en el rendimiento de la celda PEMFC. Mantener un nivel adecuado de humedad es esencial para la conductividad iónica de la membrana y para facilitar el transporte de protones.

Según diversos estudios, la humedad está influenciada por la producción de agua generada durante la reacción electroquímica, ya que esta agua es crucial para mantener la hidratación de la membrana. Lograr un equilibrio adecuado entre la producción de agua y su evaporación es fundamental. Un exceso de agua puede causar inundaciones que interfieren con el flujo de reactivos, mientras que su falta puede deshidratar la membrana, afectando el rendimiento y acelerando su degradación. Esta deshidratación vuelve a la membrana más frágil, reduciendo significativamente la vida útil de la celda [20].

La interacción entre temperatura y humedad también es crucial. Una temperatura adecuada puede mejorar la producción de agua y mantener la hidratación, pero temperaturas demasiado altas pueden deshidratar la membrana lo que contrarresta los beneficios de la producción del agua [20]. Sin embargo, la combinación de condiciones óptimas de temperatura y humedad puede generar efectos complementarios que potencian la eficiencia de la celda, maximizan la densidad de corriente y mejorar su rendimiento general [19].

En términos de valores de referencia, se ha reportado que la humedad relativa óptima en celdas PEMFC suele encontrarse entre el 50% y 100%, dependiendo de las condiciones de operación y del diseño del sistema de humidificación. En particular, valores superiores al 80% suelen ser recomendados para garantizar una adecuada hidratación de la membrana sin causar problemas de inundación en los electrodos [21].

Para el monitoreo de la humedad en el sistema, se emplean controladores de temperatura en los humidificadores y sensores de temperatura a su salida. Estas mediciones, permiten estimar la cantidad de vapor de agua en los gases que ingresan a la celda PEMFC, lo que permite evaluar si la humidificación es adecuada.

3.5. Validación de la celda comercial

3.5.1. Curva Voltaje-Corriente (V-I)

La curva I-V abarca las mediciones de parámetros eléctricos como el voltaje y la corriente con el fin de evaluar su rendimiento y eficiencia. Los materiales necesarios son: Celda PEMFC, multímetro digital, cables de medición y fuentes de hidrógeno y oxígeno. Los pasos para la caracterización son:

- Preparación de la celda:

Antes de iniciar las mediciones, se debe verificar que la celda esté correctamente ensamblada y lista para funcionar. Posteriormente, se conectan los cables de medición del multímetro a los terminales de la celda PEMFC.

- Encendido de la celda

Se debe garantizar un flujo adecuado de hidrógeno y oxígeno hacia la celda, realizando pruebas de fugas. Para el hidrógeno se debe utilizar un detector de fugas líquido (Liquid Leak) y para el oxígeno se debe emplear una solución jabonosa. Además, es esencial corroborar que la cantidad de ambos gases reactivos sea suficiente para el funcionamiento continuo de la celda.

- Medición de voltaje producido con el multímetro

Una vez conectados los cables del multímetro a los terminales de la celda, se mide el voltaje en tiempo real y se registra el valor obtenido. Esta medida refleja la diferencia de potencial eléctrico generado por la celda.

- Medición de la corriente eléctrica producida

Con los cables del multímetro conectados a los terminales de la celda, se mide la corriente en tiempo real. Luego, se registra el valor, que representa la cantidad de carga eléctrica producida por la celda PEMFC en un intervalo de tiempo determinado.

Con el objetivo de validar el rendimiento de la celda comercial, se llevó a cabo el siguiente diseño experimental.

- Mediciones bajo diferentes porcentajes de humidificación relativa:

Se realizan mediciones de voltaje y corriente bajo diferentes porcentajes de humidificación relativa para los gases de alimentación, hidrógeno y oxígeno. La humedad relativa (HR) de estos

gases se determinó según la ecuación 3.1, la cual se calculó a partir de los datos obtenidos mediante controladores de temperatura ubicados en el humidificador y a la salida del mismo.

$$HR = \left(\frac{P_{vapor\ de\ agua}}{P_{vapor\ saturado}} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde:

- $P_{vapor\ de\ agua}$ es la presión parcial del vapor de agua en el gas
- $P_{vapor\ saturado}$ es la presión de vapor saturado a la misma temperatura del agua.

Donde las condiciones específicas para cada experimento fueron las siguientes:

Humidificación relativa: 66.7 % de hidrógeno y 60.2% de oxígeno, 76.9% de hidrógeno y 70.5% de oxígeno, 82.3% de hidrógeno y 78% de oxígeno.

Flujos de gases: 180 ml/min para hidrógeno y 100 ml/min para oxígeno.

Temperatura de la celda: 60 °C.

- Mediciones de voltaje y corriente a diferentes temperaturas de operación de la celda PEMFC.

Las condiciones específicas para cada experimento fueron las siguientes:

Humidificación relativa: 82.3% de hidrógeno y 78% de oxígeno.

Flujo de gases: 180 ml/min para hidrógeno y 100 ml/min para oxígeno.

Temperatura de la celda: 60 °C, 70 °C y 80 °C.

Estas condiciones permiten evaluar detalladamente el impacto de la humidificación relativa en el desempeño eléctrico de la celda PEMFC, así como el efecto de la temperatura de la celda en condiciones de máxima humedad relativa.

3.5.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica muy versátil que permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de las muestras, utilizando un haz de electrones enfocado. Proporciona detalles tridimensionales de la superficie con una resolución superior a la microscopía óptica, con un campo de visión de uno a varios cientos de micrones [22]. En este caso, se analiza la MEA (Conjunto de electrodos de membrana) de la celda PEMFC con el fin de comparar el antes y después de su uso, utilizando un equipo de marca JEOL modelo JMS-6010PLUS/LA.

3.5.3. Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman proporciona información sobre los niveles de energía vibracional de las moléculas. Estructura química, enlaces, conformación y enlaces intermoleculares. Las interacciones entre las moléculas se pueden obtener a partir de esta técnica [23]. Esta técnica se basa en la dispersión inelástica de la luz monocromática, donde la luz láser incidente excita las moléculas, y estas emiten luz a longitudes de onda diferentes, lo que permite identificar y cuantificar diversas sustancias [24].

En este caso, se utilizó la espectroscopia Raman para analizar la MEA de la celda PEMFC, para evaluar que tipos de enlaces hay presentes. Donde se utilizó el equipo LabRam HR Evolution en un rango de 600-4000, objetivo x100, tiempo de adquisición de 8 segundos, acumulación de 15 y laser al 50%.

3.5.4. Análisis de Varianza (ANOVA)

Se realizó un tratamiento estadístico de los datos mediante el software Statgraphics empleando un análisis de varianza (ANOVA) factorial para investigar las relaciones entre las variables dependientes: corriente y voltaje con dos factores independientes: humedad relativa de hidrógeno y oxígeno y temperaturas de la celda.

4. Resultados y discusión

4.1. Curvas Voltaje-Corriente (V-I)

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas para corriente y voltaje durante el funcionamiento de la celda PEMFC, bajo diferentes condiciones de humidificación relativa y temperatura de la celda. Las mediciones se realizaron utilizando un multímetro digital, con un tiempo de registro de 300 s.

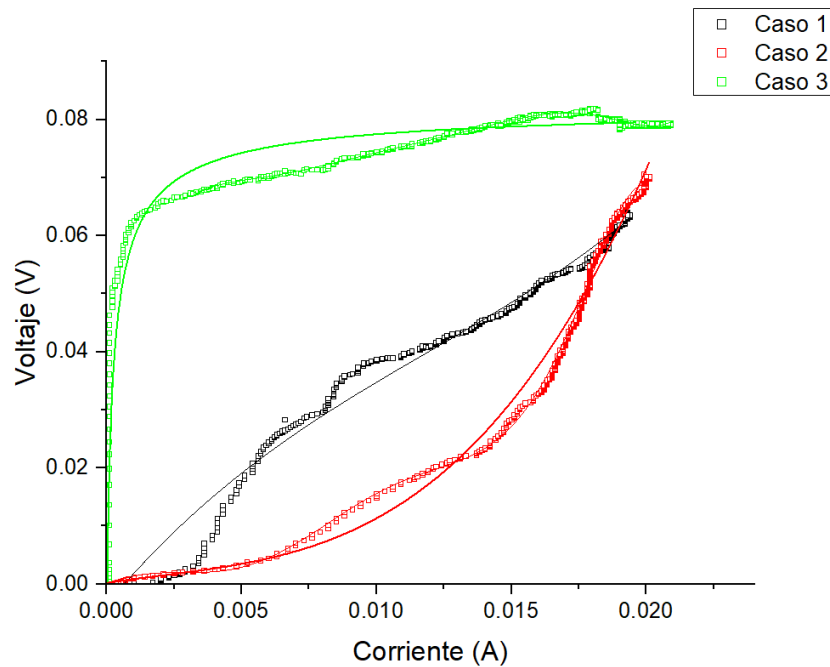


Figura 4.1. Mediciones de voltaje en función de la corriente para diferentes % de humidificación (Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

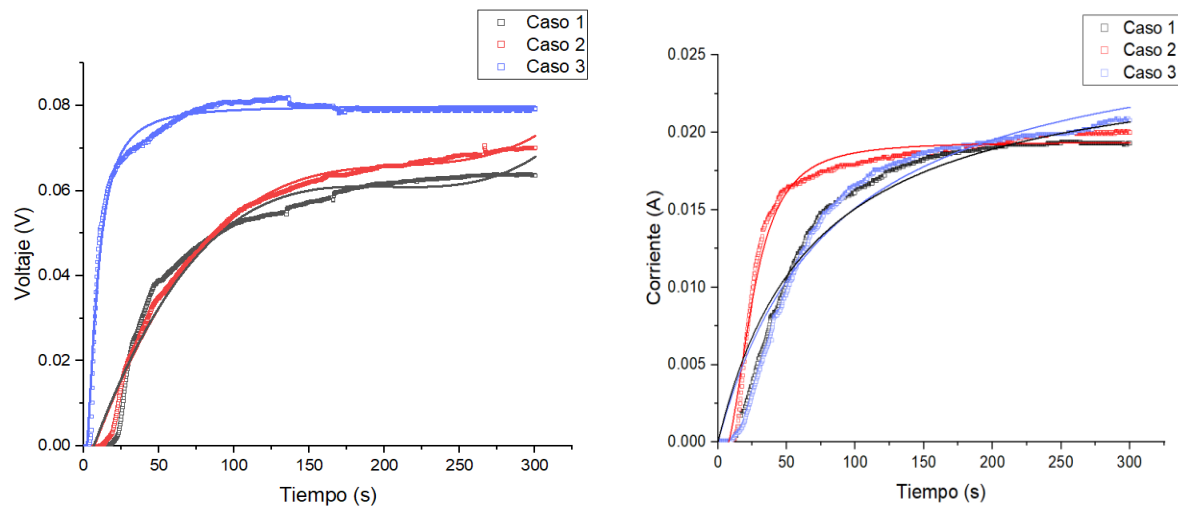


Figura 4.2. Voltaje y Corriente en función del tiempo a diferentes % de humidificación (Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

Para facilitar el entendimiento de los resultados, se emplearán los términos Caso 1, Caso 2 y Caso 3 para referirse a las distintas combinaciones de humedad relativa de los gases reactivos utilizados en los experimentos, las cuales se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Humedad relativa en cada caso experimental (Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

Caso	% de humidificación relativa
Caso 1	66.7 % de hidrógeno y 60.2% de oxígeno
Caso 2	76.9 % de hidrógeno 70.5 % de oxígeno
Caso 3	82.3% de hidrógeno y 78% de oxígeno

En el análisis de la corriente en función del voltaje, se observa que la humidificación de los gases reactivos en el Caso 3 resulta en un desempeño superior de la celda PEMFC, evidenciado por un mayor voltaje y corriente en comparación con la humidificación al Caso 1 y 2. Cabe destacar que la temperatura de operación de la celda se mantuvo constante en 60 °C.

Estos resultados destacan la importancia de la humidificación adecuada, ya que a mayores porcentajes de humidificación se mejora la hidratación de la MEA, incrementando su conductividad protónica y favoreciendo la movilidad de los protones. Esto asegura un balance hídrico eficiente, evitando tanto la deshidratación como la inundación de la membrana, condiciones que pueden afectar negativamente a la celda. Es esperable entonces que a una mayor humidificación facilite las reacciones electroquímicas en los electrodos y optimice la conducción iónica a través de la membrana lo que da como resultado un mayor voltaje y corriente. Por lo tanto, porcentajes de humidificación más bajas, como el Caso 1, pueden provocar la deshidratación de la membrana, reduciendo su conductividad protónica o hasta la degradación de la misma. Por consiguiente, se puede decir que a mayores temperaturas de humidificación la celda presenta una mayor eficiencia electroquímica.

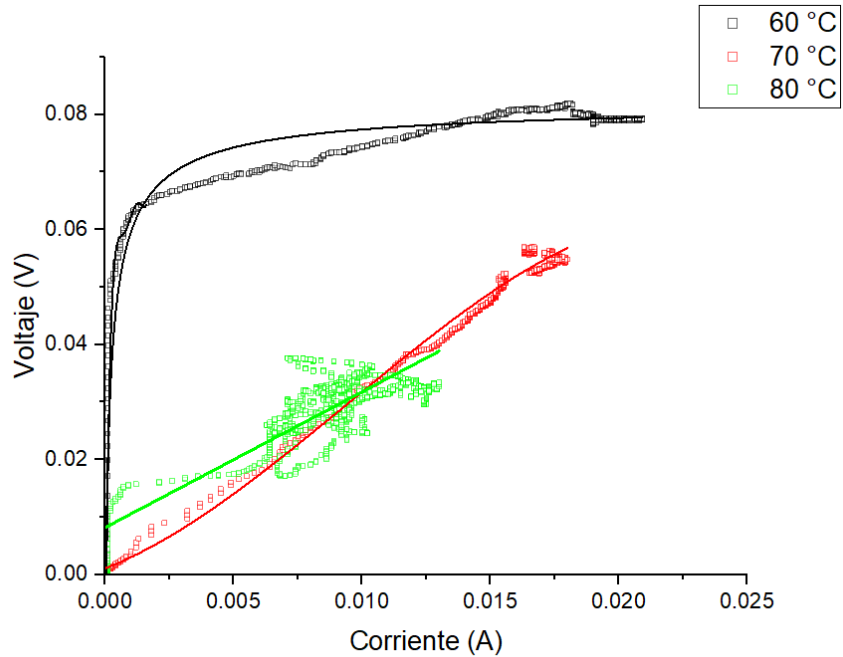


Figura 4.3. Mediciones de voltaje en función de la corriente a diferentes temperaturas de la celda.

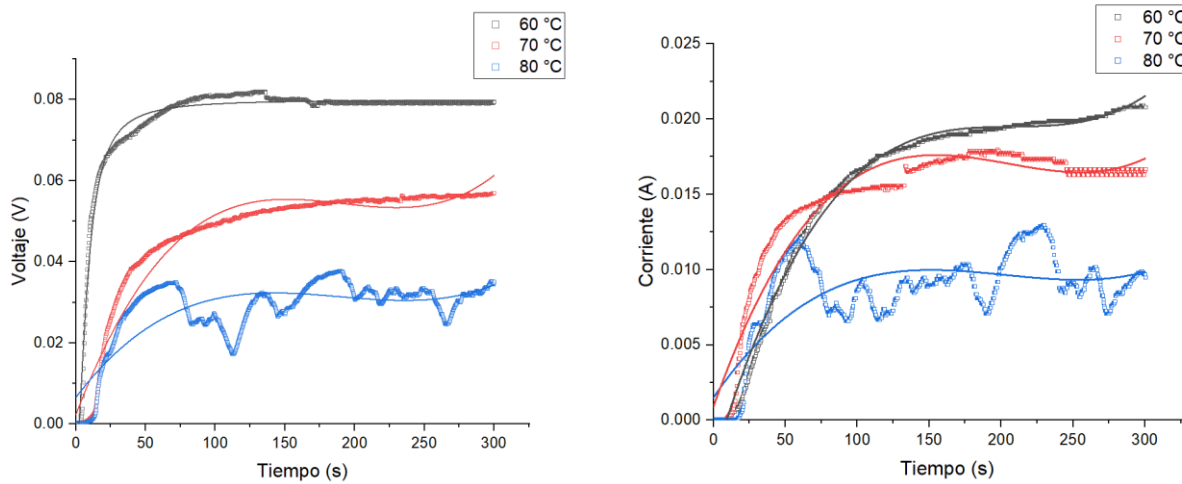


Figura 4.4. Voltaje y corriente en función del tiempo a diferentes temperaturas de la celda.

En la figura 4.3 se observa que, a medida que aumenta la temperatura de la celda, tanto el voltaje como la corriente tienden a disminuir. A una temperatura de la celda de 60 °C, se registran los valores más altos de corriente y voltaje, mientras que, a 70°C, ambos parámetros muestran un comportamiento intermedio. Sin embargo, a 80°C, se evidencian los valores más bajos de corriente y voltaje, además de un aumento notable en las fluctuaciones, lo que indica una menor estabilidad. Este fenómeno puede

deberse por el aumento de la velocidad de las reacciones electroquímicas a medida que la temperatura sube, lo que inicialmente incrementa la corriente. Sin embargo, temperaturas elevadas, como las de 70°C y 80°C, pueden causar deshidratación de la membrana, incrementando la resistencia al transporte de protones y reduciendo la eficiencia de la celda. A temperaturas más elevadas, de igual manera pueden formarse in-homogeneidades térmicas y puntos calientes en la membrana, lo que podría resultar en perforaciones y fallos. En consecuencia, se observa que a 80°C la membrana empieza a degradarse, lo cual se refleja en inestabilidad de las mediciones.

Comparando los resultados obtenidos con los presentados por Wang (2024) a partir de una celda similar de la misma marca Leancat [25], se observa que los valores de voltaje y corriente son totalmente menores a los de Wang (2024). El cual obtuvo una corriente máxima de 44.5 A a 70% de humedad relativa y un voltaje máximo registrado de 0.6 V. Esta diferencia se debe principalmente al uso de materiales y estructuras avanzadas en el estudio de Wang, que mejoran significativamente el manejo de agua y el transporte de gases, además de la optimización del uso de materiales catalíticos.

Asimismo, la marcada diferencia dada entre ambos resultados puede atribuirse a que la MEA utilizada en esta tesis sufrió un deterioro considerable, posiblemente debido a condiciones térmicas adversas y a episodios de deshidratación causados por altas temperaturas. Estas condiciones pueden haber llevado a la formación de grietas en la membrana, afectando su conductividad protónica y su funcionalidad general.

4.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

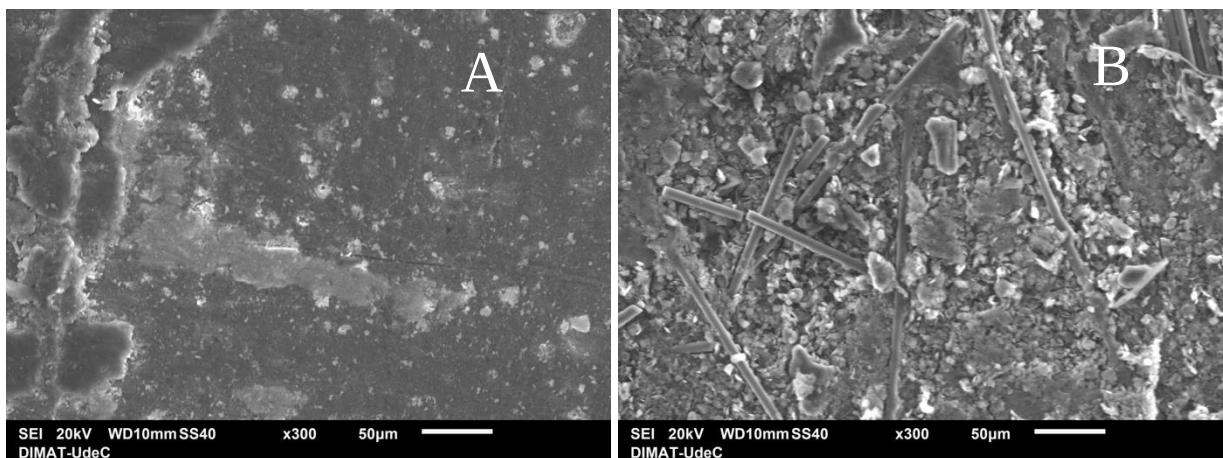


Figura 4.5. Imágenes SEM (Microscopia electrónica de barrido) de una MEA (Conjunto de electrodos de membrana) A) antes de su uso y B) después de su uso.

A partir de las imágenes, se observa que la MEA sin usar presenta una superficie más lisa y homogénea, con algunas partículas dispersas, pero sin características sobresalientes de desgaste o acumulación. En contraste, la MEA después de su uso muestra una superficie mucho más heterogénea, con acumulación de material y estructuras irregulares, lo que sugiere procesos de degradación. Estos efectos pueden atribuirse a la acumulación de productos de reacción y a la presencia de fibras fragmentadas que se logran visualizar que pueden estar relacionadas con la parte del soporte del catalizador. La validación de esta comparativa se complementa con un análisis de mapeo elemental, cuyos resultados se presentan a continuación:

Tabla 4.2. Composición Elemental de la MEA (Conjunto de electrodos de membrana) antes y después de su uso.

Fórmula	% Masa antes del uso	% Masa después del uso
C	17.29	82.71
F	73.69	17.06
S	0.59	0.06
Pt	8.43	0.16

La composición de flúor y azufre viene asociado a la membrana de Nafion, que es un copolímero de tetrafluoroetileno sulfonado que consta con una cadena principal de fluorocarbono hidrófoba y grupos sulfonato hidrófilos [26]. El alto nivel de conductividad de cationes en las membranas de Nafion se debe a la presencia de sulfonato [27]. Por lo tanto, la pérdida de flúor después de su uso podría estar relacionada con la degradación de la membrana de Nafion, lo que indica una pérdida significativa de material debido al desgaste. Por otro lado, la disminución de azufre sugiere una pérdida de conductividad, lo que impacta negativamente en la capacidad de conducción de protones de la membrana. Esto podría ser consecuencia de factor como las altas temperaturas experimentadas por la celda durante su funcionamiento.

En cuanto a la composición de carbono y platino, ambos están asociados al catalizador de platino soportado sobre carbono. El carbono se utiliza convencionalmente como material de soporte debido a su buena conductividad eléctrica y gran área de superficie, características que son beneficiosas para el transporte rápido de electrones en los electrodos, además de ayudar a dispersar las partículas de platino en su superficie. Ambos tienen como objetivo mejorar el rendimiento general de una celda PEMFC [28]. Es importante destacar que las propiedades del carbono también influyen

considerablemente en su susceptibilidad a la corrosión electroquímica, lo que puede impactar en la durabilidad y la estabilidad del sistema [29]. A partir de los resultados obtenidos, se observa que la masa de carbono aumenta significativamente después del uso, lo que sugiere que el carbono podría estar acumulando material o formando productos derivados de la corrosión superficial. Por otro lado, la masa de platino disminuye significativamente. Esta reducción en la cantidad de platino indica una disminución en la eficiencia del catalizador durante el funcionamiento de la celda, lo que afecta significativamente al rendimiento global de la celda PEMFC, lo cual se refleja en las curvas Voltaje-Corriente (V-I).

4.3. Espectroscopía Raman

A continuación, se presentan los gráficos de la espectroscopía Raman correspondientes a las condiciones previas y posteriores al uso de la MEA.

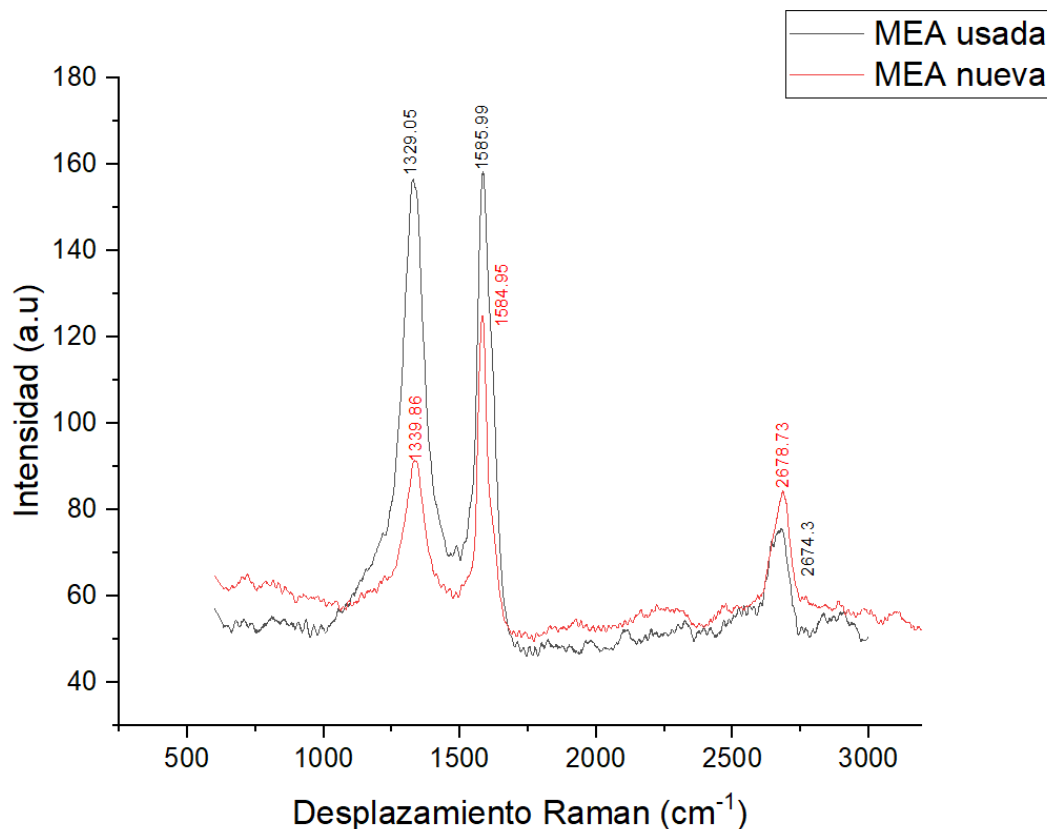


Figura 4.6. Gráfico de análisis de espectroscopía Raman de la MEA (Conjunto de electrodos de membrana) antes y después de su uso de una celda PEMFC.

Se puede observar que para el caso de la MEA sin usar, se identificaron picos en 1339, 1584, 2678 cm^{-1} . Por su parte, la MEA usada presentó picos en 1329, 1586, 2674 cm^{-1} . Según la bibliografía

se tiene que para picos entre $1300\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ corresponden a la banda D, asociada a defectos en la estructura del carbono. Estos defectos están vinculados con la presencia de grupos funcionales, como epóxido e hidroxilo, que generan desorden en el esqueleto de carbono. La variación en la posición del pico D entre la MEA sin usar y la usada sugiere cambios en la cantidad o tipo de defectos inducidos durante el funcionamiento de la celda, reflejando un aumento en el desorden estructural

Por otro lado, los picos entre $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ se relacionan con la banda G, que indica el estiramiento del enlace C-C en materiales gráfiticos. La leve variación en la posición de esta banda después del uso de la MEA podría implicar alteraciones en la estructura del carbono. Un desplazamiento de la banda G hacía frecuencias más altas señala defectos considerables en la estructura del óxido de grafeno debido al uso de la celda. Según otros estudios, como el realizado por McCreery (2005) [30], los cambios en la posición de las bandas D y G pueden indicar alteraciones significativas en la estructura del material debido a procesos electroquímicos.

El pico entre $2600\text{-}2700\text{ cm}^{-1}$ corresponde a la banda 2D, asociada a un proceso de dos fonones de segundo orden, sensible a la cristalinidad del material.

En cuanto al análisis de los defectos y la cristalinidad, la relación de intensidad de la banda G a la banda D (relación I_D/I_G) se utiliza comúnmente como indicador del grado del desorden estructural [31]. Un aumento en la relación I_D/I_G indica un mayor nivel de defectos en el carbono, lo que podría explicarse por la platinización y la operación de la celda.

Analizando esta relación para los picos obtenidos, se tiene una intensidad para la banda D de 91.5 y para la banda G de 124.8 para la MEA sin usar, por otro lado, para la MEA después de usar se tiene una intensidad para la banda D de 156.6 y para la banda G de 158. Por lo tanto, la relación I_D/I_G es de 0.73 y 0.99 respectivamente para la MEA sin usar y usada.

Estos valores indican un aumento en la relación I_D/I_G , la cual se relaciona con la densidad de defectos del grafito, por lo tanto, estaría indicando una mayor cantidad de defectos en el carbono. Asimismo en algunos reportes, se ha utilizado la relación I_D/I_G como una herramienta para identificar los tipos de óxidos del grafeno; cuando la relación I_D/I_G se encuentra entre 0.67-1.4, es un indicativo de la formación de óxido de grafeno, pero si los valores están entre 0.91-1.9, señala la presencia de óxido de grafeno reducido [32]. Por lo tanto, los resultados sugieren que la MEA después de su uso sufrió una oxidación del carbono, generando defectos estructurales debido a los procesos electroquímicos y desgaste térmico.

En consecuencia, a partir del análisis de la relación I_D/I_G se puede decir que los cambios estructurales impactaron negativamente en la eficiencia de la celda, afectando tanto la conductividad eléctrica como el transporte de gases. Según Madhav et al. (2024) [33], los defectos en la membrana de Nafion pueden limitar significativamente el rendimiento electroquímico de las celdas de combustible. Así, los resultados obtenidos en este análisis Raman confirman que la MEA, tras su uso, experimentó un aumento en los defectos estructurales, lo que compromete ambos aspectos fundamentales para el funcionamiento óptimo de la celda.

4.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Mediante el software Statgraphics, se realiza un tratamiento estadístico de datos, utilizando un análisis de varianza (ANOVA) factorial. Este tratamiento incluye una limpieza de datos, eliminando los valores atípicos para asegurar la precisión de los resultados. Con este enfoque, este procedimiento permite investigar las variables dependientes, corriente y voltaje, considerando como factores independientes las diferentes humedades relativas y las temperaturas de la celda. De esta manera, se evalúa la influencia de ambos factores en las mediciones de corriente y voltaje.

El estadígrafo obtenido para el voltaje a diferentes humedades relativas, obtenido para diferentes experimentos se describe en la Tabla 4. Es importante señalar que los experimentos fueron realizados de forma secuencial, es decir, el Experimento 1 fue llevado a cabo antes que el Experimento 2.

Esta secuencialidad de los experimentos refleja un enfoque de monitoreo a lo largo del tiempo, con la intención de evaluar como el rendimiento de la MEA podría verse afectado a medida que se va utilizando repetidamente. En particular, se busca corroborar si, a medida que la MEA es sometida a pruebas continuas, su efectividad disminuye, lo que podría verse reflejado en una caída progresiva en la corriente y voltaje registrado.

Tabla 4.3. Estadígrafo para el voltaje a diferentes humedades relativas a diferentes experimentos (Humedad relativa: Caso 1, 2 y 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

	Experimento 1	Experimento 2
Recuento	40	44
Promedio	0.078	0.053
Desviación estándar	0.024	0.015

Coef. de variación	31.0%	27.9%
Mínimo	0.039	0.035
Máximo	0.102	0.079
Rango	0.062	0.044
Sesgo estandarizado	-1.77	1.16
Curtosis estandarizada	-1.83	-1.73

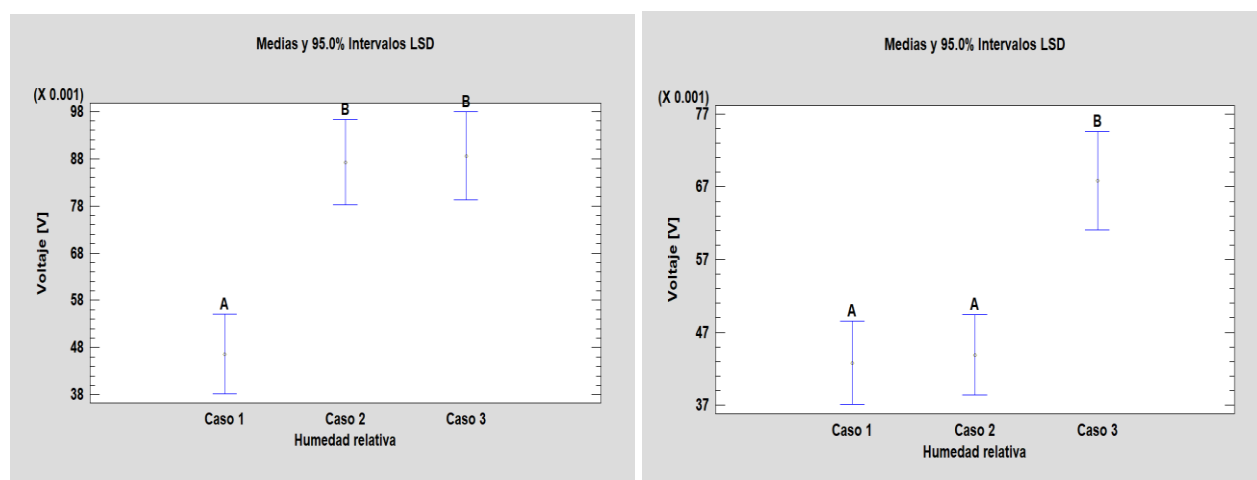


Figura 4.7. Gráfico de medias para el voltaje [V] a distintas humedades relativas para el experimento 1 y 2 respectivamente (Humedad relativa: Caso 1, 2 y 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de voltaje entre un experimento y otro, con un nivel del 5% de significación.

En el gráfico de medias se puede observar que el voltaje aumenta conforme se incrementa la humedad relativa, lo que indica que la humedad favorece la conductividad iónica en la membrana. Este comportamiento queda reflejado en los datos del gráfico, donde en el Experimento 1, para el Caso 1, se obtiene una media de 0.047 V, en el Caso 2, una media de 0.087 V; y en el Caso 3, una media de 0.089 V. Por otro lado, en el Experimento 2, para el Caso 1, la media es de 0.043 V, en el Caso 2 de 0.044 V; y el Caso 3 de 0.068 V.

No obstante, los valores de voltaje en el Experimento 1 son consistentemente más altos que en el Experimento 2. Esto sugiere que las condiciones en el Experimento 1 permitieron un mejor rendimiento en términos de voltaje.

Esta tendencia se reafirma con el estadígrafo. El promedio de voltaje en el Experimento 1 (0.0779 V) es considerablemente mayor que en el Experimento 2 (0.0530 V), lo que respalda la observación de un mejor rendimiento en el primer experimento.

La diferencia en los resultados de voltaje puede estar relacionada con factores como la degradación de la MEA y la acumulación de contaminantes con el tiempo, lo que podría haber influido en la disminución de la eficiencia del Experimento 2.

Por lo tanto, es crucial asegurar que la MEA se mantenga en condiciones óptimas durante el proceso y realizar un mantenimiento adecuado para garantizar el funcionamiento eficiente de la celda PEMFC a lo largo del tiempo.

Por otro lado, el estadígrafo obtenido para la corriente a diferentes humedades relativas, obtenido para diferentes experimentos se describe en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Estadígrafo para la corriente a diferentes humedades relativas a diferentes experimentos (Humedad relativa: Caso 1, 2 y 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

	Experimento 1	Experimento 2
Recuento	230	47
Promedio	0.017	0.012
Desviación estándar	0.004	0.003
Coef. de variación	23.9%	23.4%
Mínimo	0.008	0.009
Máximo	0.032	0.016
Rango	0.024	0.008
Sesgo estandarizado	-1.86	1.64
Curtosis estandarizada	-0.77	-1.79

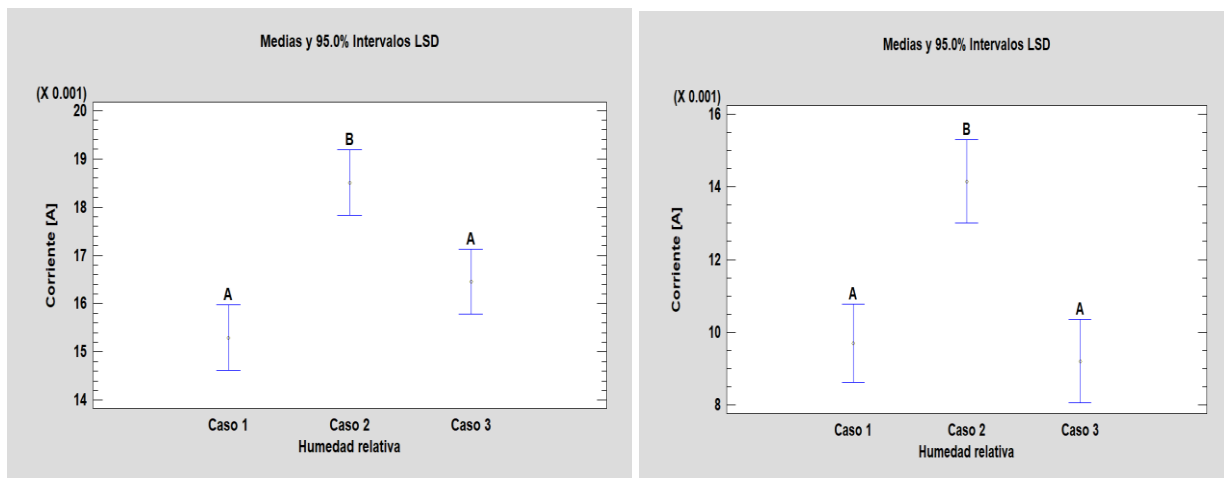


Figura 4.8. Gráfico de medias para la corriente [A] a distintas humedades relativas para el experimento 1 y 2 respectivamente (Humedad relativa: Caso 1, 2 y 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60 °C).

Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la corriente entre un experimento y otro, con un nivel del 5% de significación.

A partir de los gráficos de medias, se observa que el Experimento 1 presenta una corriente más alta en comparación con el Experimento 2, con un promedio de 0.0169 A en el Experimento 1 en frente a 0.0116 A en el Experimento 2. Sin embargo, en cuanto a la tendencia, se puede observar que la condición óptima en términos de corriente se alcanza en el Caso 2 para ambos experimentos, lo que indica que no existe una relación directamente proporcional entre la humedad relativa y la corriente. Lo que vuelve a resaltar que a medida que transcurre el tiempo la MEA se empieza a degradar.

Este comportamiento no coincide con lo observado en el voltaje, donde el óptimo corresponde al Caso 3. Esta discrepancia puede explicarse por la influencia de la resistencia a la transferencia de masa. A niveles altos de humedad, aunque el voltaje se mantenga en valores óptimos, la resistencia al flujo de los reactantes puede aumentar. Esto puede dificultar que los reactantes lleguen de una manera eficiente a las superficies de los electrodos. Este fenómeno ocurre debido al exceso de agua, que bloquea el transporte de los reactantes y, en consecuencia, reduce así el área activa para las reacciones electroquímicas. Como resultado, la corriente se ve afectada, lo que se refleja en la disminución observada en el Caso 3.

Este comportamiento evidencia la necesidad de mantener un equilibrio adecuado en los niveles de humedad para optimizar tanto el voltaje como la corriente. Por lo tanto, se recomienda ajustar la humedad en un punto intermedio entre el Caso 2 y 3 para maximizar la producción total de energía.

El estadígrafo obtenido para el voltaje a diferentes temperaturas de la celda se describe en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5. Estadígrafo para voltaje a diferentes temperaturas de la celda (Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).

Recuento	40
Promedio	0.039
Desviación estándar	0.015
Coef. de variación	38.8%
Mínimo	0.021
Máximo	0.069
Rango	0.048
Sesgo estandarizado	2.11
Curtosis estandarizada	-0.74

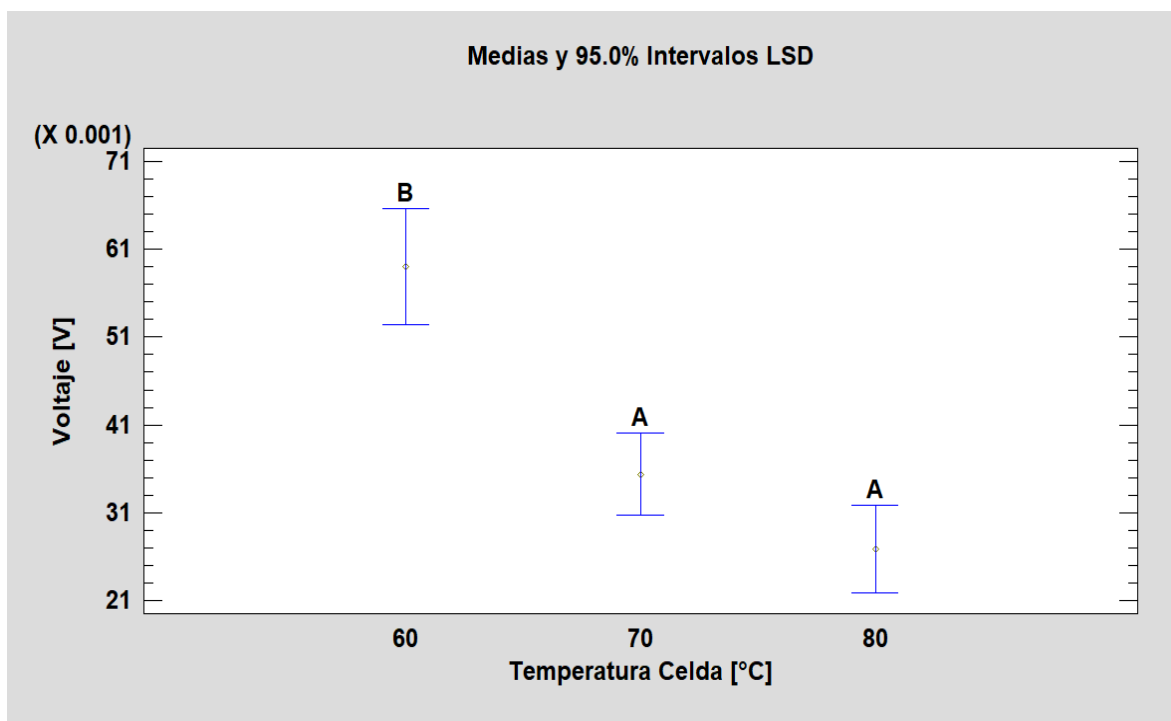


Figura 4.9. Gráfico de media para el voltaje [V] a diferentes temperaturas de la celda [°C] (Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).

Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del voltaje a distintas temperaturas de la celda, con un nivel del 5% de significación.

El gráfico de media muestra un comportamiento claro del voltaje en función de la temperatura. A 60 °C, el voltaje promedio alcanza su valor más alto (0.059 V), lo que sugiere que la celda opera de manera óptima bajo esta condición.

En contraste, a 70 °C y 80 °C, el voltaje disminuye drásticamente, lo cual indica una mayor variabilidad en los datos, posiblemente causada por inestabilidades en el funcionamiento de la celda a temperaturas más elevadas. Factores como la degradación de la MEA, que reduce el rendimiento de la celda, y la deshidratación de la membrana podrían estar contribuyendo a la disminución del voltaje. Estos resultados sugieren que, aunque la temperatura inicial de la celda de 60 °C mejora la cinética de las reacciones, temperaturas elevadas, incluso con control constante de la humedad (Caso 3), pueden perjudicar el rendimiento de la celda.

El estadígrafo obtenido para la corriente a diferentes temperaturas de la celda se describe en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6. Estadígrafo para la corriente a diferentes temperaturas de la celda (Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).

Recuento	127
Promedio	0.0092
Desviación estándar	0.0022
Coef. de variación	23.9%
Mínimo	0.0
Máximo	0.013
Rango	0.013
Sesgo estandarizado	-1.99
Curtosis estandarizada	1.72

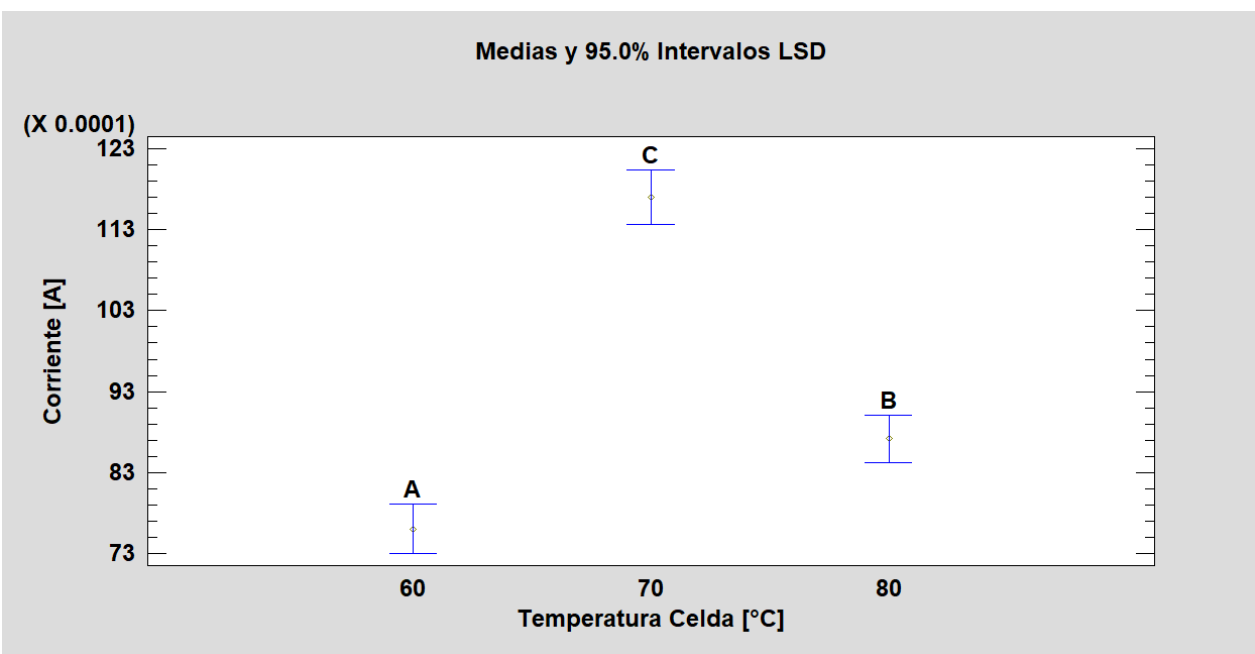


Figura 4.10. Gráfico de media para la corriente [A] a diferentes temperaturas de la celda [°C]
(Humedad relativa: Caso 3, Flujo de H_2 : 180 ml/min, O_2 : 100 ml/min, Temperatura: 60, 70 y 80 °C).

Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la corriente a distintas temperaturas de la celda, con un nivel del 5% de significación.

A partir del gráfico de medias, se puede observar que la corriente presenta un óptimo a una temperatura de celda de 70°C, lo que indica que no existe una relación proporcional entre la corriente y la temperatura de la celda.

Este comportamiento no coincide con lo observado para el voltaje, donde la condición óptima se presenta a 60 °C. Esta discrepancia puede deberse al hecho de que a 70°C la temperatura es suficientemente alta para mejorar la cinética de las reacciones electroquímicas, lo que favorece un aumento en la generación de corriente. Sin embargo, a esta temperatura, la deshidratación de la membrana se vuelve más evidente, ya que, al mantener la humedad constante (Caso 3), esto tiene un impacto negativo en el voltaje.

Por otro lado, a 80 °C, una temperatura aún más alta genera efectos negativos, ya que puede llevar a una mayor producción de vapor de agua debido a las reacciones electroquímicas. Aunque la humedad relativa se mantenga alta, el exceso de vapor puede condensarse y acumularse en los canales, obstruyendo el flujo de gases reactantes necesarios para las reacciones, lo que empieza a reducir la corriente. Además, temperaturas muy elevadas pueden llevar a la degradación de los materiales de la celda. Esto es consistente con el hecho de que la celda comercial utilizada tiene una temperatura máxima de operación especificada en 80 °C.

Mientras que la corriente depende de la capacidad de la celda para generar una reacción electroquímica a una velocidad suficientemente alta, el voltaje depende de una buena conductividad del electrolito.

Este comportamiento resalta la importancia de mantener un equilibrio adecuado en las temperaturas de la celda, ya que la temperatura afecta tanto la eficiencia de la reacción electroquímica (voltaje) como la capacidad de generar mayor corriente.

Mediante el ANOVA factorial se concluye que tanto la humedad relativa como la temperatura de la celda son variables que influyen directamente en el voltaje y corriente de la celda y por lo tanto en la eficiencia de la celda.

Al comparar las mediciones realizadas con valores teóricos de voltaje comúnmente asociados a este tipo de celdas, éste suele rondar los 0.9 V [34]. Este valor representa una eficiencia del 10.9% en términos de voltaje. Cabe señalar que el proveedor no proporciona el valor teórico específico del voltaje. El máximo voltaje registrado ocurrió a una temperatura de celda de 60 °C, con una humidificación del Caso 3.

La baja eficiencia puede atribuirse a varios factores reflejados en la espectroscopía de Raman y el análisis SEM, los cuales corroboran la degradación de la membrana debido a efectos de la deshidratación y disminución de la estabilidad interna. Asimismo, el ANOVA factorial respalda estos mismos hallazgos.

5. Conclusiones

A partir de las curvas voltaje-corriente (V-I) obtenidas, se concluye que la humidificación óptima de los gases reactivos, específicamente un 82.3 % de hidrógeno y un 78% de oxígeno permite un rendimiento superior en la celda PEMFC. Esto se debe a que adecuada hidratación de la membrana mejora su conductividad protónica y, por ende, la eficiencia electroquímica del sistema. En contraste, humedades relativas más bajas provocan la deshidratación de la membrana, reduciendo significativamente su rendimiento. Por lo tanto, se recomienda trabajar con niveles de humidificación que aseguren estabilidad y rendimiento.

En cuanto a las temperaturas de operación, se determinó que 60°C es el valor óptimo para maximizar la eficiencia de la celda. A temperaturas más altas, como 70°C y 80°C, se observaron disminuciones notables en el voltaje y la corriente generada, además de una inestabilidad en las mediciones asociada a la deshidratación de la membrana y la formación de in-homogeneidades térmicas, las cuales contribuyen a la degradación acelerada de los componentes, especialmente de la MEA.

El mantenimiento de flujos constantes de hidrógeno y oxígeno en los experimentos permitió evaluar con precisión los efectos de la temperatura de humidificación y de la celda en el desempeño del sistema. De este modo, se evidenció que las variables térmicas tienen un impacto significativo en la eficiencia electroquímica de la celda PEMFC. No obstante, al mantener constantes los flujos, no fue posible determinar si el flujo de gases influye en mayor medida que las variables térmicas en el rendimiento del sistema. Por ello, se recomienda en estudios futuros investigar variaciones en los flujos de gases para una evaluación más completa.

Los análisis realizados mediante espectroscopía Raman evidenciaron un incremento en los defectos estructurales del carbono en los electrodos después del uso de la celda, lo que impacta negativamente en su desempeño. Este resultado resalta la necesidad de optimizar materiales con mayor resistencia a la degradación térmica y química, así como estrategias para mitigar la degradación de los componentes.

De la caracterización morfológica mediante SEM, se concluye que las imágenes obtenidas muestran cambios significativos en la estructura de la membrana y los electrodos antes y después de su uso. Inicialmente, la membrana presentaba una superficie homogénea, pero tras su uso se observaron acumulaciones y defectos confirmados mediante un mapeo elemental, lo que impacta su conductividad protónica y la estabilidad estructural de los componentes.

El análisis estadístico ANOVA indicó que tanto la humedad relativa de los gases reactivos como la temperatura de la celda tienen un efecto significativo en el rendimiento. El análisis sugiere que el voltaje aumenta con la humedad, favoreciendo la conductividad iónica, pero la corriente no sigue una relación lineal, alcanzando su óptimo a niveles intermedios de humedad. La temperatura de la celda de igual manera influye, ya que el voltaje disminuye a temperaturas altas, mientras que la corriente es óptima a temperaturas intermedias. Se recomienda realizar estudios adicionales con variaciones controladas de estas variables para validar y optimizar aún más los parámetros operativos.

La integración de una celda de testeo Leancat en un banco de pruebas diseñado específicamente para esta memoria de título permitió evaluar el rendimiento de los componentes PEMFC de manera efectiva. El sistema diseñado demostró ser adecuado para generar resultados reproducibles en condiciones controladas, siendo una herramienta útil para investigación y desarrollo de celdas de combustible tipo PEMFC.

Adicionalmente, se recomienda abordar condiciones adicionales de humidificación y temperaturas de operación más cercanas a los valores óptimos identificados en esta memoria. Si bien la humidificación por burbujeo utilizada en esta memoria es efectiva para hidratar los gases reactivos, su eficiencia podría mejorarse mediante la incorporación de métodos más avanzados. También se sugiere implementar estrategias de humidificación interna, aprovechando el agua generada durante la reacción electroquímica, lo que permitiría eliminar la necesidad de humidificación externa, simplificar el sistema y reducir el consumo de energía.

Finalmente, el desarrollo de este banco de prueba constituye un avance importante para la Universidad de Concepción, ya que proporciona capacidades para la evaluación y desarrollo de tecnologías sostenibles basadas en celdas de combustible tipo PEMFC.

6. Referencias

- [1] Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Wilberforce, T., Kamil, M., Sayed, E. T., & Olabi, A. (2021). Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of The Total Environment*, 752, 141803.
- [2] Khatib, F. N., Wilberforce, T., Ijaodola, O., Ogungbemi, E., El-Hassan, Z., Durrant, A., Thompson, J., & Olabi, A. G. (2019). Material degradation of components in polymer electrolyte membrane (PEM) electrolytic cell and mitigation mechanisms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 1-14.
- [3] Source, A. M. (2024). *Fuel Cell Market Research Report Information By Component Source*. MARKET RESEARCH FUTURE. Recuperado el 09 de Enero de [https://www.marketresearchfuture.com/reports/fuel-cell-market-10961#:~:text=Fuel%20Cell%20Market%20Size%20was,period%20\(2023%20%2D%202032\)](https://www.marketresearchfuture.com/reports/fuel-cell-market-10961#:~:text=Fuel%20Cell%20Market%20Size%20was,period%20(2023%20%2D%202032))
- [4] Energía, M. d. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Recuperado el 01 de Diciembre de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- [5] Firestone. (s.f.). *Conoce las celdas de Hidrógeno: El combustible del futuro*. Firestone. Recuperado el 23 de Octubre de <https://www.firestone.com.mx/tips-firestone/tecnologia-de-llantas/conoce-las-celdas-de-hidrogeno/>
- [6] Energy, W. (s.f.). *¿Qué son las pilas de combustible?*. WTS Energy. Recuperado el 22 de Octubre de <https://www.wtsenergy.com/es/glosario/pilas-de-combustible/#:~:text=Las%20pilas%20de%20combustible%20tienen,ni%20gases%20de%20efecto%20invernadero>
- [7] DiLiCo. (s.f.). *Test benches*. DiLiCo engineering. <https://www.dilico.de/en/pruefstand.php>
- [8] Engineering, O. (s.f.). *Galgas de presión*. Recuperado el 10 de Octubre de <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-de-presion.html>
- [9] Kolstad, C. (2024). *¿Qué es un manómetro?* Tameson. Recuperado el 10 de Octubre de <https://tameson.es/pages/manometro-como-funciona>
- [10] Panalytical, M. (s.f.). *Celdas de combustible*. Malvern Panalytical. Recuperado el 10 de Octubre de <https://www.malvernpanalytical.com/es/industries/battery-and-energy-storage/fuel-cells>
- [11] Céspedes, G., & Luna, A. M. C. (2018). Efectos de la Membrana de Intercambio de Protones en el Desempeño de una Celda de Combustible H₂/O₂. *Revista Tecnología y Ciencia*(31), 123-133.
- [12] Tibaquirá, J. E., & Posner, J. D. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et technica*, 2(42).
- [13] Chen, C.-Y., Yan, W.-M., Lai, C.-N., & Su, J.-H. (2017). Heat and mass transfer of a planar membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 601-608.
- [14] Nikiforow, K., Ihonen, J., Keränen, T., Karimäki, H., & Alopaeus, V. (2014). Modeling and experimental validation of H₂ gas bubble humidifier for a 50 kW stationary PEMFC system. *International journal of hydrogen energy*, 39(18), 9768-9781.
- [15] Engineering, O. (s.f.). *What is a Cartridge Heater and how does it work?*. Omega Engineering. Recuperado el 10 de Octubre de <https://www.omega.com/en-us/resources/cartridge-heaters#:~:text=A%20cartridge%20heater%20consists%20of,inside%20metal%20part%20requiring%20heat>

- [16] Chromalox. (s.f.). *Cartridge Heaters & Insertion Heaters*. Chromalox. <https://www.chromalox.com/en/products-and-technologies/component-technologies/cartridge-and-insertion-heaters>
- [17] Engineering., O. (s.f.). *What is a type K Thermocouple?*. Omega Engineering. Recuperado el 10 de Octubre de <https://www.omega.com/en-us/resources/k-type-thermocouples>
- [18] Arbelaez, O. G. (s.f.). *Termocupla tipo K, lo que necesitas saber*. Medición y Control. Recuperado el 28 de Octubre de <https://medicionycontrol.com.co/termocupla-tipo-k/#termocupla-tipo-k>
- [19] Chávez-Alfaro, S. E., & Guerrero, A. H. (2015). ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UNA PEMFC MODELADA TRIDIMENSIONALMENTE. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 1(1), 303-308.
- [20] Salam, M. A., Habib, M. S., Ahmed, K., Uddin, M. S., Hossain, T., Papri, N., & Arefin, P. (2020). Effect of temperature on the performance factors and durability of proton exchange membrane of hydrogen fuel cell: A narrative review. *Material Science Research India (Online)*, 17(2), 179-191.
- [21] Berg, P., Promislow, K., Pierre, J. S., Stumper, J., & Wetton, B. (2004). Water management in PEM fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 151(3), A341.
- [22] nanoScience. (s.f.). *What is Scanning Electron Microscopy?*. nanoScience. Recuperado el 30 de Diciembre de <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>
- [23] Kalita, D., Konwar, P., Sahu, D., Baruah, S., & Barua, S. (2023). Fluoropolymer nanocomposites: introduction, fundamental properties, and high-performance applications. In *Advanced Fluoropolymer Nanocomposites* (pp. 79-120). Elsevier.
- [24] Ibsen. (s.f.). *What is Raman Spectroscopy: Uses and applications*. Ibsen. Recuperado el 31 de Diciembre de <https://ibsen.com/technologies/what-is-raman-spectroscopy/>
- [25] Wang, L., Yao, J., Pei, Y., Zhu, W., Che, Z., Zhang, J., Yin, Y., & Guiver, M. D. (2024). Patterned design of porous carbon materials as microporous layers to enhance fuel cell performance over a wide humidity range. *Journal of Power Sources*, 616, 235136.
- [26] Choi, Y., Wang, G., & Yau, S.-T. (2006). Electronic composite of sulfonated tetrafluorethylene copolymer with potassium ferricyanide exhibiting room-temperature negative differential resistance. *Applied physics letters*, 89(23).
- [27] Peighambaroust, S. J., Rowshanzamir, S., & Amjadi, M. (2010). Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International journal of hydrogen energy*, 35(17), 9349-9384.
- [28] Artyushkova, K., Pylypenko, S., Dowlapalli, M., & Atanassov, P. (2012). Structure-to-property relationships in fuel cell catalyst supports: Correlation of surface chemistry and morphology with oxidation resistance of carbon blacks. *Journal of Power Sources*, 214, 303-313.
- [29] Stonehart, P. (1984). Carbon substrates for phosphoric acid fuel cell cathodes. *Carbon*, 22(4-5), 423-431.
- [30] McCreery, R. L. (2005). *Raman spectroscopy for chemical analysis*. John Wiley & Sons.
- [31] Garcia Orozco, I., MARTINEZ GONZALEZ, J., Reyes Contreras, D., & VIGUERAS SANTIAGO, E. Determinación del tamaño de cristalito y densidad de defectos para grafito recuperado de pilas nuevas y usadas Zn-C.
- [32] Wróblewska, A., Dużyńska, A., Judek, J., Stobiński, L., Żerańska, K., Gertych, A. P., & Zdrojek, M. (2017). Statistical analysis of the reduction process of graphene oxide probed by Raman spectroscopy mapping. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 29(47), 475201.

- [33] Madhav, D., Wang, J., Keloth, R., Mus, J., Buysschaert, F., & Vandeginste, V. (2024). A Review of Proton Exchange Membrane Degradation Pathways, Mechanisms, and Mitigation Strategies in a Fuel Cell. *Energies*, 17(5), 998.
- [34] Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-Coll, D., Ruiz-Morales, J. C., Marrero-López, D., Núñez, P., Ballesteros, B., Canales-Vazquez, J., Borrós, S., & Gómez-Romero, P. (2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica. *Afinidad*, 68(554).
- [35] Ferrovial. (s.f.). ¿Qué es una pila de combustible?. Ferrovial. Recuperado el 23 de Octubre de <https://www.ferrovial.com/es/stem/pila-de-combustible/>
- [36] Tanç, B., Arat, H. T., Baltacioğlu, E., & Aydın, K. (2019). Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles. *International journal of hydrogen energy*, 44(20), 10120-10128.
- [37] 3M. (s.f.). *Fundamentos de las celdas de combustible de hidrógeno*. 3M. Recuperado el 01 de octubre de https://www.3mchile.cl/3M/es_CL/hidrogeno/aplicaciones/celdas-de-combustible-de-hidrogeno/#:~:text=Las%20celdas%20de%20combustible%20de%20hidr%C3%B3geno%20funcionan%20como%20los%20electrolizadores,con%20ox%C3%ADgeno%20para%20formar%20agua.
- [38] Kunusch, C., Puleston, P., & Mayosky, M. (2012). *Sliding-Mode control of PEM fuel cells*. Springer Science & Business Media.
- [39] Barreras, F., & Lozano, A. (2012). Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM. *Año internacional de la energía sostenible para todos*, 19.
- [40] Stefanelli, E. J. (s.f.). *Celda de Combustible PEMFC energía eléctrica a partir de hidrógeno*. Recuperado el 23 de Octubre de <https://www.stefanelli.eng.br/es/pemfc-energia-electrica-hidrogeno/>
- [41] CAPÍTULO 3. LAS PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA O DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEMFC). (s.f.). Universidad de Sevilla. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3977/fichero/Cap%C3%ADtulo+3.pdf>
- [42] Fan, L., Gao, J., Lu, Y., Shen, W., & Zhou, S. (2023). Analysis of the Influence of Component Degradation on Different Degradation Indexes of PEMFC. *Energies*, 16(23), 7806.
- [43] ZSW. (s.f.). *Fuel cell testing & test benches*. ZSW. Recuperado el 25 de Octubre de <https://www.zsw-bw.de/en/research/fuel-cells/topics/fuel-cell-tests-and-test-benches.html>
- [44] Cea. (2019). *New test bench for high-power fuel cells*. Cea. https://www.cea-tech.fr/cea-tech/english/Pages/ec_2019/new-test-bench-for-high-power-fuel-cells.aspx
- [45] Fraunhofer. (s.f.). *Characterization of components for hydrogen technology*. Fraunhofer. Recuperado el 25 de Octubre de <https://www.ise.fraunhofer.de/en/rd-infrastructure/center/center-for-fuel-cells-electrolysis-and-synthetic-fuel.html>
- [46] Valdez, S. N. C., & de la Cruz Rodríguez, C. (2024). Diseño de banco de ensayos para módulos de pilas PEM. *Jornadas de Automática*(45).
- [47] RWTH. (2024). *Fuel Cell Test Bench*. RWTH. Recuperado el 30 de Octubre de <https://www.tme.rwth-aachen.de/cms/tme/forschung/forschungseinrichtungen/echtzeitvernetztes-prueflabor/~bahqxt/brennstoffzellenpruefstand/?lidx=1>
- [48] cellcentric. (2023). *Research for sustainability: cellcentric donates fuel cell test bench to Esslingen University of Applied Sciences*. cellcentric. Recuperado el 30 de Octubre de <https://www.cellcentric.net/en-us/news/research-for-sustainability>

- [49] THA. (s.f.). *Fuel cell test bench*. THA. Recuperado el 30 de Octubre de <https://www.tha.de/en/Mechanical-and-Process-Engineering/Laboratory-for-Energy-and-Process-Engineering.html>
- [50] Engineering, M. (s.f.). *Fuel cell control laboratory*. Michigan engineering. Recuperado el 30 de Octubre de <https://fuelcell.engin.umich.edu/>
- [51] Spiege, C. (2016). *INTRODUCTION TO FUEL CELL APPLICATIONS*. Fuel Cell Store. Recuperado el 09 de Enero de <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/intro-fuel-cell-applications>
- [52] Energía, M. d. (2022). *Especificaciones de la calidad del hidrógeno como combustible y estado del sistema de certificación de productos de gas natural.*: Ministerio de Energía de Chile. Recuperado de https://4echile.cl/wp-content/uploads/2022/01/Calidad-H2-y-sistema-certificacion-productos-GN_publico.pdf
- [53] Energía, M. d. (s.f.). *Regulación y políticas públicas*. H2 Chile. Recuperado el 03 de Enero de <https://h2chile.cl/regulacion-y-politicas-publicas/>
- [54] Aalborg Instruments & Controls, I. (2022). *Operating Manual: GFC Mass Flow Controller*. Aalborg. https://www.aalborg.com/images/file_to_download/A_GFC%20Manual%20TD9709M%20Rev%20U.pdf

7. Anexos

7.1. Anexo 1: Estado del Arte

7.1.1. Tipos y Funcionamiento de las Celdas de Combustible

Existen varios tipos de celdas de combustible, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones.

Las celdas de combustible alcalinas (AFC), son una de las tecnologías más antiguas y se destacan por su bajo costo. Estas celdas fueron utilizadas en misiones espaciales como las del programa Apollo. Por otro lado, las celdas de óxido sólido (SOFC) operan a altas temperaturas y son adecuadas para la generación de energía en sectores residenciales y comerciales, debido a su alta eficiencia térmica [35].

En la misma categoría de alta temperatura se encuentran las celdas de carbonato fundido (MCFC) y las celdas de ácido fosfórico (PAFC). Ambas son utilizadas principalmente en las aplicaciones estacionarias de generación de energía, donde la estabilidad y capacidad de operar de manera continua son esenciales. Finalmente, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) destacan por su capacidad de operar a bajas temperaturas, su alta eficiencia y su versatilidad, lo que las hace ideales para aplicaciones en transporte y generación de la energía portátil [35]. En la figura 7.1 ilustra el funcionamiento y las condiciones de operación de todos los tipos de celdas mencionados [36].

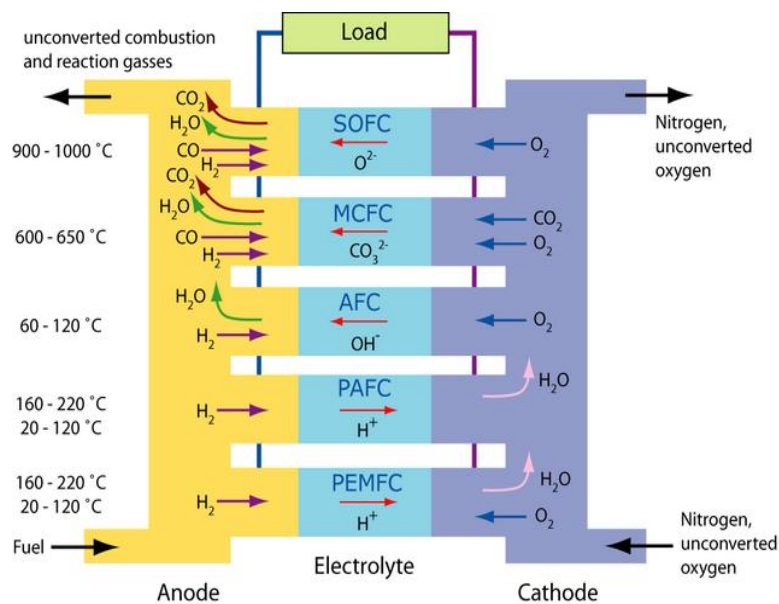
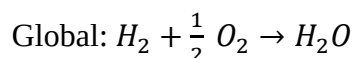
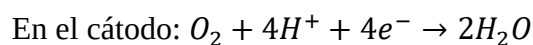
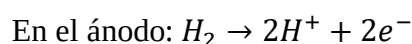


Figura 7.1. Funcionamiento y condiciones de operación de los diferentes tipos de celdas de combustible.

En el caso de las celdas PEMFC, su funcionamiento se basa en un proceso electroquímico en el que los iones de hidrógeno (H^+) se combinan con los iones de oxígeno (O^{2-}) para formar agua, generando electricidad. En el ánodo, el hidrógeno molecular (H_2) se oxida, liberando protones (H^+) y electrones (e^-). En este proceso los iones de hidrógeno (protones) atraviesan la membrana hacia el cátodo, mientras que los electrones se dirigen al cátodo a través de un circuito externo, generando electricidad. En el cátodo, los protones (H^+) se combinan con los electrones y los iones de oxígeno para formar agua, completando así el ciclo electroquímico [37].

En resumen, las reacciones químicas que se producen son las siguientes:



7.2. Composición y diseño de las celdas de combustible PEMFC

Las celdas PEMFC destacan por su alta complejidad tecnológica, lo que hace que su eficiencia y rendimiento estén estrechamente relacionados con sus componentes. A continuación, se describen los elementos claves y su importancia en el óptimo funcionamiento de estas celdas.

Electrolito: Consiste principalmente de una membrana polimérica que debe tener una alta conductividad protónica para permitir el transporte eficiente de protones desde el ánodo al cátodo, mientras actúa como una barrera mecánica para evitar la mezcla de los gases reactivos (hidrógeno y oxígeno) [38].

Las membranas estándar están hechas de ácido perfluorosulfónico (PFSA), un polímero que combina tetrafluoroetileno (TFE) y monómeros perfluorados sulfonados. La membrana comercial más ocupada es, Nafion®, desarrollada por DuPont, que utiliza éter vinílico de perfluoro-2- (2-fluorosulfonietóxi) propilo (PSEPVE) para lograr propiedades necesarias de conductividad y estabilidad [38].

Las membranas en las celdas PEMFC no solo deben ser conductoras de protones, sino también químicamente estables en el rango de operación de la celda. Además, es fundamental que controlen el contenido de agua, ya que la cantidad de agua presente en la membrana afecta directamente su capacidad para transportar protones. Este equilibrio de agua se ve influenciado por varios procesos,

como la generación de agua en el cátodo, el arrastre electro osmótico, la difusión y la permeabilidad al agua debido a la diferencia de presión entre el ánodo y el cátodo [38].

Un electrolito ideal debería ser impermeable a los gases reactivos, para evitar la mezcla de gases dentro de la celda. Sin embargo, debido a su estructura porosa, contenido de agua y la solubilidad del hidrógeno y oxígeno en el agua, pequeñas cantidades de gases reactantes pueden atravesar la membrana [38].

Electrodos: Son láminas delgadas y porosas que separan las capas difusoras de la membrana que pueden ser tanto anódicas como catódicas. Estas láminas actúan como catalizadores, proporcionando una superficie de alta área específica donde se depositan partículas de catalizador de forma homogénea. Estas partículas son los sitios activos donde ocurren las reacciones electroquímicas. La eficiencia del electrodo depende de la conductividad eléctrica del soporte carbonoso, su porosidad, estabilidad y del número y actividad de los sitios catalíticos, que deben ser capaces de minimizar las pérdidas energéticas asociadas a las reacciones electroquímicas y al transporte de masa [39].

Así mismo, debido a la baja temperatura de operación de una celda PEMFC (menos de 100°C), es necesario utilizar catalizadores para facilitar las reacciones electroquímicas. Estos catalizadores, principalmente metales nobles como platino o rutenio, promueven la adsorción del hidrógeno en el ánodo, rompiendo sus enlaces y liberando protones. Estos protones migran a través de la membrana hacia el cátodo, donde combinan con el oxígeno y los electrones para formar agua. Sin la presencia de catalizadores, estas reacciones serían extremadamente lentas, limitando significativamente la producción de energía eléctrica [40].

Capa difusora de gas (GDL): Es una capa porosa, construida típicamente de papel de carbón, que cumple una doble función: por una parte, asegura que los gases reactantes se difundan homogéneamente a la capa del catalizador. Esto es fundamental si se quiere maximizar el aprovechamiento de las partículas de catalización, normalmente platino, de alto coste. Debe, por tanto, maximizarse en todo momento la interfase de reactantes y electrodos. En segundo lugar, el material debe ser buen conductor eléctrico para transportar los electrones hacia y desde la capa del catalizador, minimizando las pérdidas óhmicas. La capa de difusión de gas también colabora en la gestión del agua en la pila, permitiendo mantener la hidratación de la membrana [41].

Normalmente, estos tres elementos (membranas poliméricas, las dos capas catalíticas (electrodos) y las dos capas difusoras) forman una única unidad llamada “sistema membrana-electrodo” (MEA según la literatura inglesa) [40]

Placas bipolares: Elementos metálicos o compuestos que conforman el esqueleto estructural de una celda PEMFC. Estas placas actúan como separadores entre celdas, cuando se agrupan multitud de ellas en serie para conseguir altos voltajes. Además de conducir electrones, las placas bipolares distribuyen los gases reactivos (hidrógeno y oxígeno) a través de una red de canales, separan las reacciones electroquímicas que ocurren en cada celda y evacúan los productos de reacción (agua y calor). Generalmente fabricadas de grafito, las placas bipolares son habitualmente simétricas para facilitar un volumen compacto en la pila, ya que un solo agrupamiento puede consistir en decenas de celdas [41].

7.3. Mecanismos de degradación en celdas PEMFC

Las celdas PEMFC, enfrenta el desafío de la degradación de sus componentes con el tiempo. Esta degradación incluye la membrana, la cual, puede ocurrir a través de diversas vías, siendo las principales la degradación química, mecánica y térmica. En el caso de la degradación química, esta puede ser inducida por contaminantes en el combustible y las corrientes de aire, así como por ataques radicales que afectan la estructura del polímero de la membrana. Uno de los principales problemas de este tipo de degradación es el envenenamiento por metales, proveniente de impurezas en el combustible o en las fuentes de humidificación, así como de la corrosión de las placas bipolares metálicas. Los iones metálicos pueden afectar el rendimiento de las membranas de dos maneras. La primera es que una cantidad significativa de sitios activos están ocupados por cationes no deseados durante el funcionamiento de la celda de combustible debido a que varios cationes metálicos tienen una afinidad más fuerte con los grupos de ácido sulfónico de las membranas que H^+ , lo que afecta negativamente la conductividad iónica de la membrana, la hidratación y la tasa de transferencia de H^+ . El segundo efecto de los contaminantes de iones metálicos es la catálisis de la reacción de formación de radicales [42].

Algunas impurezas de iones metálicos comunes que pueden originarse a partir del agua en el humidificador, corrientes de combustibles, componentes de aleación de metal o catalizadores de aleación del sistema de celda de combustible incluyen Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} y otros [42].

Además de la degradación de membranas, ocurre la degradación en las placas bipolares (BP), la capa catalítica (CL) y la capa de difusión de gas (GDL) que también están sujetos a diversas formas de desgaste. En el caso de la capa catalítica, los principales mecanismos de degradación incluyen la maduración de Ostwald y la migración y coalescencia de partículas, donde la sinterización de la capa catalíticas ocurre a lo largo de toda la vida útil de la celda, y la velocidad de sinterización del platino está relacionada con las condiciones de operación del vehículo. La degradación de la capa catalítica incluye la corrosión del platino, la corrosión del soporte de carbono y la corrosión del ionómero. Los índices de degradación de la capa catalítica incluyen el tamaño de las partículas de platino, la pérdida del área superficial electroquímica (ECSA) y la del soporte de carbono [42].

En cuanto a la degradación de la capa de difusión de gas, los materiales son los mismos o similares a los del soporte de la capa catalítica, por lo tanto, los mecanismos de degradación de la capa catalítica también son aplicables a la capa de difusión de gas. La investigación sobre la degradación de este componente rara vez se refiere a los componentes del MEA debido a la lenta tasa de degradación, de igual manera, la capa de difusión de gas también se ve afectada por problemas de gestión térmica y de humedad. Un exceso de humedad a altas densidades de corriente puede causar inundaciones, lo que resulta en un suministro insuficiente de reactivos en las áreas locales. Además, una alta temperatura puede aumentar la tasa de oxidación del soporte de carbono. Los índices de degradación de la capa de difusión de gas incluyen la pérdida de hidrofobicidad, la pérdida de contenido de agua y la pérdida de masa de carbono [42].

Por otro lado, la degradación de las placas bipolares también representa un desafío importante, ya que la corrosión y la oxidación de los materiales metálicos afectan la conductividad y pueden provocar la pérdida de contacto eléctrico entre los componentes de la celda. Otra razón de la degradación de las placas bipolares es que puede formarse o fracturarse bajo fuerza de compresión, que se aplica para sellar completamente la PEMFC y garantizar un buen contacto eléctrico entre los componentes del sistema [42].

7.4. Bancos de Pruebas de Celdas PEMFC

Los bancos de prueba se pueden subdividir en equipos comerciales o equipos desarrollados en laboratorio. Dentro de los equipos de pruebas avanzados, los sistemas comerciales juegan un papel clave en la evaluación de las celdas de combustibles, tales como, los ofrecidos por ZSW, ya que son esenciales para obtener datos precisos sobre el rendimiento de las celdas en distintas condiciones de operación. Estos sistemas permiten monitorear y controlar variables como la temperatura, la presión,

y la carga aplicada, proporcionando información crucial para el desarrollo de nuevas tecnologías en celdas de combustible. Además, son capaces de realizar pruebas a largo plazo, simulando las condiciones a las que las celdas estarán expuestas en aplicaciones reales [43].

Una de las principales ventajas de estos bancos de prueba comerciales es su capacidad para replicar condiciones reales de operación, lo que los convierte en herramientas indispensables en la investigación de celdas PEMFC, permitiendo avanzar en la compresión y mejora de sus componentes. Estos bancos asimismo son fundamentales para estudiar la degradación de los materiales en condiciones de estrés, como ciclos de carga, lo que ayuda a identificar áreas críticas para mejorar la durabilidad y eficiencia de las celdas de combustible [43].

Como un ejemplo destacable, el CEA Liten en Francia, tiene más de 30 bancos de pruebas dedicados a la activación y caracterización detallada de las celdas de combustible y recientemente han añadido un nuevo banco de pruebas para celdas de combustibles con una capacidad que varía entre 10 kW y 100kW a su plataforma de pruebas de baja temperatura, respondiendo a la creciente demanda de socios de investigación y desarrollo industrial. El banco más reciente de esta empresa incluye un sistema de reciclaje de hidrógeno y la disipación eléctrica que reintegra energía a la red, además de un circuito de refrigeración para absorber la energía generada. Este equipo también es versátil, ya que se puede utilizar para el empaquetado de celdas de combustible y para la caracterización electroquímica, generando curvas de polarización y mediciones de impedancia, lo cual es útil para monitorear la actividad, el envejecimiento y la degradación de celdas individuales [44].

Este tipo de banco de prueba se ve en la figura 7.2 que corresponde a la empresa CEA Liten



Figura 7.2. Banco de pruebas de celdas PEMFC de la empresa CEA Liten

Por otra parte, se tienen los equipos de prueba hechos en laboratorio que son una herramienta fundamental para evaluar la funcionalidad de las celdas de combustible en condiciones controladas. Estos sistemas permiten la caracterización in situ de los de Ensamblajes de Membrana y Electrodo (MEA) bajo diversas condiciones operativas, como temperatura, humedad y flujo de gas [45]. En Fraunhofer ISE, por ejemplo, se emplean métodos electroquímicos como la espectroscopia de impedancia y curvas de polarización para analizar el rendimiento y la degradación de los componentes, además de estudiar los efectos de contaminación en los suministros de hidrógeno y aire simulando condiciones operativas del mundo real [45].

Este equipo también ha desarrollado celdas de prueba segmentadas a lo largo del canal en áreas más pequeñas para monitorear el comportamiento a lo largo de toda la longitud del canal, lo que permite monitorear gradientes de gas, humedad y temperatura para identificar ineficiencias locales y apoyar el desarrollo de diseños optimizados. Los sistemas de Fraunhofer ISE también están equipados para protocolos de prueba dinámica, lo que permite investigaciones a largo plazo bajo condiciones operativas fluctuantes [45].

Por otro lado, existen múltiples tipos de bancos de prueba destinados a la experimentación con prototipos de celdas de combustible PEMFC a nivel de stack. Algunos de estos bancos están diseñados para operar a bajas potencias como el desarrollado por el Instituto de Carboquímica (ICB), que permite realizar pruebas en celdas de hasta 50kW, o el banco modular en desarrollo por el Laboratorio de

investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) que permite ensayar celdas de baja temperatura con una potencia máxima de 50kW [46].

Además, existen bancos de prueba diseñados específicamente para módulos y sistemas completos de celdas PEMFC. Estos módulos incluyen el stack junto con todos los elementos del balance de planta, además de incorporar sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), que permite una gestión integral [46].

Igualmente, en la misma línea en el Centro Nacional de Experimentación de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible (CNH₂) en los últimos años han adquirido una notable experiencia en el diseño de bancos de pruebas para módulos de celdas PEMFC, con capacidades que varían desde 100kW hasta 1MW, con capacidad para validar diseños en condiciones reales de operación y transferir conocimiento para su aplicación industrial [46].

En cuanto a las universidades, varias han desarrollado diferentes infraestructuras de bancos de prueba para satisfacer las demandas de investigación experimental en este campo. La Universidad RWTH, a través de su Centro de Propulsión Movil (CMP), opera bancos de prueba de hasta 500 kW, orientados a aplicaciones de alta potencia, como trenes y camiones, además de contar con un banco adicional de 30 kW para pruebas individuales de celdas de combustible [47].

La Universidad de Ciencias Aplicadas de Esslingen, gracias a una donación de cellcentric, cuenta con un banco de pruebas en el Instituto de Tecnología Energética Sostenible y Movilidad (INEM) que apoya tanto a la docencia como la investigación de celdas de combustible [48].

Por otro lado, la Universidad Technische Hochschule Augsburg (THA), un banco de pruebas operativo desde 2009 permite a los estudiantes aprender sobre celdas de combustibles y su aplicación en energías renovables [49].

Finalmente, la Universidad de Michigan tiene dos instalaciones de prueba: una pila de 24 celdas y un banco de pruebas de una sola celda, que facilitan estudios detallados en su laboratorio de hidrógeno PEMFC [50].

Se puede ver en la figura 7.3 el banco de pruebas de la Universidad de Michigan.

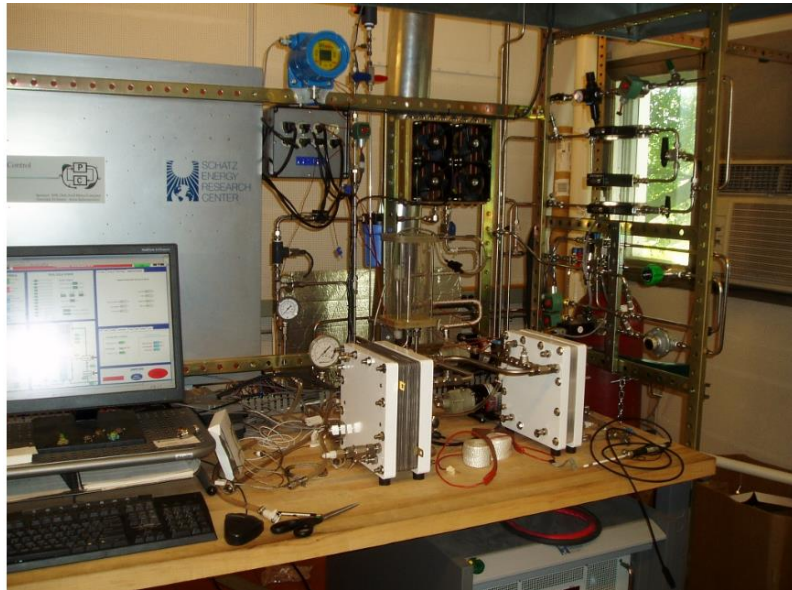


Figura 7.3. Banco de prueba de una celda PEMFC de la Universidad de Michigan.

7.5. Aplicaciones actuales y potenciales de las PEMFC en la industria

Las celdas de combustible tipo PEMFC han ganado una significativa relevancia en diversas industrias debido a su alta eficiencia y versatilidad. A continuación, se presentan las aplicaciones actuales y potenciales de esta tecnología.

Aplicaciones de transporte: Se pueden utilizar en automóviles, autobuses, vehículos utilitarios, scooter y bicicletas. Se han creado muchos vehículos de demostración de pilas de combustible para cada uno de estos tipos de vehículos [51].

Los fabricantes de automóviles están interesados en la tecnología de pilas de combustible porque es una tecnología de “próxima generación” que podría tener combustible reproducido a partir de fuentes locales y emisiones bajas o nulas [51].

Por otro lado, la diferencia entre los autobuses y los automóviles son los requisitos de potencia, la disponibilidad de espacio, el régimen de funcionamiento y los lugares de reabastecimiento de combustible. Con respecto a los vehículos utilitarios estos ofrecen un menor costo operativo, mantenimiento reducido, menor tiempo de inactividad y autonomía extendida. Los scooters y bicicletas presentan problemas con el almacenamiento del hidrógeno; por ello; durante la última década se han investigado los hidruros metálicos y los electrolizadores [51].

Energía portátil: Las celdas de combustible portátiles son fuentes de energía portátiles, ligeras y duraderas que prologan la cantidad de tiempo que se puede utilizar un dispositivo sin recargarlo. Las baterías recargables no son prácticas para ciertas aplicaciones electrónicas portátiles y militares porque pueden ser pesadas y no cumplir con los requisitos de energía. Algunas aplicaciones de este tipo de celdas incluyen las computadoras portátiles, teléfonos celulares, herramientas eléctricas, equipo militar, cargadores en batería, sensores no atendidos y vehículos aéreos y submarinos no tripulados [51].

Aplicaciones de energía estacionaria: Este tipo de celdas de combustible se pueden utilizar como fuente de energía primaria. A menudo se utilizan para suministrar energía a casas que no están conectadas a la red o para proporcionar energía complementaria [51].

En los sistemas de energías híbridos, las celdas de combustible se pueden conectar a sistemas fotovoltaicos, baterías, condensadores o turbinas eólicas, y así proporcionar energía primaria o secundaria. Las celdas de combustible también se pueden utilizar como generador de energía de respaldo o cuando la red eléctrica falla [51].

Energía de respaldo: Los sistemas de energía de respaldo proporcionan energía cuando se interrumpe la fuente de energía principal. Las celdas de combustible que se utilizan como fuente de energía de respaldo vienen en muchos tamaños y tipos y, por lo general, utilizan hidrógeno como combustible. Las celdas de combustible de respaldo se pueden comercializar más rápidamente que otras celdas de combustible porque no dependen de la implementación de una infraestructura de hidrógeno. Algunas aplicaciones de energía de respaldo incluyen sistemas informáticos, instalaciones de fabricación, hogares y subestaciones de servicios públicos [51].

7.6. Normativas y estándares relevantes para las celdas PEMFC

Se tienen varias normativas y estándares relevantes internacionales para este tipo de celdas, algunas de ellas son [52]:

ISO 14687-3: Establece requisitos de calidad para el hidrógeno combustible usado en aplicaciones móviles y estacionarias, tal como, las celdas PEMFC.

EN 17124: Especifica la calidad de hidrógeno combustible para los vehículos de carretera con PEMFC y cómo garantizar su cumplimiento en el dispensado.

SAE J2719: Norma los requerimientos de calidad del hidrógeno combustible para vehículos comerciales de celdas tipo PEMFC.

ISO 16111: Define los requisitos aplicables al material, diseño, construcción y prueba de sistemas de almacenamiento de gas de hidrógeno transportables.

ISO 19880-8: Garantiza el riesgo de impacto de las impurezas del hidrógeno en las celdas combustible.

IEC 62282: Esta norma cubre los sistemas de energía de micropilas de combustible, las unidades de energía de micropilas de combustible y los cartuchos de combustible que utilizan hidrógeno producido a partir de compuestos reactivos al agua.

ISO 23273: Especifica los requisitos esenciales para los vehículos de celdas de combustible donde se utiliza hidrógeno comprimido como combustible.

En el caso de Chile, también se cuenta con regulación en torno al hidrógeno y sus usos, aunque en menor medida comparado a las normativas iniciales, debido a que aún se encuentra en etapas iniciales [53]:

Ley 21.305 de Eficiencia Energética: Incorpora al hidrógeno y combustibles a partir del hidrógeno, y demás fuentes y vectores energéticos como competencias del Ministerio de Energía.

Norma Chile NCh3746:2022: Abarca los generadores de hidrógeno que utilizan electrólisis de agua- Aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. Define los requisitos de construcción, seguridad y desempeño de los aparatos de generación de gas hidrógeno, modulares o montados en fábrica, denominados generadores de hidrógeno.

Decreto 13/2024: Reglamento de seguridad de instalaciones de hidrógeno donde se definen los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones de hidrógeno- desde sus etapas de diseño, construcción, operación y mantenimiento-, en las cuales se efectúen actividades como la producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia y consumo de hidrógeno.

Decreto 122/1991: Fija requisitos dimensionales y funcionales a vehículos que presten servicios de locomoción colectiva urbana.

Anexo 2: Componentes y Funcionamiento del Sistema de Gestión Eléctrica

Componentes principales:

- **Tablero Metálico:** El sistema está montado en un tablero de 500 x 400 x 200 mm, que contiene todos los componentes eléctricos esenciales para controlar y monitorear las temperaturas en el ánodo y el cátodo de la celda PEMFC.
- **Controladores de Temperatura:** El tablero está equipado con dos controladores de temperatura, uno para el ánodo y el otro para el cátodo, con interfaces de comunicación RS485 que permiten la integración con otros sistemas, como un PLC. Estos controladores permiten establecer un setpoint (SV) de temperatura deseado, el cual puede ser modificado a través de un teclado de membrana en el panel frontal del controlador.
- **Indicadores de Temperatura:** Dos indicadores están dedicados a monitorear la temperatura del hidrógeno y del oxígeno respectivamente, proporcionando una visualización continua de las lecturas en tiempo real.
- **Control y Alimentación de Calentadores de tipo cartucho:** Los calentadores de tipo cartucho del ánodo y cátodo son gestionados por un relé comandado por los controladores de temperatura, regula el encendido y apagado de los calentadores de tipo cartucho en el ánodo y el cátodo. Este relé actúa según las instrucciones de los controladores, que supervisan la temperatura para garantizar que se mantenga dentro de los valores deseados. La alimentación eléctrica de estos calentadores de tipo cartucho se realiza mediante una fuente conmutada, que convierte 220 VAC a 28 VDC, conectándolos directamente al tablero para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente.
- **Termocuplas:** Los controladores de temperatura reciben datos a través de termocuplas tipo K conectados mediante enchufes mini en el panel, asegurando un monitoreo preciso y constante de la temperatura.

Funcionamiento del Sistema

1. **Energización del Sistema:** Se energiza conectando el tablero a la fuente de alimentación y activando un interruptor, lo que enciende los controladores y los indicadores de temperatura.
2. **Conexión de Termocuplas:** Las termocuplas se conectan a los puertos correspondientes en el tablero para proporcionar lecturas precisas en la temperatura.
3. **Seteo de la Temperatura:** El usuario ajusta la temperatura deseada en los controladores utilizando el teclado de membrana. Después de seleccionar la temperatura, se confirma

presionando el botón “SET”, y el controlador envía una señal para activar el relé que controla los calentadores de tipo cartucho.

4. Monitoreo de Temperatura: Aunque no participan en el control directo, los indicadores muestran continuamente las temperaturas del hidrógeno y oxígeno, permitiendo un monitoreo continuo durante las operaciones.

Flexibilidad del Sistema

El tablero tiene capacidad de expansión, permitiendo la adición de más dispositivos para el control de otras variables como presión o humedad. Además, las borneras adicionales permiten la conexión de hasta cinco dispositivos adicionales que pueden integrarse a un PLC mediante la interfaz RS485, facilitando la futura escalabilidad del sistema

Anexo 3: Información Técnica Adicional sobre el Controlador de Flujo GFC 17

Las especificaciones se encuentran en el manual del controlador GFC 17 según Aalborg [54]:

Anexo 3.1: Especificaciones Técnicas

- Construcción: Fabricado en metal rígido, lo que proporciona resistencia y durabilidad en ambientes de trabajos exigentes.
- Presión Máxima: Capacidad para operar hasta 1000 psig (70 bar), adecuado para aplicaciones que requieren altas presiones de gas.
- Integridad de Fugas: Garantiza una integridad de fuga de $1 \cdot 10^{-9}$ de helio, asegurando que no haya pérdidas de gas durante la operación, lo que es crítico para la seguridad y eficiencia del sistema.
- Certificación: Certificación rastreable por NIST, lo que garantiza la precisión y fiabilidad de las mediciones, asegurando que el dispositivo cumple con estándares nacionales e internacionales.
- Pantalla: Modulo de lectura LED incorporado, tiltable hasta 90 grados, permitiendo una fácil visualización en diversas posiciones y condiciones de instalación.
- Señales de Salida: Proporciona señales de 0-5 Vdc y 4-20 mA, que son estándares en la industria para la transmisión de datos de flujo y permiten una integración fácil con sistemas de monitoreo y control.

- Opciones de Visualización: Se puede configurar para mostrar en unidades de ingeniería (como L/min) o como porcentaje de 0 a 100%, adaptándose a las necesidades del usuario.
- Opción de Totalizador TIO: Incluye una opción para totalizar flujos, permitiendo un registro acumulativo de la cantidad de gas que ha pasado a través del sistema.

Anexo 3.2. Instrucciones de Ajuste de la Válvula

- Ajuste de Válvula: La válvula debe ajustarse para cerrarse completamente en modo purga. Se aplica una presión de entrada de 5 psig, y si ocurre un pequeño flujo, se ajusta el tornillo en la parte superior de la válvula solenoide hasta que el flujo se detenga. Esto es crucial para garantizar que no haya alguna fuga de gas cuando el sistema está en modo de purga.
- Ajuste de Flujo a Escala Completa: Con el regulador de flujo completamente abierto y la presión de entrada aumentada a 20 psig, se establece un punto de referencia de +5.00 Vdc para el flujo a plena escala. Este ajuste asegura que el sistema esté calibrado para alcanzar su máxima capacidad de flujo.
- Ajuste de Flujo a Diferentes Porcentajes: Se realizan ajustes utilizando los potenciómetros para controlar el flujo a 10%, 25%, 50%, 75% y 100% de la escala completa, garantizando que el flujo esté dentro de $\pm 0.75\%$ de la escala completa. Esta flexibilidad permite una operación precisa y adaptable a diferentes requerimientos de proceso.

Anexo 3.3. Instrucciones de Operación del Sistema

1. Preparación y Calentamiento

Asegurando que el controlador de flujo de masa ha sido correctamente instalado y se ha realizado previamente una prueba de fugas exhaustiva se puede realizar el apagado de la fuente de flujo y aplicar energía a la unidad a través del conector de 15 pines. Antes de conectar la fuente de alimentación, se debe verificar la etiqueta de requisitos de la fuente de alimentación en la parte posterior del controlador. Si la etiqueta indica que el requisito de alimentación es de 12 Vdc, no se debe conectar una fuente de alimentación con un voltaje superior a 15 Vdc, ya que exceder el límite máximo de voltaje puede dañar permanentemente el dispositivo. Se debe por lo menos calentar el controlador durante al menos 15 minutos.

Durante el encendido inicial del transductor, la señal de salida de flujo indicará un valor más alto de lo habitual, lo que sugiere que el transductor aún no ha alcanzado su temperatura mínima de

operación. Esta condición se cancelará automáticamente en unos minutos y el transductor eventualmente deberá indicar cero. Si, después del período de calentamiento de 15 minutos, la pantalla aún muestra una lectura de menos de ± 3.0 % de la escala completa, se debe ajustar el potenciómetro de CERO a través de la ventana de acceso. Antes de realizar el ajuste de cero, se debe desconectar temporalmente la fuente de gas para asegurar que no haya filtraciones hacia el medidor.

2. Lecturas de señal de flujo

La señal de salida de flujo puede visualizarse en la pantalla LCD integrada, en un medidor remoto, en un multímetro digital u otro dispositivo de visualización conectado. Este modelo de controlador permite mostrar las lecturas en la pantalla en unidades de ingeniería directas, como por ejemplo 0 a 10 sccm o 0 a 100 slpm, facilitando la interpretación de datos.

Las señales de salida analógica de flujo de 0 a 5 Vdc y 4 a 20 mA están disponibles en los pines apropiados del conector de 15 pines. La señal del medidor es linealmente proporcional a la tasa de flujo molecular másica del gas que se está midiendo. El rango de escala completa y el gas para el cual el medidor ha sido calibrado se muestran en la etiqueta del transductor de flujo.

3. Condición de inundación

Si el flujo supera el 110 % del flujo máximo del controlador de flujo de masa, puede ocurrir una condición temporal conocida como “inundación”. Las lecturas de un medidor “inundado” no se pueden asumir como precisas o lineales. Se debe restaurar el flujo a menos del 110% del rango máximo del medidor. Una vez que las tasas de flujo se reduzcan dentro del rango calibrado, la condición de inundación terminará.

4. Señal de referencia de Punto de Ajuste

Los controladores de flujo GFC 17 tienen válvulas solenoides incorporadas, lo que permite al usuario establecer el flujo a cualquier tasa deseada dentro del rango del modelo instalado. Esta válvula normalmente está cerrada cuando no se aplica energía.

Los puntos de ajuste de controlan local o remotamente. Los insumos de puntos de ajuste responden a voltajes de referencia analógicos de 0 a 5 Vdc o 4 a 20 mA. Para el control local, se debe utilizar el potenciómetro de punto de ajuste incorporado, mientras que, para el control remoto, se debe suministrar una señal de referencia analógica.

5. Prueba/Purgado de Válvula

En ciertas situaciones, es necesario purgar el sistema de flujo con un gas neutralizante. El transductor GFC 17 permite abrir completamente la válvula. Al conectar el pin OPEN (purge) a tierra, lo que permitirá un purgado efectivo del sistema.

Anexo 5: Hoja de datos de seguridad del hidrógeno.

El hidrógeno usado proviene de Linde. A continuación, se presenta la hoja de datos correspondiente:



Hidrógeno comprimido

Hoja de Datos de Seguridad P-4604

de acuerdo con NOM-018-STPS-2015

Fecha de revisión: 05/20/2022

Fecha de emisión: 10/12/2018

Reemplaza: 14/02/2022

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante

1.1. Identificación del producto

Forma de producto	: Sustancia
Nombre de la sustancia	: Hidrógeno comprimido
Nombre químico	: Hidrógeno
CAS N°	: 1333-74-0
Fórmula	: H ₂
Sinónimos	: Hidrogeno comprimido
Otros medios de identificación	: Dihidrógeno, para-H hidrógeno, Gas refrigerante R702, Gas de Agua, Hidrógeno Grado; 6.0 Investigación, 5.0 metanizador FID, 5.0 Ultra alta pureza, 4.5 Carbono orgánico total, 4.5 Cero, 4.5, 6.0 Proceso de gas semiconductor, 5.5 Proceso de gas semiconductor, 5.0 Proceso de gas semiconductor

1.2. Uso recomendado del producto químico y restricciones

Uso de la sustancia/mezcla : Uso industrial; Utilice como está indicado.

1.3. Datos sobre el proveedor de la hojas de datos de seguridad

Praxair México S. de R. L. de C.V.
Biólogo Maximino Martínez No. 3804
Col. San Salvador Xochimanca
02870 Cd. de México - MX
T Centro de Soluciones al Cliente Linde 800-00 LINDE (800 0054633)
www.linde.mx; <https://tiendalinde.com.mx/>

1.4. Número de teléfono en caso de emergencia

Número de emergencia : En caso de derrame, fuga, fuego, exposición o accidentes que involucren este producto llame a los números de emergencia Linde las 24 horas los 365 días del año. Teléfono: 800-7233244, 800-SAFE24H, o bien al SETIQ Tel Cd. de México y Área Metropolitana: (55) 5559 1588, Emergencias Interior de la República Mexicana: 800 0021 400 Horario: 24 h, los 365 días del año. En Colombia 01 - 8000 510003, En Venezuela 0800 4683 767.

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1. Clasificación de la sustancia o mezcla

Clasificación SGA-MX

Flam. Gas 1 H220

Gas Comprimido H280

Texto completo de las declaraciones H: véase la sección 16

2.2. Elementos de las etiquetas

Etiquetado SGA-MX

Pictogramas de peligro (SGA-MX)



Palabra de advertencia (SGA-MX)

: Peligro

Indicaciones de peligro (SGA-MX)

: H220 - GAS EXTREMADAMENTE INFLAMABLE
H280 - CONTIENE GAS A PRESIÓN; PUEDE EXPLOTAR SI SE CALIENTA

Consejos de precaución (SGA-MX)

: P210 - Mantener alejado del calor, chispas, llamas al descubierto, superficies calientes y otras fuentes de ignición. No fumar.
P377 - Fuga de gas inflamado: No apagar las llamas del gas inflamado si no puede hacerse sin riesgo.
P381 - En caso de fuga, eliminar todas las fuentes de ignición.
P403 - Almacenar en un lugar bien ventilado.
P410+P403 - Proteger de la luz solar. Almacenar en lugar bien ventilado.

Hidrógeno comprimido

Hoja de Datos de Seguridad P-4604

de acuerdo con NOM-018-STPS-2015

2.3. Toxicidad aguda desconocida (SGA-MX)

No hay datos disponibles

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

3.1. Sustancias

Nombre	Identificación del producto	%	Clasificación SGA-MX
Hidrógeno	(CAS N°) 1333-74-0	99.5 – 100	Flam. Gas 1, H220 Gas Comprimido, H280

Texto completo de las frases H y EUH: ver sección 16

3.2. Mezclas

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

4.1. Descripción de las medidas necesarias

Medidas de primeros auxilios tras una inhalación	: Transportar la víctima al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. Si no respira, dar respiración artificial. Si respira con dificultad el personal calificado debe administrar oxígeno. Llame a un médico.
Medidas de primeros auxilios tras el contacto con la piel	: No se esperan efectos adversos de este producto.
Medidas de primeros auxilios tras un contacto con los ojos	: Lavar inmediatamente los ojos con agua durante, al menos, 15 minutos. Mantenga los párpados separados del ojo para asegurar que toda la superficie ocular ha sido lavada completamente. Consultar inmediatamente a un oftalmólogo. Consultar a un médico inmediatamente.
Medidas de primeros auxilios tras una ingestión	: La ingestión no se considera una vía potencial de exposición.

4.2. Síntomas/efectos más importantes, agudos y retardados

No se dispone de más información

4.3. Indicación de la necesidad de recibir atención médica inmediata y tratamiento especial requerido en caso necesario

Ninguno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción

Medios de extinción apropiados	: <Missing Translation : Carbon dioxide, dry chemical powder, water spray, fog />.
--------------------------------	--

5.2. Peligros específicos de los productos químicos

Peligro de incendio	: GAS EXTREMADAMENTE INFLAMABLE. La flama de hidrógeno es casi invisible. El hidrógeno tiene una baja energía de ignición; gas hidrógeno escapando puede incendiarse espontáneamente. Una bola de fuego se formará si la nube de gas se incendia inmediatamente después de liberarse. El hidrógeno forma mezclas explosivas con el aire y con agentes oxidantes.
Peligro de explosión	: GAS EXTREMADAMENTE INFLAMABLE. Forma mezclas explosivas con el aire y con agentes oxidantes.
Reactividad	: No hay riesgos de reactividad distintos a los efectos que se describen a continuación.

5.3. Equipo de protección especial y precauciones para los equipos de lucha contra incendios

Instrucciones para extinción de incendio	: Si un gas que está venteando o fugando se incendia, no extinga las flamas. Los vapores inflamables pueden esparcirse del punto de fuga, creando un riesgo de una re-ignición explosiva. Los vapores pueden incendiarse mediante el piloto de luces, otras flamas, cigarros, chispas, calentadores, equipo eléctrico, descargas estáticas u otras fuentes de ignición en ubicaciones distantes del punto de manejo del producto. Atmósferas explosivas pueden persistir. Antes de entrar a un área, especialmente un área confinada, verifique la atmósfera con un dispositivo apropiado. Evacue a todo el personal del área de peligro. Utilice equipo de aire autónomo (SCBA) y ropa protectora. Inmediatamente enfíe los contenedores con agua desde una distancia máxima segura. Detenga el flujo de gas si es seguro de hacer, mientras continúa rociando agua. Remueva las fuentes de ignición si es seguro de hacer. Remueva los contenedores del área de fuego si es seguro de hacer. La brigada contra incendio debe cumplir con lo requerido en OSHA 29 CFR 1910.156 y los estándares aplicables en 29 CFR 1910 Subparte L-Protección contra Fuego.
Protección durante la extinción de incendios	: Gas comprimido: asfixiante. Peligro de sofocamiento por falta de oxígeno.

Anexo 6. Hoja de datos de seguridad del oxígeno

El oxígeno usado proviene de Linde. A continuación, se presenta la hoja de datos correspondiente:

	Making our world more productive	Oxígeno comprimido Hoja de datos de seguridad HDS- P-4638-SGA Fecha de Emisión: 16/12/2020 - Fecha de Revisión: 16/12/2020
SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa		
1.1. Identificación del producto		
Forma de producto	:	Sustancia
Nombre	:	Oxígeno comprimido
CAS N°	:	7782-44-7
Fórmula	:	O ₂
Otros medios de identificación	:	Oxígeno, Oxígeno MediPure®, Oxígeno FEUM, Oxígeno para respiración de aviación, Oxígeno para buceo, Oxígeno USP.
Grados de Producto :		Industrial, Oxígeno de Respiración para Aviadores, Oxígeno Grado; FEUM, USP, 2.6, 2.6+ Cero, 4.0-Sin Hidrocarburos, 4.3-UHP, 5.0-Investigación, 6.0, 6.0, 5.0 Investigación, 4.3 Ultra alta pureza, 4.0 Hidrocarburos libre, 2.6 Cero, 2.6, 5.0 Proceso de gas semiconductor, 4.0 Semiconductor de óxido metálico.
1.2. Uso recomendado del producto químico y restricciones		
Uso de la sustancia/mezcla	:	Medicinal Uso industrial Gas para buceo (para respiración bajo el agua)
1.3. Datos sobre el proveedor de la hoja de datos de seguridad		
Linde Perú S.R.L. Av. Alfredo Benavides 801 - Miraflores - Lima - Perú WWW.LINDE.COM.PE		
1.4. Número de teléfono en caso de emergencia		
Número de emergencia	:	0800-1-1521
SECCIÓN 2: Identificación del peligro o peligros		
2.1. Clasificación de la sustancia o mezcla		
SGA clasificación Oxígeno gas 1 H270 Gas comprimido H280		
2.2. Elementos de las etiquetas		
Etiquetado SGA		
Pictogramas de peligro (SGA)	:	  GHS03 GHS04
Palabra de advertencia (SGA)	:	PELIGRO
Indicaciones de peligro (SGA)	:	H270 - PUEDE PROVOCAR O AGRAVAR UN INCENDIO; COMBURENTE H280 - CONTIENE GAS A PRESIÓN; PUEDE EXPLOTAR SI SE CALIENTA
Consejos de precaución (SGA)	:	P220 - Mantener alejado de la ropa y otros materiales combustibles P244 - Mantener las válvulas y conexiones libres de grasa y aceite P370+P376 - En caso de incendio, detener la fuga si puede hacerse sin riesgo P403 - Almacenar en un lugar bien ventilado P410+P403 - Proteger de la luz solar. Almacenar en lugar bien ventilado CGA-PG05 - Uso de un retroceso de flujo, dispositivo preventivo en la tubería. CGA -PG20 + CGA-PG10 - Use sólo con equipos de materiales compatibles de construcción y para cilindros bajo presión. CGA-PG22- Use sólo con equipo limpiado para servicio de oxígeno. CGA-PG06 - Cierre la válvula después de cada uso y cuando esté vacío. CGA-PG02 - Proteger de la luz solar cuando la temperatura ambiente supera los 52°C (125°F). CGA-PG27 - Lea y siga Hoja de Datos de Seguridad (HDS) antes de usar.
2.3. Toxicidad aguda desconocida (SGA)		
No hay datos disponibles		

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

3.1. Sustancia

Nombre	Identificación del producto	%	SGA clasificación
Oxígeno	(CAS Nº) 7782-44-7	99.5 - 100	Ox. Gas 1, H270 Gas comprimido, H280

Texto completo de las frases H: ver sección 16

3.2. Mezcla

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

4.1. Descripción de las medidas necesarias

Medidas de primeros auxilios tras una inhalación	:	Trasladar al aire fresco. Consultar a un médico.
Medidas de primeros auxilios tras el contacto con la piel	:	No se esperan efectos adversos de este producto.
Medidas de primeros auxilios tras un contacto con los ojos	:	Enjuague de inmediato los ojos con agua. Sostenga los párpados separados y alejados de las órbitas de los ojos para asegurarse que todas las superficies sean enjuagadas perfectamente. Solicite atención médica si persisten las molestias.
Medidas de primeros auxilios tras una ingestión	:	La ingestión no se considera una vía potencial de exposición.

4.2. Síntomas/efectos más importantes, agudos y retardados

No se dispone de más información

4.3. Indicación de la necesidad de recibir atención médica inmediata y tratamiento especial requerido en caso necesario

Ninguno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción

Medios de extinción apropiados	:	Acelera vigorosamente la combustión. Utilice los medios apropiados para rodear el fuego. El Agua (ej. Agua de regaderas), es el medio adecuado para extinguir el fuego en la ropa.
--------------------------------	---	--

5.2. Peligros específicos de los productos químicos

Peligro de incendio	:	Agente oxidante; acelera vigorosamente la combustión. El contacto con material inflamable puede causar fuego o explosión.
---------------------	---	---

5.3. Equipo de protección especial y precauciones para los equipos de lucha contra incendios

Instrucciones para extinción de incendio	:	Gas a alta presión, oxidante. Evacue a todo el personal del área de peligro. Utilice equipo de aire autónomo (SCBA) y ropa protectora. Inmediatamente enfíe los contenedores con agua desde una distancia máxima segura. Detenga el flujo de gas si es seguro de hacer, mientras continúa rociando agua. Remueva las fuentes de ignición si es seguro de hacer. Remueva los contenedores del área de fuego si es seguro de hacer. La brigada contra incendio debe cumplir con lo requerido en OSHA 29 CFR 1910.156 y los estándares aplicables en 29 CFR 1910 Sub-parte L-Protección contra Fuego.
Otra información	:	Calor ó fuego pueden incrementar la presión en el contenedor y causar su ruptura. Los cilindros están equipados con un dispositivo de relevo de presión. (Puede haber excepciones donde esté autorizado por DOT.) Ninguna parte del contenedor debe estar sujeta a temperaturas mayores a 52°C (125°F). Fumar, flamas y chispas eléctricas en presencia de atmósferas con enriquecimiento de oxígeno son riesgos potenciales de explosión.

SECCIÓN 6: Medidas que deben tomarse en caso de derrame accidental

6.1. Precauciones individuales, equipos de protección y procedimientos de emergencia

Medidas generales	:	Prevenir la entrada en alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o en cualquier otro lugar donde la acumulación pueda ser peligrosa. Asegurar la adecuada ventilación de aire. Elimine fuentes de ignición. Evacuar el área. Intentar parar la fuga. Monitoree la concentración del producto derramado. Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura. Detener el derrame sin riesgo si es posible.
-------------------	---	--

6.1.1. Para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia

No se dispone de más información

6.1.2. Para el personal de los servicios de emergencia

No se dispone de más información

6.2. Precauciones medioambientales

Intentar parar el escape/derrame

6.3. Métodos y materiales de aislamiento y limpieza

No se dispone de más información