



Caracterización de los parámetros de funcionamiento de una celda de hidrógeno alcalina.

Esteban Verdeza Echeverri

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica
Medellín, Colombia
2024

Caracterización de los parámetros de funcionamiento de una celda de hidrógeno alcalina.

Esteban Verdeza Echeverri

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Tecnólogo en Mecánica Industrial

Director:

Dr. Ing., Adrián Gómez Zapata

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GIEN

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica

Medellín, Colombia

2024

Declaración de obra original

Yo, Esteban Verdeza Echeverri declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo Directivo 009 del 15 de junio de 2018 del Consejo Directivo “Reglamento de Propiedad Intelectual de la Institución Universitaria Pascual Bravo” y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la institución.

Esteban Verdeza Echeverri

Fecha 07/06/2024

Resumen

Caracterización de los parámetros de funcionamiento de una celda de hidrógeno alcalina

Basados en la necesidad que se tiene actualmente de nuevas fuentes energéticas, de generar nuevos conocimientos alrededor de éstas, y de conocer el funcionamiento de una celda electrolítica para la generación de hidrógeno –HHO– con la que se cuenta en la Institución Universitaria Pascual Bravo, se desarrolló un proceso de caracterización de los parámetros de funcionamiento de esta para saber la potencia requerida para iniciar la generación de HHO, el flujo, y la presión a las distintas condiciones operacionales de este dispositivo. Se inició haciendo una búsqueda bibliográfica con relación al tema del hidrógeno, se continuó con la consulta de las especificaciones técnicas de la celda, la medición de sus dimensiones; incluida la capacidad del tanque de almacenamiento del electrolito, preparación del electrolito de tal forma que permitiese la máxima generación de HHO de acuerdo con la literatura, se realizó un montaje instrumentado para la medición de las variables a monitorear, y por último se realizaron pruebas a diferentes combinaciones de potencia suministrada a esta celda, y la medición del flujo y presión generados en esta. Los resultados de este trabajo de caracterización se condensaron en una especie de ficha técnica que contiene datos como marca, referencia, dimensiones, peso, rangos de potencia, voltajes, corrientes, eficiencia, presión, y flujo, encontrándose que esta celda está en capacidad de generar HHO a una presión máxima de 10 pulgadas de mercurio (0.34 Bar) y un flujo máximo de 0.5 L/min, que resultan ser comparables con celdas electrolíticas desarrolladas con tecnologías tales como las de membranas poliméricas.

Palabras clave: Celda alcalina, electrólisis, hidrógeno, eficiencia energética.

Abstract

Characterization of alkaline hydrogen cell operation parameters

Based on the current need for new energy sources, to generate new knowledge around them, and to know the operation of an electrolytic cell for the generation of hydrogen – HHO– which is available at the Pascual Bravo University Institution, a process of characterization of its operating parameters was developed to know the power required to start the generation of HHO, the flow, and the pressure at the different operational conditions of this device. It began with a bibliographic search about the topic of hydrogen, and continued with the consultation of the technical specifications of the cell, the measurement of its dimensions; including the capacity of the electrolyte storage tank, preparation of the electrolyte in such a way that it allowed the maximum generation of HHO according to the literature, an instrumented setup was carried out for the measurement of the variables to be monitored, and finally tests were carried out. different combinations of power supplied to this cell, and the measurement of the flow and pressure generated in it. The results of this characterization work were condensed into a type of technical sheet that contains data such as brand, reference, dimensions, weight, power ranges, voltages, currents, efficiency, pressure, and flow, finding that this cell is capable of generating HHO at a maximum pressure of 10 in Hg (0.34 Bar) and a maximum flow of 0.5 L/min, which turn out to be comparable with electrolytic cells developed with technologies such as polymeric membranes.

Keywords: Alkaline cell, electrolysis, hydrogen, energy efficiency.

Contenido

Contenido

1. Estado del arte y marco teórico	8
1.1 Antecedentes históricos	8
1.2 Fuentes ricas en H ₂	9
1.3 Propiedades del hidrógeno, y por qué es un combustible.....	10
1.4 Métodos de obtención	11
1.5 Electrólisis del agua	12
1.6 Celdas de hidrógeno	13
1.7 Celdas para producción de hidrógeno con electrólisis alcalina	14
1.8 Otros tipos de electrolizadores	15
2. Desarrollo experimental.....	17
2.1 Preparación del electrolito	17
2.2 Dimensiones generales y montaje del sistema	17
2.3 Metodología y cálculos para la caracterización	20
3. Resultados.....	24
3.1 Ficha técnica	28
4. Conclusiones y recomendaciones	30

Introducción

La constante dependencia energética derivada de los combustibles fósiles en la sociedad, además del crecimiento de la demanda y el aumento de los precios [1], ha sido evidencia de una necesidad para el desarrollo e innovación, tanto para la optimización como para la investigación en nuevas fuentes de energía.

Actualmente existen dos razones principales por la cual se está planteando la posibilidad de sustituir los combustibles convencionales por energías renovables como el hidrógeno – H₂–: En primer lugar, el impacto negativo al medio ambiente (dado que en su combustión existen emisiones de Gases de Efecto Invernadero –GEI–, nocivos para el medio ambiente). Por otro lado, se trata de un recurso que tarde o temprano se acabará, mientras que el hidrógeno es un elemento que permanece casi inagotable.

Se evidencia, entonces, una fuerte necesidad de reemplazar o reducir al máximo el uso de estos combustibles fósiles, principalmente en el mercado de la energía [1] y generar nuevas alternativas para así contribuir tanto a la economía mundial (reduciendo la demanda de combustibles fósiles), como al medio ambiente. Es por ello que se busca una fuente no convencional de energía renovable –FNCER– competente para lograr este objetivo, y, dentro de estos, una de las propuestas más prometedoras es la utilización del H₂.

Hoy en día las tecnologías basadas en H₂ se enfocan en ser la principal fuente efectiva de energía renovable, y convertirse en el principal vector energético, siendo el motor principal de las industrias del futuro.

Como un aporte institucional a la necesidad de que sus estudiantes estén en contexto con dichas demandas energéticas actuales y la de poner en funcionamiento una celda para la generación de H₂ adquirida por dicha entidad, con este trabajo se pretende establecer unos rangos en los parámetros de funcionamiento de dicho dispositivo que permita la generación de H₂ a diferentes condiciones operacionales, para su posterior uso en distintas aplicaciones que requieran el consumo de dicho recurso energético.

Como objetivo general para el desarrollo de este trabajo se propuso la determinación de los parámetros de funcionamiento de la celda alcalina para la generación de H₂ con la que se cuenta en la institución. Para lograr este propósito se plantearon como objetivos específicos la cuantificación de la cantidad de H₂ generado por la celda en función de la potencia aplicada a esta, la correlación de los datos de potencia en función de la cantidad de H₂ generada, y, por último, el establecimiento de unos rangos adecuados para los parámetros de funcionamiento del dispositivo.

Una breve descripción de las principales actividades desarrolladas para lograr el cumplimiento de los objetivos se describe a continuación. Se inició realizando una búsqueda bibliográfica relacionada con el hidrógeno, se consultaron las especificaciones técnicas de la celda, se midieron sus dimensiones, se preparó el electrolito para que permitiese la máxima generación de HHO de acuerdo con la literatura, se realizó un montaje instrumentado para la medición de las variables a monitorear, y por último se realizaron pruebas a diferentes combinaciones de potencia suministrada a esta celda, y la medición del flujo y presión generados en esta. Los resultados de este trabajo de caracterización se condensaron en una especie de ficha técnica que contiene datos como marca, referencia, dimensiones, peso, rangos de potencia, voltajes, corrientes, eficiencia, presión, y flujo, encontrándose que esta celda está en capacidad de generar HHO a una presión máxima de 10 pulgadas de mercurio (0.34 Bar) y un flujo máximo de 0.5 L/min, que resultan ser comparables con celdas electrolíticas desarrolladas con tecnologías tales como las de membranas poliméricas.

1. Estado del arte y marco teórico

1.1 Antecedentes históricos

Teniendo en cuenta que una de las principales aplicaciones futuras del H₂ está enfocada al sector de la movilidad, se hace énfasis en algunos antecedentes que han marcado la evolución del H₂ en este sector de desarrollo, teniendo en consideración la utilización de este a lo largo de la historia como fuente de energía en otros sectores.

A Comienzos del siglo XIX, el hidrógeno, como fuente de energía, fue utilizado por primera vez para la iluminación de las calles de París por Philipp Lebon mediante una mezcla de H₂ y monóxido de carbono –CO–, desplazando a las lámparas de aceite y petróleo utilizadas hasta entonces [2].

Luego, la primera aplicación como combustible vehicular fue ingeniería por W. Cecil en 1820, quien creó un vehículo que se movía por la presión de la atmósfera sobre el vacío causado por la explosión de una mezcla de H₂ y aire [2].

En el marco de la segunda guerra mundial, el papel más protagónico del H₂ se basó en su utilización en los dirigibles alemanes tipo Zeppelin como su principal medio de sustentación debido a su baja densidad, sin embargo, en 1937 cuando en New Jersey el dirigible Hindenburg se quemó, empezaron a quedar en desuso [3].

En 1950 el científico Austríaco Karl Cordesh ingenió el primer automóvil funcional (del cual se tiene registro) a partir de pilas de combustible de H₂. Este fue un importante avance ya que impulsó a varias empresas como General Motors y Mercedes Benz a experimentar con esta tecnología, fabricando buses y automóviles impulsados por baterías de H₂ [4].

A principios de la década de los años 60 (en el marco de la carrera espacial con la extinta Unión Soviética), este importante avance sirvió como base para llevar a cabo el programa espacial estadounidense Gemini y Apolo; y de ahí se empezó también a usar el H₂, tanto como combustible para impulsar las naves espaciales, como para generar electricidad y agua a la tripulación a través del uso de celdas de combustible. Hoy, la aplicación espacial no es la única, ya que las celdas de combustible están en un momento en el que la tecnología le permite estar en posición de competir con las tecnologías convencionales de generación eléctrica, ofreciendo grandes ventajas sobre ellas [5]. Por ejemplo, en el sector automovilístico uno de los más importantes precursores en cuanto a la utilización del H₂

como fuente de energía fue la empresa japonesa Toyota, con su modelo MIRAI (lanzado en 2014 y producido actualmente en serie), cuyo funcionamiento consiste en emplear una celda de combustible de membranas poliméricas basadas en Nafión, con la finalidad de mejorar el rendimiento y la autonomía del vehículo. Incluso, algunas compañías como BMW han lanzado prototipos que consisten en adaptar alguno de sus motores de combustión interna, para que conjuntamente funcionen, tanto con gasolina, como con H₂ dentro de su cámara de combustión, es decir, motores “Bifuel” [6].

La tecnología del H₂ aún cuenta con un gran potencial de desarrollo para convertirse en uno de los principales vectores energéticos, sin embargo, poco a poco está siendo cada vez más accesible, por ejemplo, hoy en el ámbito automotor, existe una propuesta llamada “Hidrocell” que consiste en una celda de H₂ alcalina que puede adaptarse para todo tipo de motores de combustión, y que, en teoría, disminuye hasta en un 40% el consumo de combustible (gasolina, gas o diésel). Pero esto, a pesar de que se ha puesto en duda en distintas ocasiones, representa un avance importante para su implementación real y efectiva [7].

En este sentido, en cuanto a madurez tecnológica [8] y capacidad de implementación en el mercado a escala significativa [9][2], los más adecuados para su utilización son los electrolizadores alcalinos (AEL, por sus siglas en inglés), que tienden a ser más eficientes en comparación con otros tipos [10][3][4]; además de que es más conveniente su utilización a nivel económico, tanto en los materiales de fabricación como en su funcionamiento para producción de hidrógeno [11].

1.2 Fuentes ricas en H₂

En la actualidad, el H₂ puede ser aprovechado de diferentes fuentes: 48% a partir de gas natural, 30% del petróleo, 18% del carbón, y de la electrólisis del agua sólo el 4% [11].

El H₂ puro puede obtenerse por medio de diferentes procesos como la gasificación de biomasa o la electrólisis, siendo más perjudicial para el medio ambiente el primero de ellos, ya que implica la generación de CO₂, pero con un costo energético mayor el de la electrólisis, porque se requiere del rompimiento de enlaces atómicos mediante la aplicación de energía eléctrica.

Este problema energético actualmente se está solucionando con el uso de nuevas tecnologías a partir de la construcción de electrolizadores más modernos, cuyo funcionamiento se logra mediante fuentes renovables como la energía solar. Por ejemplo, los actuales electrolizadores con membrana de intercambio de protones – PEM– (por sus siglas en inglés) utilizan un electrolito polimérico sólido, que aumenta significativamente la eficiencia energética, además de que son los que presentan una respuesta más rápida a

variaciones de potencia, lo que hace a estos electrolizadores adecuados para funcionar a partir de fuentes de energías renovables [8].

1.3 Propiedades del hidrógeno, y por qué es un combustible.

El H₂ es un gas incoloro, inodoro e inflamable. Este, como muchos gases, no se encuentra en estado puro en la naturaleza, por lo tanto, debe ser extraído a través de distintos procesos; por ello se le considera como un portador o vector energético como, por ejemplo, la electricidad.

Puede ser utilizado de varias formas: Puede ser quemado dentro de una cámara de combustión, como combustible para crear electricidad a partir de celdas de combustible, puede ser usado como reactante para crear combustibles sintéticos, entre otros usos.

El H₂ es el combustible que contiene mayor energía por unidad de masa, con un poder calorífico de aproximadamente 120 MJ/kg [11], es decir, tiene una mayor capacidad energética en comparación con los combustibles convencionales más importantes. Sin embargo, al observar la Figura 1, se muestra que el H₂ viene contrarrestado por su baja densidad volumétrica, es decir, se requiere más espacio para almacenarlo por cada kilogramo; es por eso por lo que la manera convencional de almacenamiento es a altas presiones: entre 350 y 700 bares en estado gaseoso. [12]

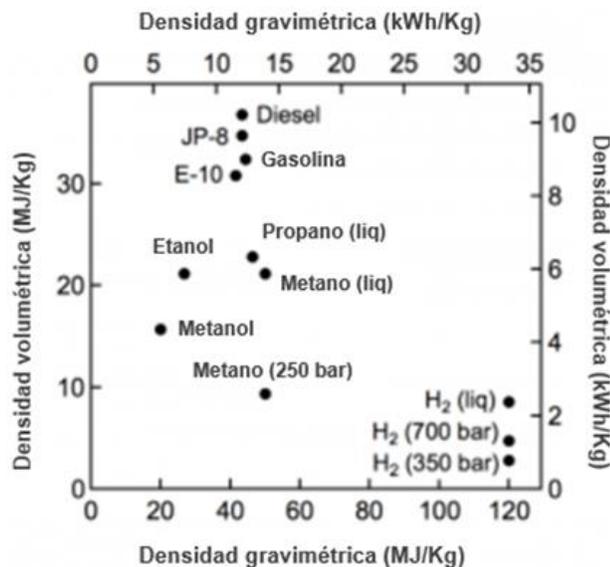


Figura 1: Densidad Gravimétrica vs Densidad Volumétrica del H₂. Adaptada de [12]

Los vehículos actuales basados en la tecnología de FCEV, utilizan celdas con potencias entre 80 y 120 kW [9], mientras que los motores de combustión interna generan potencias promedio entre 95 y 103 kW para los vehículos medianos [13]. Incluso, el rango promedio de potencias generadas por celdas de combustible de H₂ se acerca a cifras de vehículos deportivos como el Mazda Mx-5 que, según su ficha técnica, entrega una potencia máxima de 135 KW [14].

1.4 Métodos de obtención

Los procesos para su producción se pueden dividir, fundamentalmente en:

- **Termoquímicos:** Se usa calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales o de la biomasa. Dentro de esta categoría se encuentra la Reformación de gas metano con vapor (SMR), oxidación parcial (mezclar un combustible de hidrocarburo con oxígeno para formar una mezcla de H₂ y gas de síntesis [9]), reformado autotérmico (ATR), gasificación del carbón, gasificación de biomasa (proceso de oxidación parcial que convierte biomasa en gas de síntesis, o bien, fermentar carbohidratos para producir hidrógeno).
- **Electrolíticos:** El agua –H₂O– se disocia en hidrógeno –H₂– y oxígeno –O– usando electricidad, es decir, a través del uso de una corriente continua y dos electrodos, se consigue separar el H₂O en sus dos moléculas: H₂ y O [9]. Es el método más conocido. El equipo usado para esto se le conoce como electrolizador, siendo la energía solar fotovoltaica una de las más recomendables fuentes renovables de energía eléctrica para trabajar juntamente con estos equipos [15].
- **Biológicos:** Microorganismos, tales como bacterias y algas pueden generar hidrógeno por medio de procesos biológicos propios [9].
- **Otros procesos:** como la descomposición foto catalítica y biológica del agua [9].

Por otro lado, también se está investigando el uso de energía solar para la utilización de calor y electricidad en procesos termoquímicos y electrolíticos, ya que para esto generalmente se utilizan combustibles fósiles. La Figura 9 muestra las tecnologías de producción de H₂ renovable.

La Figura 2 muestra una síntesis de los modos de obtención de hidrógeno

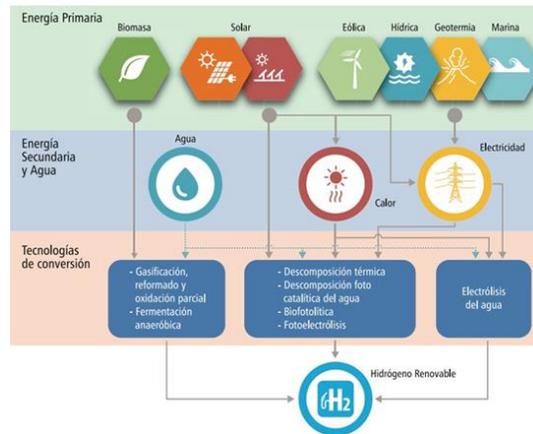


Figura 2: Fuentes de energías renovables para la producción de hidrógeno [9]

1.5 Electrólisis del agua

Proceso en el que se separan dos elementos de un compuesto a través del uso de energía eléctrica, el cual permite romper los enlaces. Para el H₂O, usando dos electrodos y una batería se puede conseguir romper los enlaces atómicos; de modo que, el ánodo atraerá el O (con carga negativa), mientras que el cátodo atraerá al H₂ (con carga positiva), y todo esto facilitado por un electrolito, que favorece la conductividad eléctrica de líquido, y que aumenta, a su vez, la eficiencia de la reacción electroquímica.

Con base en la Figura 3, para la electrólisis del H₂O se observa una reacción de oxidación en el ánodo, en donde las moléculas de H₂O entregan electrones. Esta reacción rompe los enlaces atómicos y produce, como resultado, iones positivos de H⁺ y átomos de O.

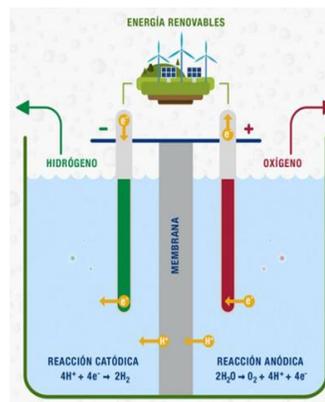
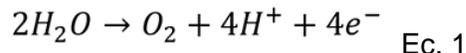
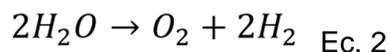


Figura 10: Esquema representativo del proceso de la electrólisis [16]

En general, la reacción que se produce corresponde a las siguientes expresiones:

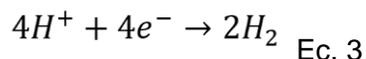


o bien,



Las Ecuaciones 1 y 2 muestran la descomposición química del H₂O, producida por el paso de una corriente eléctrica; y se observa que, por proporción estequiométrica, la cantidad de moléculas de H₂ producidas duplica al número de moléculas de O.

Con base en la Ecuación 3, en el cátodo se genera una reacción de reducción, ya que los iones de H⁺ que salieron previamente del ánodo se verán atraídos por los electrones que salen del polo negativo, y así, uniéndolos, formará H₂ molecular.



Por ello, la reacción de la electrólisis del H₂O es considerada o categorizada como de “reducción-oxidación” o redox, en donde uno o más electrones se transfieren entre los reactivos.

1.6 Celdas de hidrógeno

Componentes

- **Fuente de energía eléctrica:** Puede ser obtenida desde una batería común, hasta un sistema fotovoltaico [17][1], que proporcionará la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la celda.

- Electrodos

Electrodos inertes: Aquellos que no participan activamente en la reacción química. Es decir, los que, en el proceso, por ejemplo, no se desgastan ni se corroen.

Electrodos activos: Aquellos que participan activamente en la reacción química, como por ejemplo los aceros, los cuales se corroen al estar en contacto con el agua.

Lo recomendable es usar electrodos inertes, que no intervengan activamente en la reacción química, con el fin de obtener hidrógeno más puro, además de evitar el desgaste progresivo de los electrodos.

En las celdas se pueden usar electrodos y catalizadores a base de Iridio, níquel y a base de platino, que tiende a entregar un rendimiento superior [11].

Se clasifica según su polaridad como ánodo cuando tiene cargas positivas y cátodo cuando tiene cargas negativas.

- **Electrolito:** Se hace necesario el uso de un electrolito (sólido o líquido) en las celdas de hidrógeno, ya que la electrólisis del agua pura implica un gran consumo de energía eléctrica, principalmente por la escasa disociación entre sus elementos y su deficiente conductividad eléctrica, siendo tan solo del orden de $0,055 \mu\text{S}$ [18].

Celda o cuba electrolítica: En donde se encuentran todos los componentes internos de la celda y donde se produce la reacción electroquímica.

1.7 Celdas para producción de hidrógeno con electrólisis alcalina

También conocidas como celdas tipo AEL, estos electrolizadores utilizan un líquido electrolítico, generalmente de hidróxido de potasio –KOH– o hidróxido de sodio –NaOH–, para obtener una solución en un medio acuoso con una concentración en peso del electrolito cercana al 30%. Esta concentración es elegida para alcanzar la máxima conductividad eléctrica posible [8][1]. En la Figura 4 se presenta una gráfica que muestra los valores de conductividad específica en función de la concentración electrolítica en porcentaje de peso, tanto para KOH como para NaOH. Se observa que el KOH tiene una conductividad específica superior a la del NaOH en concentraciones cercanas al 30%, a diferentes temperaturas.

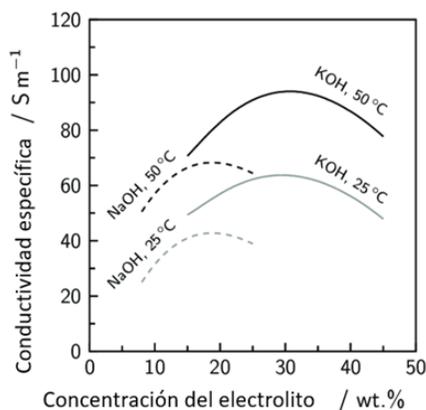


Figura 4: Conductividad electrolítica específica calculada en función de las concentraciones electrolíticas de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) a diferentes temperaturas. Adaptada de [15][2]

Estos electrolizadores trabajan a presiones de, aproximadamente, 30 bar [9][3], sin embargo, es posible que estos equipos puedan funcionar hasta 100 bar y a diferentes temperaturas [18][4], consiguiendo afectar directamente otros parámetros, ya que, el voltaje disminuye cuando aumenta la presión, además de que el voltaje es alto en celdas de alta temperatura [18][5]; y todo está relacionado, finalmente, con la cantidad de H₂ que la celda puede generar [8][6].

Sin embargo, una desventaja es que, son inestables y no alcanzan condiciones de estado estable al tener variaciones de potencia, razón por la cual este tipo de electrolizadores son poco óptimos para ser usados con fuentes de energías renovables [8] [18][7], sin embargo, se han hecho investigaciones al respecto con el fin de intentar implementar estas fuentes de energías para que se acoplen y trabajen, de manera efectiva, con celdas de H₂ alcalinas [8].

1.8 Otros tipos de electrolizadores

Si bien el electrolizador que tiene una tecnología más madura en el mercado es el alcalino (–AEL –, por sus siglas en inglés), existen, sin embargo, otros tipos de electrolizadores, categorizados en función del tipo de electrolito con el que operan; estos pueden ser: poliméricos, aniónicos y de óxido sólido.

Electrolizadores con membranas poliméricas de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés): Esta tecnología utiliza una membrana polimérica, la cual es responsable del transporte de protones de hidrógeno. El polímero más comúnmente utilizado es el Nafion [19][9].

Dentro de sus ventajas se encuentra que pueden trabajar a densidades de corriente altas, lo que está directamente relacionado con su capacidad de producción de hidrógeno [9][10] ; pueden trabajar a presiones de hasta 60 bar, sin embargo, con tecnologías recientes, se ha conseguido que puedan trabajar a presiones de hasta 350 bar o 700 bar [20][11] , lo que está directamente relacionado con su eficiencia. Su principal ventaja es que responde efectivamente a variaciones de potencia, es decir, pueden trabajar de mejor manera con fuentes de energías renovables [8][12]. Sin embargo, estos electrolizadores tienen una vida útil más limitada, menos madurez tecnológica, y mayores costes de fabricación [8][13].

Electrolizadores de membranas aniónicas (AEM, por sus siglas en inglés): La electrólisis AEM separa el agua en hidrógeno y oxígeno por medio de una membrana, al igual que sucede en la electrólisis PEM, pero en este caso, la membrana es aniónica. La electrólisis AEM se asemeja a la electrólisis alcalina (ya que comparte las mismas reacciones básicas [21][14]), pero, en vez de utilizar un electrolito líquido, emplea una membrana aniónica. Este sistema alcanza eficiencias bajas, en torno al 50%. Cabe resaltar que esta tecnología está en fase de desarrollo no habiendo alcanzado aún la industrialización.

Electrolizadores de membranas de óxido sólido (SOEL, por sus siglas en inglés): Estos utilizan una membrana sólida cerámica, la cual presenta una buena conductividad en el electrolito [9]. Su principal ventaja es que pueden llegar a alcanzar eficiencias hasta del 95%, también presentan consumos energéticos más bajos, pues trabajan a altas temperaturas, alrededor de los 800°C a 1000°C [8][16], y pueden funcionar efectivamente con altas densidades de corriente. Actualmente no es una tecnología madura, pues apenas está en una etapa de investigación y desarrollo.

2. Desarrollo experimental

A continuación, se presenta una breve descripción de la metodología llevada a cabo para el desarrollo experimental de la caracterización de la celda, incluyendo mediciones de voltaje, amperaje, flujo y presión, al igual que el cálculo de la eficiencia en la generación de H₂ a partir de los datos recolectados y las dimensiones físicas de la celda, como el volumen interno y el área efectiva con la que el líquido electrolítico está en contacto con las placas metálicas.

2.1 Preparación del electrolito

En la Figura 4 se presenta una gráfica que evidencia los valores de conductividad específica en función de la concentración electrolítica, en porcentaje de peso; tanto para el hidróxido de potasio –KOH– como para el hidróxido de sodio –NaOH–. En este trabajo se utilizó sólo el KOH, el cual tiene una conductividad específica superior a la del NaOH en concentraciones cercanas al 30% a diferentes temperaturas. Se preparó una solución de KOH en un medio acuoso al 30% (porcentaje en peso), y se depositó en el contenedor, garantizando el llenado de aproximadamente el 85% del volumen de dicho depósito. Se utilizó una balanza electrónica con resolución de 0.1 g para pesar la masa del KOH que se mezcló.

2.2 Dimensiones generales y montaje del sistema

Para la caracterización dimensional de los componentes de la celda se utilizó un instrumento de medición conocido como calibrador o pie de rey con un rango o escala de medición de 0 a 150 mm y con resolución de 0.02 mm. Se tomaron dimensiones tales como el área efectiva de las placas de celda, el grosor de los aislamientos entre placas, y el grosor de las placas de la celda, entre otras, fueron hechas sobre la parte externa de esta, ya que dicho equipo se encontraba armado y ensamblado en su respectiva caja de aislamiento donde se incorpora la parte de control de la misma, tal como fue adquirido del proveedor del mismo, y no se consideró pertinente realizar el desmontaje completo de esta para no generar desajustes y posibles fugas o daños en la celda.

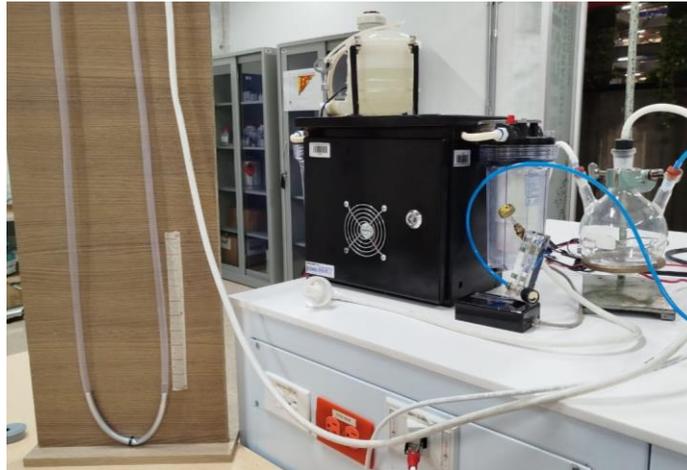


Figura 5: Celda electrolítica, equipos y montajes utilizados para las primeras mediciones

La Figura 5 evidencia el montaje de los diferentes equipos utilizados para llevar a cabo las mediciones experimentales conducentes a la caracterización de la celda, en el cual se observa un medidor de flujo de aire (rotámetro) marca Cole palmer con capacidad para medir flujo en el rango de 0 a 0.5 LPM con una resolución de 0.02 LPM; un balón volumétrico de tres entradas con capacidad de 1000 ml al cual se conectó, en uno de sus extremos, la entrada de gas (HHO) generado por la celda; en la boca o entrada central se conectó la columna de mercurio, y en el otro extremo o salida se conectó el rotámetro. Para la medición de la presión se utilizó una columna de mercurio con capacidad hasta 10" de Hg (0.34 Bar). Igualmente, para la medición del voltaje se utilizó un multímetro marca UNI-T referencia UT33C y se utilizó la escala de 20 VDC. La corriente eléctrica de polarización o de consumo de la celda se midió con una pinza amperimétrica para mediciones en AC y DC marca UNI-T referencia UT203 y se graduó en la escala de 40 ADC.

Para caracterizar el comportamiento del flujo y la presión generados por la celda en función del voltaje y la corriente aplicada (potencia), se utilizó una fuente adicional marca UNI-T referencia UTP3305 con capacidad para suministrar corriente hasta 10 A (en una configuración en paralelo) y un voltaje entre 0 y 30 VDC. La fuente con la que se suministró la celda se utilizó sólo para la polarización del circuito de control de esta.

En la figura 6 se aprecia el diagrama de instrumentación, en donde se pueden identificar los principales componentes funcionales de la celda, así como los instrumentos y equipos adicionales utilizados en este trabajo de caracterización.

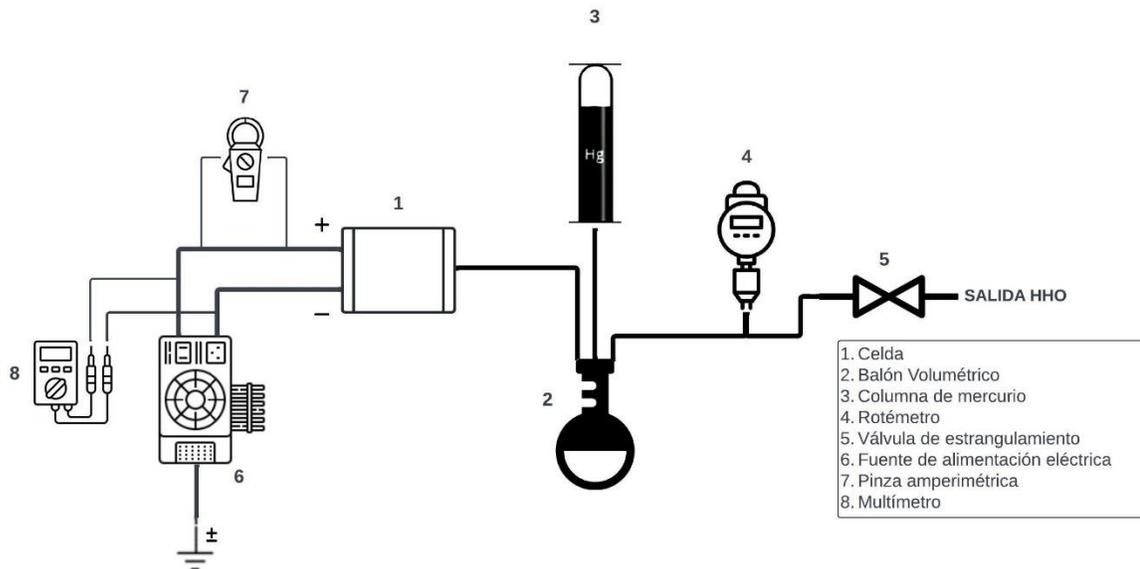


Figura 6: Diagrama de instrumentación del montaje utilizado

En la Figura 7 se observa un diagrama esquemático de los principales componentes con los cuales se adquirió la celda.

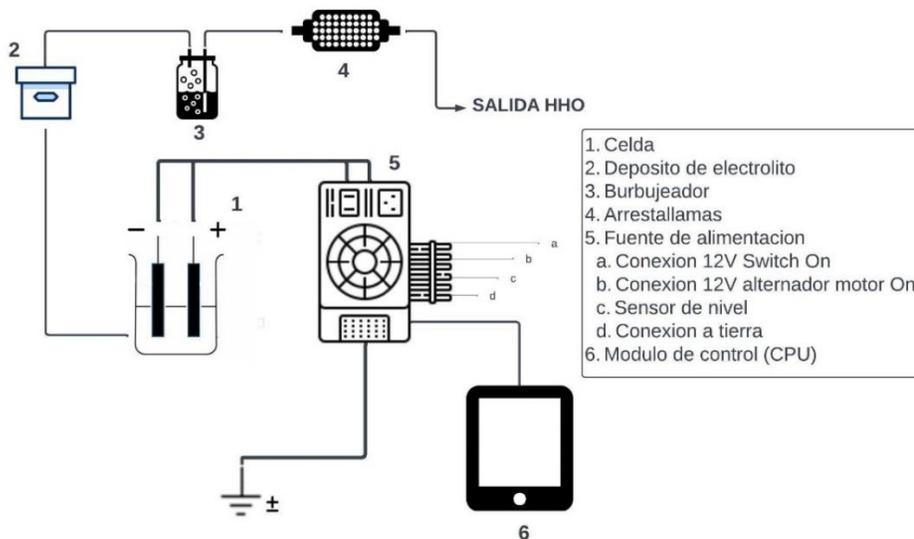


Figura 7: Diagrama de instrumentación de los componentes internos de la celda

A continuación, se detallan las características dimensionales de la celda, incluidas las de su depósito o tanque de almacenamiento para el electrolito:

- Volumen interno de la celda: $94\,185\text{ mm}^3 = 0.094185\text{ L}$
- Volumen aproximado de las mangueras: $56\,548,6\text{ mm}^3 = 0.0565486\text{ L}$
- Volumen aproximado de depósito: $507\,681\text{ mm}^3 = 0.507681\text{ L}$
- Volumen total: $658\,414\text{ mm}^3 = 0.6584\text{ L}$
- Número de placas: 6
- Área de cada placa: $13455\text{ mm}^2 = 134.55\text{ cm}^2$
- Área total efectiva: $80730\text{ mm}^2 = 807.3\text{ cm}^2$

2.3 Metodología y cálculos para la caracterización

Medición de presión

La medición se realizó utilizando una columna de mercurio conectada a la salida central del balón volumétrico. Tras polarizar o energizar la celda con una combinación específica de voltaje y corriente, y ajustar el flujo de gas H₂ mediante una válvula de estrangulamiento en la salida del rotámetro, se iniciaron las pruebas. Esto provocó un aumento progresivo de la presión, reflejado en el incremento del nivel de la columna de mercurio. El cambio en la altura de la columna se registró en función del tiempo, a intervalos fijos de una pulgada, hasta alcanzar una altura total de 9 pulgadas de Hg.

Medición de la curva de polarización

Se conectó la celda a una fuente de alimentación variable y se registraron los datos de la corriente para cada valor del voltaje configurado. Las mediciones comenzaron una vez que se estableció el voltaje mínimo necesario para que la celda iniciara la producción de H₂. Se observaron las anomalías presentes y se registró la variación del flujo a medida que aumentaba el voltaje.

Medición de la eficiencia a diferentes potencias suministradas a la celda.

La potencia de polarización de la celda está dada por una combinación de voltaje y corriente, cuya multiplicación da el valor en vatios suministrados o consumidos por la celda. Se registró la eficiencia para cada una de estas configuraciones cuando el flujo se

establece al máximo. Para cada combinación de voltaje e intensidad de corriente, se aplica el siguiente procedimiento:

Entrada:

Teniendo en cuenta la entrada de voltaje y amperaje, se procede a determinar la potencia eléctrica, aplicando la Ecuación 4:

$$W = V \times A \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$W =$ Potencia eléctrica (medido en Vatios [W])

$V =$ Voltaje (medido en Voltios [V])

$A =$ Intensidad de corriente eléctrica (Medido en amperios [A])

Considerando que cada vatio equivale a un julio por segundo se tiene la Ecuación 5:

$$C_e = W \times t \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

$C_e =$ Energía de entrada (medido en Julios [J])

$W =$ Potencia eléctrica (medido en Vatios [W])

$t =$ tiempo (tomado en segundos [s])

Salida:

Se tienen en cuenta los siguientes datos

- Flujo de H₂ → Variable
- C_{p_H} (capacidad calorífica del hidrógeno) = $14.3 \frac{J}{g \cdot K}$
- C_{p_o} (capacidad calorífica del oxígeno) = $0.918 \frac{J}{g \cdot K}$
- ρ_H (densidad del hidrógeno) = $0.0899 \frac{kg}{m^3}$
- ρ_o (densidad del oxígeno) = $1.429 \frac{kg}{m^3}$

La capacidad calorífica específica del hidrógeno y el oxígeno, se establecen para condiciones de temperatura y presión normales; 25 °C (298.15 K) y 1 atm respectivamente.

Se establece el volumen de HHO en un tiempo establecido en segundos, y esto se halla a partir de la configuración del flujo máximo de HHO de acuerdo con la configuración de potencia seleccionada, luego se procede a realizar un cálculo para hallar el estimado de tiempo en que llena un volumen, aplicando la Ecuación 6:

$$V = \frac{F \times t}{60} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$V =$ volumen de llenado (Medido en gramos [m^3])

$F =$ Flujo de HHO marcado en el rotámetro (medido en litros [L])

$t =$ Tiempo en que la columna alcanza una presión de 9 in Hg (Medido en segundos [s])

Se determina la masa de dicho volumen para el H-H-O teniendo en cuenta la Ecuación 7 y 8.

$$\rho_T = \rho_{H-H} + \rho_o \quad \text{Ec. 7}$$

$$m_{HHO} = \rho_T \times V \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$\rho_{H-H} =$ Densidad de dos átomos de hidrógeno (Medido en [Kg/m^3])

$\rho_o =$ Densidad del oxígeno (Medido en [Kg/m^3])

$\rho_T =$ Densidad total (Medido en [Kg/m^3])

$V =$ Volumen de llenado (Medido en [m^3])

$m_{HHO} =$ Masa del HHO (Medido en gramos [g])

Se establece la capacidad calorífica específica del HHO teniendo en cuenta la Ecuación 9:

$$Cp_T = Cp_{H-H} + Cp_o \quad \text{Ec. 9}$$

En donde:

Cp_{H-H} = Capacidad calorífica de dos átomos de hidrógeno (Medido en $[\frac{J}{g \cdot K}]$)

Cp_o = Capacidad calorífica del oxígeno (Medido en $[\frac{J}{g \cdot K}]$)

Cp_T = Capacidad calorífica total (Medido en $[\frac{J}{g \cdot K}]$)

Se relacionan los datos obtenidos, dando como resultado la energía de salida. Suponiendo que existe un cambio de temperatura en el ambiente de 1°C, se establece que: $\Delta T = 274.5 K$. Se aplica la Ecuación 10

$$C_S = Cp_T \times m_{HHO} \times \Delta T \quad \text{Ec. 10}$$

Se determina el porcentaje de eficiencia, teniendo en cuenta la Ecuación 11:

$$\eta = \frac{C_S - C_e}{C_e} \times 100\% \quad \text{Ec. 11}$$

En donde:

η = Porcentaje de eficiencia

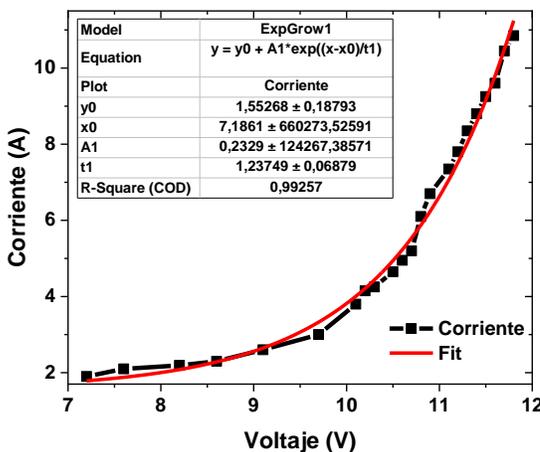
C_S = Energía de salida (Producida por la celda *medida en Julios [J]*)

C_e = Energía de entrada (Potencia eléctrica *medida en Julios [J]*)

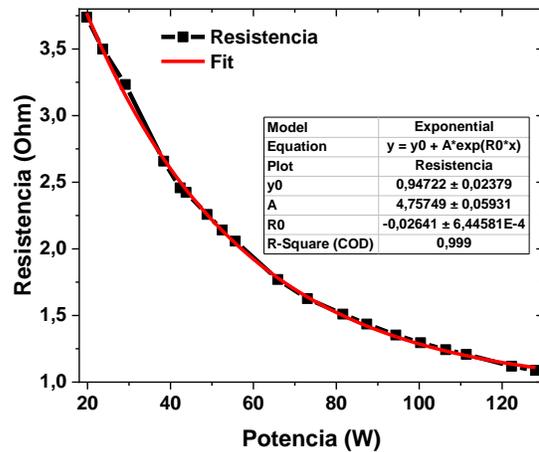
3. Resultados

De acuerdo con la metodología y cálculos realizados para la caracterización, se obtuvieron los siguientes resultados.

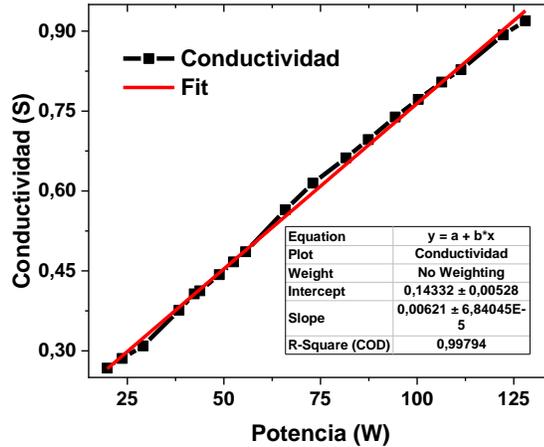
La gráfica **a)** de la Figura X corresponde a la variación de la corriente con respecto al voltaje suministrado a la celda para la generación de hidrógeno. Se observa que dicha gráfica se puede ajustar; línea en color rojo, a la de un modelo tipo exponencial creciente cuya ecuación y parámetros de ajuste se visualizan en el cuadro insertado en dicha gráfica. Esta gráfica también está asociada con la resistencia y conductividad eléctrica del electrolito utilizado. La gráfica **b)** corresponde a la variación de la resistencia del electrolito en función de la potencia aplicada a la celda, cuyo comportamiento también se puede ajustar a la de un modelo exponencial pero decreciente mediante la ecuación y parámetros de ajuste que se observan en el cuadro insertado en la misma. Teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica; en este caso del electrolito, es el inverso de la resistencia, de modo que en la gráfica **c)** se observa el comportamiento de dicha variable en función de la potencia aplicada, cuyo ajuste (línea en color rojo), corresponde con el de un modelo lineal descrito por la ecuación y parámetros del cuadro insertado en la misma.



a)



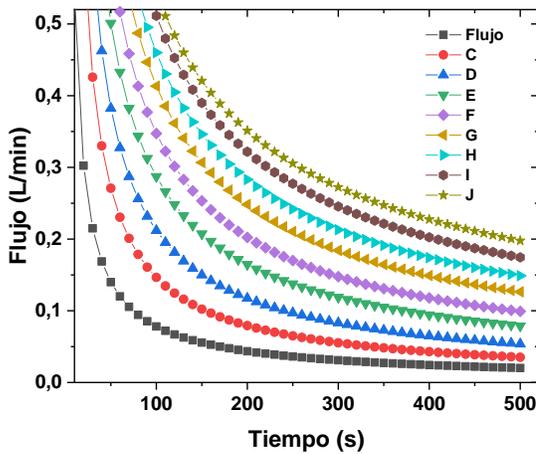
b)



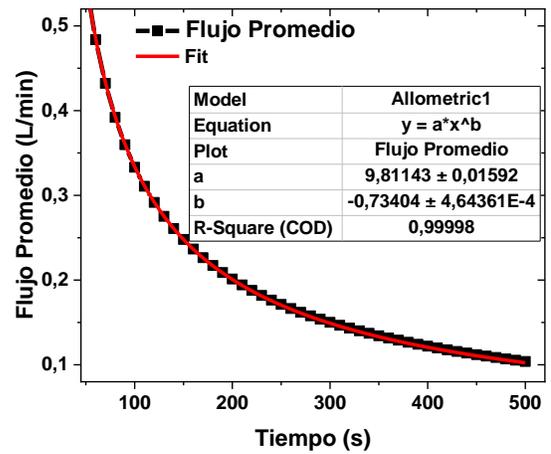
c)

Figura x: a) Cambio de la Corriente (A) necesaria para la generación del gas HHO en función del Voltaje (V) aplicado a la celda. b) y c) Variación de la resistencia y de la conductividad del electrolito, respectivamente, en función de la potencia aplicada a la celda.

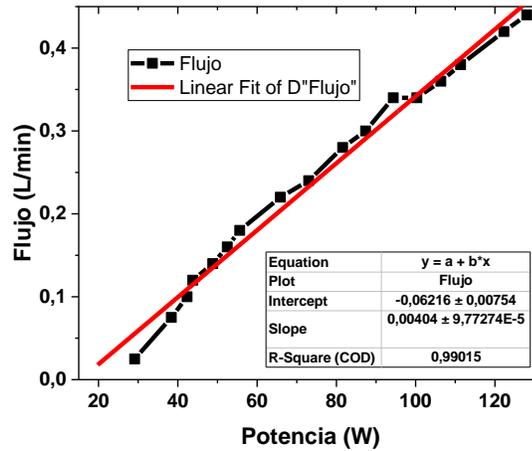
Los gráficos **a)** y **b)** de la Figura Y describen el comportamiento del flujo en función del tiempo para varias mediciones realizadas, y el promedio de dichas mediciones, respectivamente, las cuales se pueden ajustar a un modelo tipo potencial cuya ecuación y parámetros de ajuste están escritos en el recuadro insertado en la gráfica **b)**, y la línea o gráfica de ajuste corresponde a la de color rojo. La gráfica **c)** representa la variación del flujo en función de la potencia aplicada a la celda, la cual describe un comportamiento lineal (línea roja) cuya ecuación y parámetros de ajuste se visualizan en el recuadro insertado en esta.



a)



b)



c)

Figura Y: a) Flujo en función del tiempo para varias mediciones realizadas. b) Gráfica promedio de las mediciones en a) con su respectiva ecuación, parámetros de ajuste y gráfica; en color rojo. c) Flujo con respecto a la potencia aplicada a la celda con su respectiva línea de ajuste; en color rojo, ecuación y parámetros correspondientes a dicho ajuste.

La gráfica **a)** de la Figura z representa el comportamiento de la presión; en pulgadas de mercurio –in Hg–, en función del tiempo para varios ensayos realizados a distintas potencias suministradas a la celda, correspondientes a su vez, a diferentes flujos de HHO generados por la celda y debidamente medidos en el instrumento; rotámetro, utilizado para ello. Se percibe que para la potencia de 115.8 y 88.5 W, correspondientes a flujos del gas HHO de 0.5 y 0.4 L/min, respectivamente, el comportamiento es descrito por un modelo lineal cuyas gráficas de ajuste (color magenta y verde, respectivamente), ecuaciones y parámetros están impresos en los cuadros insertados en dicha gráfica. En las gráficas **b)** de la Figura z se observó que para las potencias de 64.7 y 43.5 W, correspondientes a flujos de 0.3 y 0.2 L/min, respectivamente, las gráficas se ajustan a modelos tipo potencial cuyas líneas de ajuste (color magenta y verde, respectivamente), ecuaciones y parámetros de ajuste se transcriben en el recuadro insertado en la gráfica. En la gráfica **c)** de la misma figura, se observa el comportamiento de la potencia aplicada a la celda en función del tiempo a varias presiones de funcionamiento y el promedio de dichas mediciones; línea en color verde fluorescente, las cuales se pueden describir o ajustar a modelos tipo potenciales, cuya gráfica de ajuste para el promedio de las mediciones; color amarillo, la ecuación y los parámetros del modelo se transcriben en la tabla insertada en la parte superior central de la gráfica.

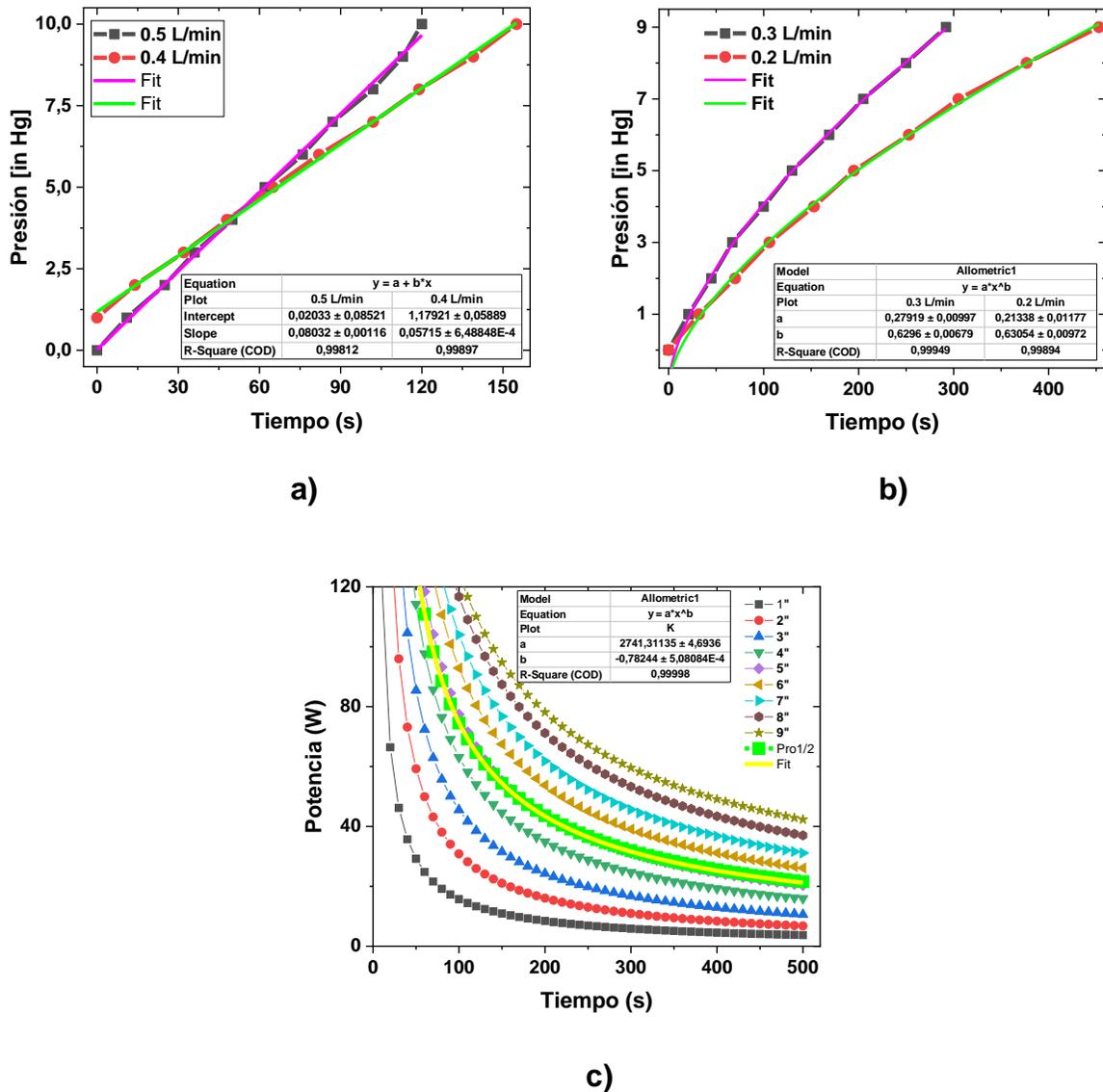


Figura Z: a) y b) Presión en función del tiempo para las mediciones realizadas a flujos de 0.4 y 0.5 L/min, y 0.2 y 0.3 L/min, respectivamente. c) Gráficas de la potencia en función del tiempo a diferentes presiones y del promedio de las mediciones; color verde y ajuste en color amarillo.

La eficiencia de la celda para la producción de HHO como energía térmica utilizable en cualquier aplicación, se calculó con base en las ecuaciones descritas en el apartado 2.3 de este trabajo. De forma resumida, la potencia eléctrica suministrada o consumida por la celda en vatios (energía de entrada –Ce– en los cálculos), se convirtió a Joules al tomar como base de cálculo un tiempo de 1 h. Como energía de salida –Cs– se tuvo en cuenta los flujos de gas producidos por la celda, la capacidad calorífica del gas HHO, y el volumen de gas HHO que se podría generar en la celda en el tiempo base de cálculo.

En la Figura W. se observa la gráfica de la eficiencia en función de la potencia aplicada a la celda a diferentes flujos, el cual corresponde a un comportamiento que se puede modelar mediante una función polinomial de grado 2, cuya ecuación, gráfica de ajuste; en color rojo, y parámetros se encuentran en el recuadro insertado en dicha figura.

Se podría decir que la gráfica no es consecuente con la teoría, ya que a mayor potencia debería presentarse una mayor eficiencia; tal como se observa para el primer tramo de la gráfica para las potencias entre 40 y 70 W aproximadamente, pero este comportamiento anómalo puede estar asociado a las pérdidas o fugas presentes en el depósito del electrolito y a las presentadas en los diferentes acoples y empalmes de todo el montaje realizado, ya que esto fue uno de los principales inconvenientes en el desarrollo de este estudio. Sin embargo, se podría considerar que, a pesar de las dificultades, una eficiencia máxima de 9.5% para un flujo relativamente bajo de 0.3 L/min, está bien para ser un trabajo tipo exploratorio en un dispositivo del cual no se tenía dicho conocimiento.

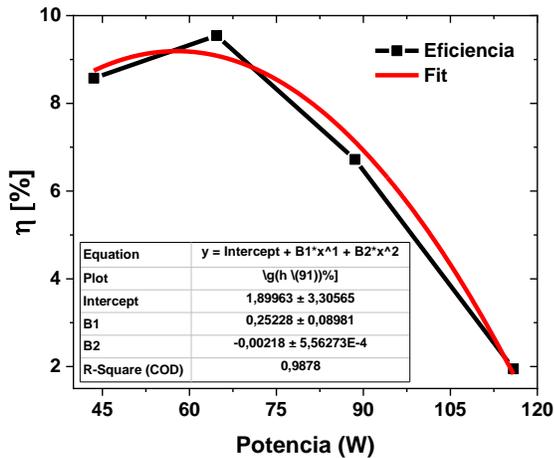


Figura W: Eficiencia de la celda en función de la potencia eléctrica suministrada a esta y la capacidad de convertir el gas HHO en energía térmica útil.

3.1 Ficha técnica

A continuación, se reportan las especificaciones de la celda caracterizada, seleccionando los parámetros para el punto de mayor eficiencia de producción de HHO que se logró.

Parámetros internos		Parámetros físicos	
<i>Potencia eléctrica</i>	64.7 W	<i>Dimensión de celda (LxAxH)</i>	40 cm × 25 cm × 30 cm
<i>Flujo</i>	0.3 LPM	<i>Dimensión de placa</i>	11.5 cm × 11.7 cm
<i>Presión</i>	9 in Hg	<i>Cantidad de placas</i>	6
<i>Eficiencia</i>	9.54%	<i>Área efectiva entre placas</i>	807.3 cm ²

4. Conclusiones y recomendaciones

Existe una relación directa entre el aumento del flujo de H₂ y la potencia suministrada a la celda, controlada por la variación del voltaje, lo cual se refleja en un aumento en la corriente, describiendo un comportamiento lineal, y esto a su vez está directamente relacionado con el aumento de la presión, de modo que, mientras más potencia se suministre a la celda, hay más flujo y presión en el sistema. Con base en los resultados del cálculo de la eficiencia máxima obtenida en la celda (9.5 % aproximadamente), se determinó que la generación de gas HHO puede darse; de acuerdo con las condiciones y estado actual de la celda, en un rango de polarización con un voltaje entre 10 y 11 V, lo cual genera un consumo de entre 5 y 6 A, y una potencia en el rango de 50 a 65 W. Igualmente, para estos rangos la celda produciría un flujo de 0.25 a 0.35 LPM con una presión que puede marcar una altura de 9 pulgadas de mercurio –9 in Hg–.

Para la mayoría de los ajustes a los diferentes modelos utilizados en las distintas gráficas, se encontró un factor de ajuste –R Square (COD)– superior a 0.98, lo que indica que dichos modelos son adecuados para simular los distintos comportamientos de las variables analizadas.

Para algunos de los ensayos se realizaron réplicas, y estas reflejaron un comportamiento similar, lo que indica que las mediciones son repetibles.

Se debe tener en consideración que todas las mediciones se vieron afectadas por las múltiples fugas que presentaba el sistema, teniendo un efecto negativo directo en la eficiencia de la celda.

Para trabajos futuros con esta celda se recomienda hacer un rediseño en el tanque de almacenamiento del electrolito, el sistema de acople para las conexiones de los diferentes dispositivos, colocar sistemas de seguridad y protección, e instrumentar mediante un sistema de sensores y de adquisición de datos para optimizar y mejorar las condiciones de dicho aparato.

Referencias bibliográficas

[1] IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, París. Tomado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

[5] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2022). Energía del hidrógeno. Tomado de: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Energ%C3%ADa_del_hidr%C3%B3geno&oldid=141996885

[2] González, J. R. Q. (2015). El hidrógeno como combustible alternativo en la producción de energía y su implementación en el transporte vehicular. Tomado de: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/853>

[3] Corso, Hugo Luis. (2016). Una mirada a la historia del hidrógeno como combustible. Tomado de: <https://www.cnea.gov.ar/nuclea/handle/10665/1102>

[4] Hyundai Motor Company. (2020). Parte 1: La historia del hidrógeno y su valor. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=Gm4Pekwt1sw>

[5] Sergio Fernández. (2015). La eficiencia del Toyota Mirai comparada con coches eléctricos de baterías. Tomado de: <https://forococheselectricos.com/2015/07/la-eficiencia-del-toyota-mirai-comparada-con-coches-electricos-de-baterias.html>

[6] Juan Francisco Calero. (2021). HABLEMOS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO: ¿Algo revolucionario? Carwow.es. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=gA03mzVWqxM>

[7] Hidrocell. Que es hidrocell. Tomado de: <https://hidrocell.net/#queeshidrocell>

[8] Eva Gutiérrez. (2021). Webinar “Producción de hidrógeno: Retos tecnológicos en electrolizadores de membranas poliméricas”. Tekniker. Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=DUhiXiPEJlk&t=338s>

[9] Rodrigo Vásquez, Felipe Salinas, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2019). Tecnologías del Hidrógeno y Perspectivas para Chile 2019. Ministerio de energía. Edición 2. Tomado de: <https://4echile.cl/publicaciones/tecnologias-del-hidrogeno-y-perspectivas-para-chile-2019/#:~:text=Una%20nueva%20edici%C3%B3n%20del%20libro,Ministerio%20de%20E>

nerg%C3%ADa%20de%20Chile.

[10] Stojić, D.L., Grozdić, T.D., Umićević, B. et al. (2008). *A comparison of alkaline and proton exchange membrane electrolyzers*. Russ. J. Phys. Chem. 82, 1958–1960. Tomado de: <https://doi.org/10.1134/S0036024408110289>

[11] Li, K., Fan, Q., Chuai, H. et al. (2021). *Revisiting Chlor-Alkali Electrolyzers: from Materials to Devices*. Trans. Tianjin Univ. 27, 202–216 . Tomado de: <https://doi.org/10.1007/s12209-021-00285-9>

[12] Amica, G. (2018). Preparación, estudio y optimización de amiduros de litio y magnesio para almacenamiento de hidrógeno. Universidad Nacional de Cuyo. Tomado de: <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/729/>

[13] canalMOTOR. (2020). ¿Cuál es la potencia ideal para un coche?. Tomado de: <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/potencia-ideal-para-el-coche/>

[14] Mazda. Especificaciones del Mazda MX-5. (2022). Tomado de <https://www.mazda.mx/vehiculos/mx-5/especificaciones?version=22MX5ISP&type=all&search=>

[15] Brauns, Jörn & Turek, Thomas. (2020). *Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review*. Processes. Tomado de: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/248>

[16] Rodríguez, H. G. (2022). Vehículos eléctricos en 2022. El Espectador. Tomado de: <https://www.elespectador.com/opinion/columnistas/hernan-gonzalez-rodriguez/vehiculos-electricos-en-2022/>

[17] Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., Hovi, K., Hassan, M. A., & Annuk, A. (2023). *Techno-economic feasibility of hybrid PV/wind/battery/thermal storage trigeneration system: Toward 100% energy independency and green hydrogen production*. Energy Reports, 9, 752–772. Tomado de: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.034>

[18] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2022). *Electrólisis del agua*. Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis_del_agua#:~:text=La%20electr%C3%B3lisis%20del%20agua%20es,conecta%20mediante%20electrodos%20al%20agua.

[19] Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). *Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review*. Materials Science for Energy Technologies, 2(3), 442–454. Tomado de: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

[20] Ramírez Peña, B. (2020). Pilas de combustible en automoción: caracterización experimental en operación dinámica del “New European Driving Cycle” (NEDC). Depósito

de Investigación Universidad de Sevilla. Tomado de:
<https://idus.us.es/handle/11441/103313>

[21] JAVIER BREY. (2022). *La electrólisis como una herramienta clave de la descarbonización del siglo XXI.* H2B2. Tomado de:
<https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/424/JAVIER%20BREY.pdf>