



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Caracterización del comportamiento de las GDL-eCoCell en un electrolizador tipo PEM

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Alejandro Vives Hernández
Director: Jose Javier López Cascales
Codirector: Andrés Jerez Navarro

Cartagena, 9 de septiembre de 2022



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

1. RESUMEN

1.1. Resumen

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Sostenibilidad energética

2.2. El hidrógeno

2.3. Producción de hidrógeno

2.3.1. Termólisis

2.3.2. Electrólisis

2.4. Tipos de electrólisis

2.4.1. Electrólisis de agua alcalina (AWE).

2.4.2. Electrólisis de óxido sólido (SOE).

2.4.3. Celda de electrólisis microbiana (MEC).

2.4.4. Electrólisis del agua de membrana de intercambio protónico (PEM).

2.5. Principio de la electrólisis tipo PEM

2.5.1. Termodinámica

3. EQUIPOS

4. MONTAJE DEL ELECTROLIZADOR

4.1. Partes del electrolizador

4.2. Método para la fabricación de la MEA

4.3. Montajes

5. RESULTADOS

6. CONCLUSIONES

7. BIBLIOGRAFÍA

8. ÍNDICES DE TABLAS Y FIGURAS

8.1. Índice de tablas

8.2. Índice de figuras

1. RESUMEN

1.1. Resumen

Este trabajo tiene como objetivo sentar las bases para la fabricación de electrolizadores tipo PEM, tanto en diseño como en elección de componentes. Así como determinar, en alguna de sus partes, cual es el diseño que mejor rendimiento otorga como producto final.

En este documento se desarrollarán los pasos a seguir para el correcto montaje de un electrolizador tipo PEM, los errores cometidos como los resultados satisfactorios, todo ello plasmado de una manera cronológica y experimental.

En el mismo, se utilizarán componentes característicos de los electrolizadores tipo PEM ya conocidos, como el titanio, pero también utilizaremos componentes desarrollados por la Universidad Politécnica de Cartagena, en este caso GDL (capas de difusión) de fabricación propia y patentadas por la UPCT para comprobar su eficacia y rendimiento.

Este trabajo ha sido desarrollado en su totalidad en la Universidad Politécnica de Cartagena.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Sostenibilidad energética

La política energética mundial está cambiando. Por un lado, tenemos el crecimiento constante de la demanda de energía mundial que, tradicionalmente, ha sido cubierta en su mayoría por combustibles fósiles. (Imagen de la IEA de la demanda energética).

Por otro lado, tenemos el cambio de tendencia en las fuentes de generación de la energía y su impacto social. Las energías renovables ganan cada vez más peso y seguidores en un mundo en el que sentimos insostenible el modelo energético actual. (foto evolución de las energías renovables)

Y lo sentimos, hoy más que nunca, en unos precios desorbitados de la electricidad, debido entre otros factores a la crisis de la COVID-19 y la guerra entre Rusia y Ucrania.

Se puede apreciar este cambio de tendencia por la crisis medioambiental que lleva sufriendo el planeta desde hace años, crisis climática o cambio climático “forzado” por los consumos abusivos de energías no sostenibles ni responsables con nuestro entorno.

Con este escenario son numerosos los estudios e informes que exigen un cambio radical en el estilo de vida y el consumo de energía mundial. Y este cambio tiene un nombre común: Energías Renovables.

La falta de suministro energético, los conflictos bélicos, la dependencia del gas ruso, de los combustibles fósiles y hasta la situación geográfica de nuestro país (isla energética) hacen necesaria una apuesta decidida por las Energías Renovables. Si hay países en el mundo que no dependen de nadie para su abastecimiento, España sin lugar a dudas, es uno de ellos en Energías Renovables.

En este escenario pudiera parecer que la solución es bien sencilla y pasase por un relevo en las fuentes de energía, entre combustibles fósiles y energías renovables, que podría ser la solución a la mayoría de nuestros problemas. Y esto es así, pero no sin antes tener que solucionar el gran problema, al menos actual, de las fuentes de energías renovables: El almacenamiento.

A día de hoy es prácticamente imposible ajustar la producción energética a la demanda utilizando fuentes renovables ya que no disponemos de una manera, al menos efectiva, de almacenamiento.

Es por ello que para hablar de un cambio de generación de la energía y una transición entre fósil y renovable es necesario hablar de vectores energéticos.

Los vectores energéticos, son el paso entre la generación de la energía y el consumo. Son sustancias capaces de almacenar energía de manera controlada para liberarla en otro lugar y momento posterior. Es decir, son formas de almacenar y distribuir la energía, en nuestro caso, renovable.

El hidrógeno, como vector energético, es el complemento perfecto para las energías renovables. Es fácilmente almacenable y transportable y, además, su generación a partir de fuentes renovables hace que sea no contaminante.

2.2 El hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, su símbolo es H, su átomo consta de un solo protón en su núcleo y de un electrón (aunque existen otros dos isótopos, el deuterio que posee un neutrón adicional en el núcleo, y el tritio que posee dos neutrones adicionales), forma una molécula diatómica (H_2) que en condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, es incolora, inodora y no tóxica [*SPIEGEL:2007*].

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, ya que de él están compuestas las estrellas, también es abundante en la superficie terrestre, no obstante, en la tierra solo una pequeña cantidad está en forma de gas hidrógeno (H_2). Como el hidrógeno es el elemento más ligero, esta cantidad de gas se encuentra en algunas capas de la atmósfera debido a las erupciones volcánicas, o bien bajo tierra donde puede encontrarse junto con yacimientos de gas natural [*BUSBY:2005, JODRA:2005*].

La mayor parte del hidrógeno de la superficie terrestre se encuentra formando agua (H_2O), aunque también se puede encontrar formando parte de los seres vivos y algunos minerales. Por tanto, como el hidrógeno molecular no puede obtenerse como otros gases por destilación del aire líquido, se necesita una forma de obtenerlo a partir de otras moléculas que contengan hidrógeno en su composición, como por ejemplo los hidrocarburos o el agua. Si empleamos hidrocarburos, la técnica a emplear se denomina reforming, y consistente básicamente en aplicar altas presiones y temperaturas para provocar la pirolisis de la molécula [*BUSBY:2005*]. Sin embargo, este proceso presenta la desventaja de que la fuente de hidrógeno no sería de naturaleza renovable, y tampoco 100% limpia, al emitirse CO_2 como subproducto del proceso de reformado. Otra alternativa es el empleo del agua para la generación de hidrógeno, mediante la técnica conocida como electrolisis, consistente en el empleo de corriente eléctrica para la ruptura de la molécula de agua generando hidrógeno y oxígeno. Si partimos del agua para producir hidrógeno mediante electrolisis, para luego emplearlo en una pila de combustible, la energía generada por la pila nunca podrá ser mayor a la consumida en el proceso de producción del hidrógeno, es por esto que el hidrógeno no se considera una forma de energía, sino un vector energético (esto quiere decir que es un paso intermedio

entre la generación de la energía y su consumo, es una forma de almacenar y transportar energía) [SPIEGEL:2007, BUSBY:2005].

Densidad	Líquido	0,0709 g/cm ³
	Gaseoso	0,0899 kg/Nm ³
Punto de fusión	-259,1 °C	
Punto de ebullición	-252,7 °C	
Temperatura crítica	-239,8 °C	
Abundancia de Isotopo	1	99,985 %
	2 (Deuterio)	0,015 %
	3 (tritio)	-
Peso atómico	H	1,08 u
Peso molecular	H ₂	2,016 u
Poder calorífico	Inferior	120 MJ/kg
	Superior	141,86 MJ/kg
Límites de explosividad	4,0 – 75,0 % (concentración de hidrógeno en aire)	
	4,5 – 94,0 % (concentración de hidrógeno en oxígeno)	
Límites de detonación	18,3 – 59,0 % (Concentración de hidrógeno en aire)	
	15,0 – 90,0 % (concentración de hidrógeno en oxígeno)	
Temperatura de ignición	Aire	585 °C
	Oxígeno	560 °C
Temperatura de la llama	2207 °C	
Calor de combustión	285,8 kJ/mol	
Capacidad calorífica específica	C _p	14,199 kJ/(kg·K)
	C _v	10,074 kJ/(kg·K)
Coefficiente de difusión:	0,61 cm ² /s	

Tabla 1. Características fisicoquímicas del hidrógeno.

La **Tabla 1.** nos muestra las características químico-físicas más importantes del hidrógeno y algunas de sus características como combustible. El hidrógeno es el gas más ligero que existe con una densidad de 0.0899 kg/Nm³ (Tabla 1.), lo que significa una densidad relativa con respecto al aire de 0.0695, incluso en estado líquido es extremadamente ligero con una densidad de 70.9 kg/m³. Su temperatura de vaporización es de -252.7°C. Esta baja densidad del hidrógeno le confiere un aspecto positivo en relación a su seguridad en el manejo como combustible, ya que, en caso de fuga, el hidrógeno ascenderá al ser menos denso que el aire, lo que reducirá el riesgo de que se produzca la ignición o detonación del mismo. Por otro lado, desde el punto de almacenamiento es un aspecto limitante el empleo del hidrógeno como combustible ya que se requiere un mayor volumen de almacenamiento por unidad de masa. Además, debido a su bajo punto de ebullición, resulta complicado el almacenamiento del hidrógeno en estado líquido como consecuencia de que fácilmente pasa a su estado de

gas, facilitándose la posibilidad de fugas. Por ello, su principal forma de uso y distribución es mediante bombonas a alta presión, para almacenar una mayor masa de hidrógeno en un volumen más reducido [*SPIEGEL:2007*].

El hidrógeno posee un coeficiente de difusión de $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ lo que le permite difundir perfectamente por las capas de difusión de la celda de hidrógeno, también facilita la formación de una mezcla uniforme de hidrógeno/aire y dado su alto grado de expansión (1:250) en caso de producirse una fuga en espacio abierto el hidrógeno se expandirá rápidamente disminuyendo su concentración y reduciendo las posibilidades de una detonación o ignición [*BUSBY:2005*]. El hidrógeno puede reaccionar con el oxígeno para producir agua, no obstante, el hidrógeno es una sustancia poco reactiva a temperatura ambiente, es decir, la cinética de la reacción de formación de agua es demasiado lenta, por ello es necesario introducir un catalizador o bien elevar la temperatura para que la reacción llegue a término [*SPIEGEL:2007, BUSBY:2005*].

En la siguiente tabla (**Tabla 2.**) compararemos algunas de las propiedades del hidrógeno con otros combustibles:

Propiedades	Hidrógeno	Metano	Metanol	Propano	Gasolina	Diesel
M (g/mol)	2.016	16.043	32.04	44.10	107.0	-
Densidad (kg/m ³)	0.0899	0.6682	791	1.865	751	832
Límites de explosividad (%)	4 - 75	5 - 15	6.7 - 36	2.1 - 10.1	1.3 - 7.1	0.6 - 5.5
Air/fuel	34.3	17.2	6.5	15.6	14.6	14.5
T _{Autoignición} (°C)	585	540	385	490	260 - 460	180 - 320
E _{ignición} (MJ)	0.017	0.3	0.14	0.30	0.29	-
P.C superior (MJ/kg)	141.86	55.5	22.9	50.2	47.3	44.8
P.C. inferior (MJ/kg)	120.0	50.0	20.1	46.3	44.0	42.5
T _{LLAMA} (°C)	2207	1914	1870	1925	2307	2327
D.E.G (MJ/kg)	140.4	43.6	20.1	28.3	48.6	33.8
D.E. líquido (MJ/m ³)	8.491	20.920	15.800	23.488	31.150	31.435

Tabla 2. Comparación del hidrógeno con otros combustibles [*SPIEGEL:2007, GUPTA:2009*].

El hidrógeno es una sustancia extremadamente inflamable en un amplio rango de mezclas de combustible/comburente (límites de explosividad), desde un 4- 75% de hidrógeno al aire. El hidrógeno es explosivo cuando su concentración es del 18.3 al 59 % (límites de detonación) (ver **Tabla 2.**), esto justifica las extremas medidas de seguridad que se deben emplear cuando se maneja hidrógeno en espacios cerrados, los límites inferiores de explosividad y detonación son grandes lo cual es positivo cuando se trabaja en espacios abiertos ya que es necesario una mayor cantidad de combustible para la detonación o ignición, y como ya dijimos, debido al grado de expansión y su coeficiente de difusión, el hidrógeno es muy fugable y tiende a reducir su concentración rápidamente en espacios abiertos. El hidrógeno es el combustible que presenta una mayor densidad energética gravimétrica. De hecho, su densidad energética es tres veces más alta que cualquier otro combustible de la **Tabla 2.** Esto significa que el hidrógeno proporciona una gran cantidad de energía por unidad de masa. Sin embargo, en cuanto a la densidad energética (energía por unidad de volumen), el hidrógeno es el combustible que menor energía es capaz de almacenar por unidad de volumen, incluso en estado líquido (8.491 MJ/kg), es el que menor densidad energética tiene de todos los combustibles de la Tabla 2., siendo su densidad energética unas 4 veces menor que la de la gasolina. El hidrógeno posee una baja energía de ignición (energía necesaria para iniciar el proceso de combustión) de tan solo 0.017 MJ (**Tabla 2**). Esta energía de ignición es unas 17 veces más baja que la de otros combustibles como la gasolina que tiene una energía de ignición de 0.29 MJ. Esta característica lo hace ser un combustible peligroso durante su manipulación, ya que cualquier carga estática puede producir su explosión. Pero como contrapunto, el hidrógeno posee una temperatura de autoignición (temperatura necesaria para que un combustible inicie la reacción en cadena de oxidación violenta o combustión en aire sin aporte energético externo) elevada, por lo que es difícil que una mezcla de hidrógeno/aire arda sin aporte energético externo. El hidrógeno forma una llama casi invisible, con una temperatura de llama de 2207°C, que es una temperatura inferior a la del diésel y gasolina, pero superior a la del resto de combustibles de la tabla 2. La velocidad de llama del hidrógeno es de 3.46 m/s en condiciones estequiometrias y es muy superior a la de la gasolina (0.42 m/s) que es del orden de 8 veces menor que la del hidrógeno [*SPIEGEL:2007, GUPTA:2009*].

2.3 Producción de hidrógeno

Tal y como se mencionó en el apartado 2.2., el hidrógeno no se encuentra en cantidades considerables en su forma molecular (H_2), sino que se encuentra formando compuestos más estables, termodinámicamente hablando. Por lo tanto, se necesita un proceso de formación o generación de hidrógeno molecular a partir de una fuente de energía.

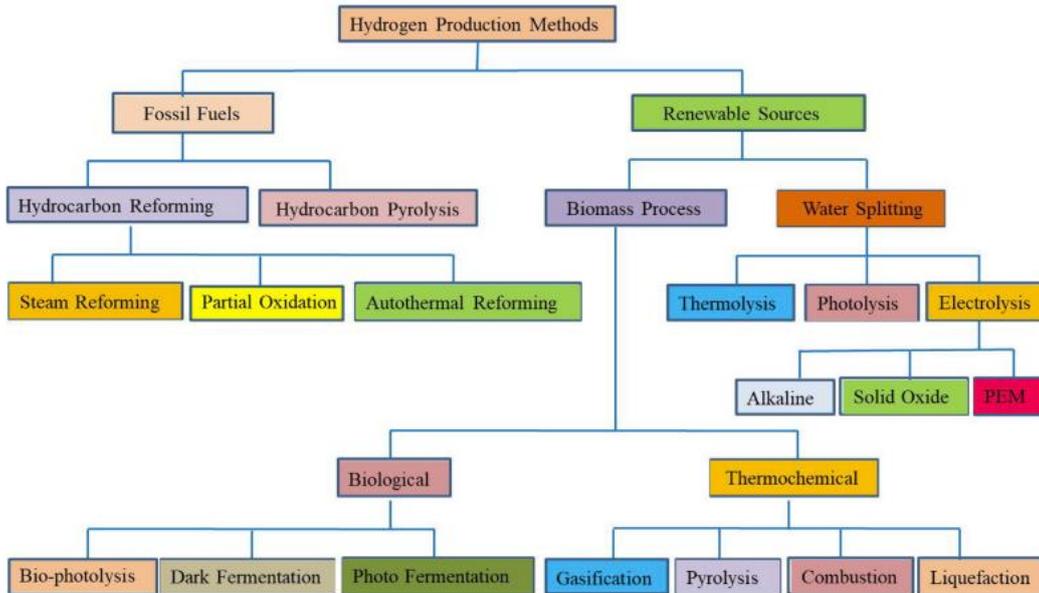


Figura 1. Métodos de producción de hidrógeno [SHIVA:2019]

En la **Figura 1**, se muestran los principales procesos de producción de hidrógeno. La mayoría del hidrógeno se produce mediante reformado de combustibles fósiles, y solo una pequeña parte del hidrógeno producido se obtiene de forma 100% renovable. Esto es debido a que el coste energético que conllevan la electrolisis y la termólisis del agua (que son los procesos 100% renovables y limpios), es mucho mayor que el coste de los métodos no renovables. La producción de hidrógeno mediante procesos biológicos es demasiado lenta, y requiere una gran superficie, generándose CO_2 en el proceso. Nos centraremos en los procesos de fabricación limpios y renovables, a pesar de estos inconvenientes, ya que el objetivo es poder prescindir de los combustibles fósiles con el fin de evitar un impacto negativo sobre el medio ambiente y, además, la asociación española del hidrógeno predice que la electrolisis será la forma de producir hidrógeno a medio plazo mientras los procesos biológicos de producción se perfeccionan.

2.3.1. Termólisis.

La Termólisis del agua consiste en emplear energía térmica para romper la molécula de agua. Este proceso presenta dos inconvenientes: Por un lado, la temperatura necesaria para producir la ruptura de la molécula de agua en átomos de hidrógeno y oxígeno es de 2500°C, lo que implica que los materiales empleados para aislar el sistema deben soportar tal temperatura. Por otro lado, se debe separar el hidrógeno del oxígeno para evitar una mezcla explosiva. No es de extrañar que no exista ninguna planta industrial de producción de hidrógeno que emplee este procedimiento para la producción del hidrógeno [*BUSBY:2005*].

2.3.2. Electrolisis.

La Electrolisis del agua consiste en emplear energía eléctrica para romper la molécula de agua formando hidrógeno y oxígeno, la electrolisis es una técnica eficiente que genera hidrógeno con una elevada pureza, pero requiere grandes cantidades de energía eléctrica la cual tiene un alto coste, y por eso solo se emplea este proceso de fabricación cuando se requiere una alta pureza. El proceso de electrolisis requiere de una serie de etapas, en la primera etapa es necesario un rectificador y un destilador que requiere corriente directa y agua purificada, tras esta etapa se requiere un generador de hidrógeno para realizar la electrolisis, y por último se necesita un compresor para su almacenamiento en los recipientes a presión adecuados [*SPIEGEL:2007, BUSBY:2005*].

2.4 Tipos de electrolisis

Los cuatro tipos de electrolisis son:

- a) electrólisis de agua alcalina (AWE).
- b) Electrólisis de óxido sólido (SOE).
- c) Celda de electrólisis microbiana (MEC).
- d) Electrólisis del agua tipo PEM (membrana de intercambio protónico).

2.4.1. Electrolisis de agua alcalina (AWE)

El hidrógeno producido por la electrólisis alcalina es una tecnología asentada y comercial, se introdujo por primera vez en 1789 por Trostwijk y Diemann.

Las reacciones que tienen lugar en este tipo de electrolisis las podemos ver en la siguiente figura:

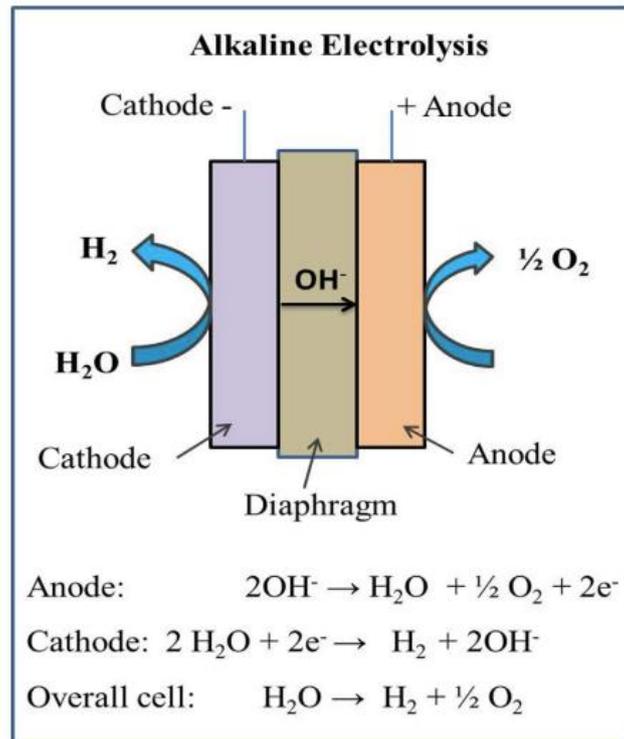


Figura 2. Esquema de la electrolisis Alcalina [SHIVA:2019]

Esta tecnología se basa en sumergir los dos electrodos que se encuentran separados por un diafragma en un electrolito líquido alcalino (KOH/Na). Este diafragma separa también los gases producidos en los electrodos y evita su mezcla.

Es una tecnología simple y barata, de mantenimiento sencillo, ya que no se necesitan metales nobles y es relativamente estable. Se opera a bajas temperaturas (30-80°C) y la concentración del electrolito es del 20-30%.

La electrolisis alcalina tiene aspectos negativos como densidades de corriente limitadas (por debajo de 400mA/cm²), una baja presión de funcionamiento y baja eficiencia energética. Los electrodos se acaban corroyendo después de un número determinado de paradas y puestas en marcha, y no se ajusta a los requerimientos de acumular energía renovable ya que su tiempo de respuesta es elevado. [SHIVA:2019]

2.4.2. Electrólisis de óxido sólido (SOE)

La electrólisis de óxido sólido (SOE) es introducida por primera vez por Donitz y Erdle en la década de 1980. La electrólisis de óxido sólido ha generado mucha atención debido a que la energía eléctrica se convierte en energía química junto con la producción de hidrógeno ultrapuro con mayor eficiencia. La electrólisis de óxido sólido opera a alta presión y altas temperaturas de 500 a 850°C y utiliza el agua en forma de vapor. El proceso de electrólisis de óxido sólido utiliza convencionalmente los

residuales y esta tecnología MEC está estrechamente relacionada con las celdas de combustible microbianas (MFC), pero el principio operativo es inverso al de las MFC.

El primer enfoque de celda de electrólisis microbiana (MEC) es presentado por dos organizaciones de investigación independientes, como la Universidad estatal de Pensilvania y la Universidad de Wageningen, Países Bajos, en 2005. En las celdas de electrólisis microbiana (MEC), la energía eléctrica se convierte en energía química. Los MEC produjeron hidrógeno a partir de materiales orgánicos bajo la influencia de la corriente eléctrica. En el proceso de electrólisis microbiana, inicialmente en el lado del ánodo, los microbios oxidan el sustrato y luego producen CO_2 , protones y electrones. Los electrones se mueven a través del circuito externo hacia el lado del cátodo y los protones viajan hacia el cátodo a través de una membrana conductora de protones (electrolito), mientras que los protones y electrones combinados producen el hidrógeno. La **Figura 4** muestra el principio de MEC. El proceso MEC produce cierto potencial electroquímico durante la oxidación en el lado del ánodo que es insuficiente para reducir el voltaje requerido para la reacción de evolución del hidrógeno en el lado del cátodo, por lo que requiere un voltaje adicional (0,2 V–1,0 V).

Por lo tanto, el proceso MEC requiere una pequeña cantidad de voltaje externo en comparación con la electrólisis del agua. Sin embargo, esta tecnología MEC aún está en desarrollo y tiene varios desafíos en cuanto a la tasa de producción de hidrógeno, la alta resistencia interna, los materiales de los electrodos y el diseño complicado que deben abordarse antes de la comercialización de esta tecnología. [SHIVA:2019]

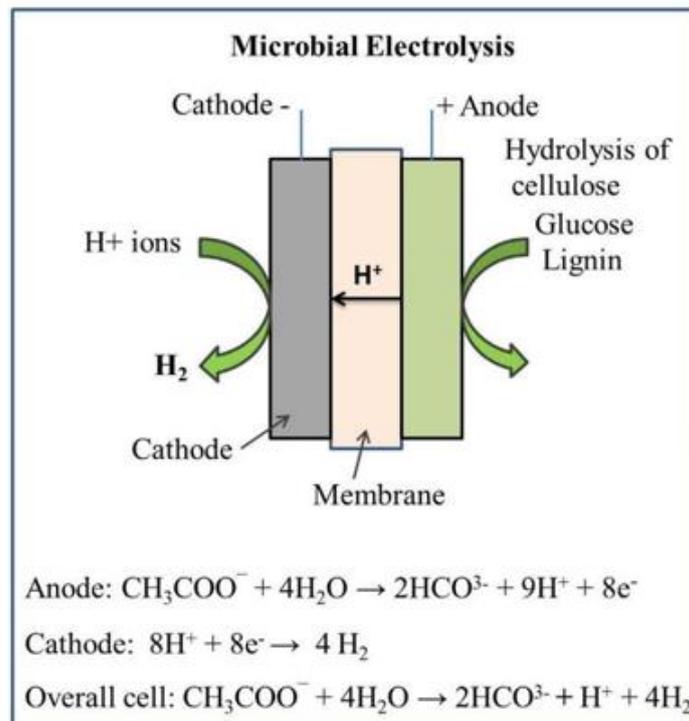


Figura 4. Esquema de la electrólisis microbiana [SHIVA:2019]

2.4.4 Electrólisis de agua PEM

La primera electrólisis de agua PEM fue idealizada por Grubb a principios de los años cincuenta y General Electric Co. fue desarrollada en 1966 para superar los inconvenientes de la electrólisis de agua alcalina. La tecnología de electrólisis de agua PEM es similar a la tecnología de celdas de combustible PEM, donde se utilizan membranas sólidas polisulfonadas (Nafion, Fumapem) como electrolito (conductor de protones). Estas membranas de intercambio de protones tienen muchas ventajas, como menor permeabilidad a los gases, alta conductividad de protones ($0,1 \pm 0,02 \text{ S cm}^{-1}$), menor espesor ($20\text{--}300\mu\text{m}$) y operaciones de alta presión. En términos de sostenibilidad e impacto ambiental, la electrólisis del agua PEM es uno de los métodos más favorables para la conversión de energía renovable en hidrógeno de alta pureza. Otra ventaja de la electrólisis de agua PEM es que tiene un diseño compacto, alta densidad de corriente (por encima de 2A/cm^2), alta eficiencia, respuesta rápida, tamaño reducido, opera en temperaturas más bajas ($20\text{--}80^\circ\text{C}$) y produce hidrógeno de alta pureza y también produce oxígeno como un subproducto. Además, equilibrar las plantas de electrólisis PEM es muy simple, lo cual es más atractivo para aplicaciones industriales.

Los electrocatalizadores de última generación para electrólisis PEM son de alta actividad, de metales nobles como Pt/Pd en el cátodo y de IrO₂/RuO₂ en el ánodo, lo que hace que sea más caro que la electrólisis de agua alcalina. Por lo tanto, uno de los principales desafíos en la electrólisis del agua PEM es el de reducir los costes de producción y mantener la alta eficiencia. Desde entonces, se ha focalizado la investigación en este sentido con el objetivo de acercarse a los mercados comerciales.

2.5 Principio de la electrólisis del agua tipo PEM

En la electrólisis del agua PEM, el agua se divide electroquímicamente en hidrógeno y oxígeno en sus respectivos electrodos, hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. Esta electrólisis se acumula por bombeo de agua al ánodo donde se convierte en oxígeno (O₂), protones (H⁺) y electrones (e⁻). Estos protones viajan a través de la membrana conductora hacia el lado del cátodo. Los electrones salen del ánodo a través del circuito de alimentación externo, que proporciona la fuerza impulsora (voltaje de celda) para la reacción.

En el lado del cátodo, los protones y los electrones se vuelven a combinar para producir el hidrógeno, el siguiente mecanismo, como se muestra en la **Figura 5**.

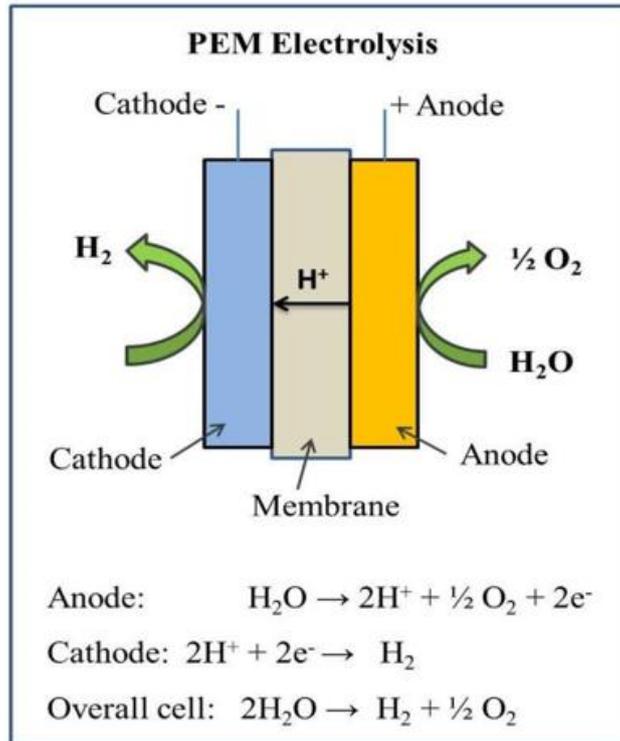


Figura 5. Esquema de la electrolisis tipo PEM [SHIVA:2019]

Una de las partes fundamentales en esta electrólisis es a lo que se denomina MEA (Membrane Electrode Assembly), y que corresponde al conjunto formado por las capas de difusión (GDL), las capas de catalizador y la membrana protónica, aquí es donde se llevará a cabo la reacción química.

La capa porosa de difusión de gas, también conocida como capa difusora o GDL (Gas Difusión Layer) asegura que los reactivos se difundan efectivamente a la capa de catalizador. Además, es el conductor eléctrico que transporta electrones hacia la capa de catalizador. Típicamente, las capas de difusión de gas están construidas de papel carbón poroso con un espesor en el rango de 100 a 300 μm . Esta capa también ayuda en la gestión del agua al permitir que una cantidad adecuada de agua alcance y se mantenga en la membrana para su hidratación. Además, las capas de difusión de gases suelen estar a prueba de humedad con un recubrimiento de PTFE (teflón) para garantizar que los poros de la capa de difusión de gas no se congestionen con agua líquida. [LISTER:2004], [BARRERAS & LOZANO:2012].

Las capas de difusión (GDL) utilizadas en este trabajo son las fabricadas y patentadas por la Universidad Politécnica de Cartagena y unas GDL de titanio, que veremos en más adelante en las partes de nuestro electrolizador (**Figura 22**) y que son las usadas en la mayoría de electrolizadores, nos servirán para comparar los resultados entre ellas.

La membrana protónica, se encuentra en contacto a ambos lados con las capas de difusión (GDL). En nuestro experimento, el catalizador se ha depositado sobre la propia membrana y sobre la GDL en la parte que tiene contacto con la membrana. Un aspecto

clave en la correcta fabricación de la MEA es alcanzar un buen contacto entre la superficie catalizada, el electrodo y la membrana protónica, con el fin de favorecer que los protones atraviesen la membrana protónica y los electrones el conductor externo.

Como hemos comentado anteriormente, es necesario introducir un catalizador para conseguir que la reacción tenga lugar en unas condiciones satisfactorias. En nuestro caso, utilizaremos platino en el cátodo, por su resistencia tanto a la oxidación como a la corrosión y óxido de iridio en el ánodo.

Cabe destacar el uso del Óxido de Iridio (IrO_2) como catalizador para el ánodo ya que es en el ánodo en donde la cinética de la reacción resulta más lenta y, como consecuencia, la eficiencia de la electrolisis se ve perjudicada. Destaca como catalizador para la OER (oxygen evolution reaction) y su uso predomina en los electrolizadores tipo PEM a pesar de su elevado coste y escasez. [TAKAHIRO:2021]

2.5.1 Termodinámica

El agua de la electrólisis se divide en hidrógeno y oxígeno, para esta división del agua se requiere algo de energía y al mismo tiempo libera energía durante la formación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Por lo tanto, la energía mínima requerida para la división del agua se puede calcular a partir de la Energía libre de Gibbs (ΔG), ecuación (1).

$$\Delta G = nFE_{\text{rev}} \quad (1)$$

Dónde:

- n = número de electrones involucrados.
- $F = 96500$ (constante de Faraday).
- E_{rev} = Voltaje reversible.

El voltaje reversible se puede calcular mediante la siguiente ecuación. (2).

$$E_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{nF} = 1.23\text{V} \quad (2)$$

Sin embargo, en el momento de la división del agua se genera cierta entropía, por lo tanto, es más adecuado emplear entalpía (ΔS) en lugar de ΔG para el cálculo del potencial. En las condiciones estándar, el cambio de entalpía es $\Delta H = 285.84 \text{ kJ mol}^{-1}$ y el cambio de la entalpía libre de Gibbs es $\Delta G = 237,22 \text{ kJ mol}^{-1}$. Por lo tanto, el voltaje mínimo requerido (VTN) para la electrólisis del agua se puede calcular siguiendo la ecuación (3).

$$V_{\text{TN}} = \frac{\Delta H}{nF} = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{T\Delta S}{nF} = 1,48\text{V} \quad (3)$$

Dónde:

- VTN = voltaje termo neutro
- ΔS = cambio en la entropía
- T = temperatura

Y, por último, podemos calcular la eficiencia de los electrolizadores aplicando la siguiente ecuación (4).

$$\mu = (1,48 / V_{\text{el}}) \cdot (i_{\text{el}} - i_{\text{loss}}) / i_{\text{el}} \quad (4)$$

Dónde:

- i_{el} = densidad de corriente (A/cm^2)
- i_{loss} = pérdida de corriente e hidrógeno, siendo aproximadamente cero

Considerando que V_{el} está en el rango de 1,6-2V (dependiendo de la densidad de corriente) los rendimientos de los electrolizadores están en torno al 80%.
[SPIEGEL:2007]

3. EQUIPOS

A continuación, enumeramos los equipos utilizados en el presente trabajo:

- 3.1. Balanza OHAUS PIONEERTM PA-114C: balanza de 110g de capacidad y sensibilidad 0,0001g, utilizada para pesar la GDL antes y después de la aplicación de la tinta con el catalizador.



Figura 6. Balanza OHAUS PIONEERTM PA-114C.

- 3.2. - Pie de rey digital Velox/Storm: Pie de rey con precisión de 0.01mm, utilizado para medir el grosor de las GDL y así poder adecuar las juntas adecuadamente.



Figura 7. Pie de rey digital.

- 3.3. Compresor de 1/5 HP de potencia y aerógrafo: usado para la aplicación del catalizador sobre la GDL mediante una tinta.

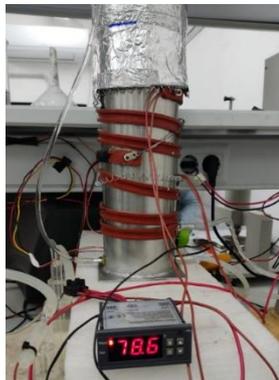


Figura 8. Compresor y aerógrafo

3.4. Fuente de alimentación Tenma para la aplicación adecuada de la tensión en nuestros ensayos y medir de manera precisa las curvas de polarización.

**Figura 9.** Fuente de alimentación Tenma.

3.5. Depósito de agua termostataada: para conseguir una temperatura homogénea en todas las partes de nuestro ensayo y poder realizarlo a diferentes temperaturas.

**Figura 10.** Resistencias con sensores de temperatura.

3.6. Multímetro KAISE para medir el correcto apriete del ensayo sin que haya comunicación eléctrica.



Figura 11. Multímetro digital KAISE

3.7. Ultrasonidos Ulsonix para homogeneizar las tintas fabricadas para la aplicación del catalizador.



Figura 12. Ultrasonidos Ulsonix.

3.8. Campana y placa calefactora: utilizadas a la hora de la aplicación del catalizador con el aerógrafo.



Figura 13. Campana FlowTronic con placa calefactora.

4. MONTAJE DEL ELECTROLIZADOR

A continuación, describiremos las partes y los diferentes montajes y métodos que hemos usado para nuestro electrolizador.

4.1 Partes del electrolizador

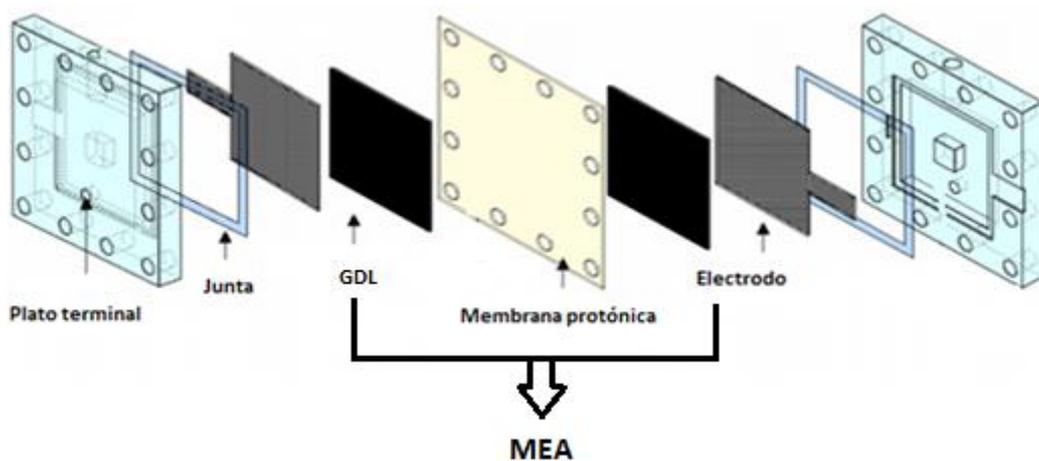


Figura 14. Electrolizador tipo PEM visto en partes. (Martínez Espinosa, H. Estudio de la corrosión de difusor de gases, Tesis de doctorado, Centro de investigación científica del Yucatán)

4.1.1 Plato terminal de metacrilato o titanio:

En la **Figura 15**, podemos observar el plato terminal que utilizamos en nuestros primeros experimentos. Este plato terminal, de metacrilato, tiene hechos los agujeros simétricos para la colocación de la tornillería que forman la carcasa de nuestro electrolizador. En su interior colcaremos de manera ordenada el resto de componentes de nuestro electrolizador.



Figura 15. Plato terminal de metacrilato.

El plato se tuvo que sustituir por otro de titanio, como el de la **Figura 16**, ya que la tensión que se realiza en el apriete provocaba la rotura del mismo.

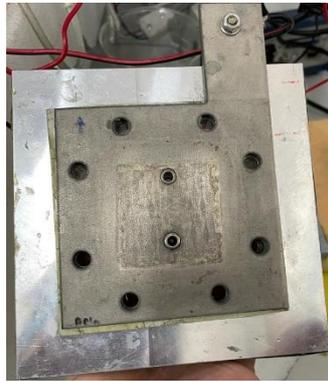


Figura 16. Plato terminal de titanio.

4.1.2 Electrodo metálico

Como punto de distribución eléctrica utilizamos electrodos de acero inoxidable al comienzo de nuestro experimento, observando cómo se iba oxidando conforme aumentábamos el potencial en nuestros experimentos. Finalmente se optó por utilizar mallazos de titanio para los sucesivos experimentos.



Figura 17. Mallazo de titanio.

4.1.3 Juntas

En la **Figura 18**, podemos observar las juntas que se utilizan en el experimento. Son de silicona y se necesitan de diferentes grosores para obtener una conductividad adecuada sin llegar a perforar la membrana protónica en el apriete.

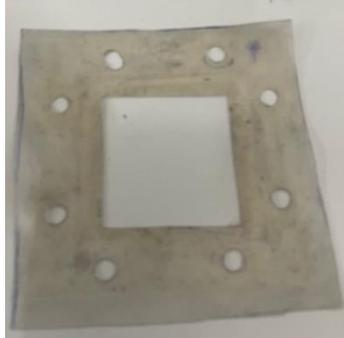


Figura 18. Junta de silicona.

4.1.4 Aislamiento eléctrico

También utilizamos a modo de aislante para los tornillos unos aislantes de plástico que fueron sustituidos ya que conforme avanzaban los experimentos vimos que la subida de temperatura en los ensayos los hacía poco resistentes, es por ello que terminamos utilizando Nylon como el de la **Figura 19**.

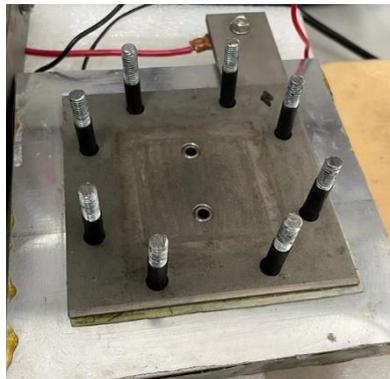


Figura 19. Aislantes de Nylon para tornillería.

4.1.5 Placa calefactora

Con el fin de estudiar el comportamiento del electrolizador a diferentes temperaturas desarrollamos una placa calefactora termostatada como la que se observa en la **Figura 20** y que se añadirá en los extremos, sobre el plato terminal.

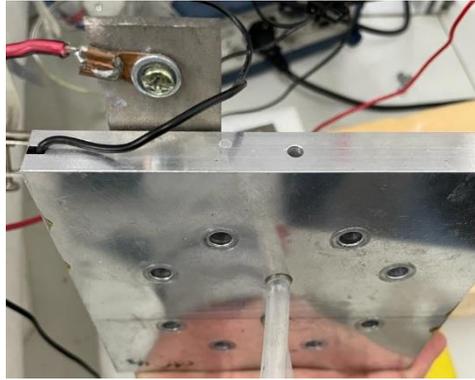


Figura 20. Placas de Aluminio.

4.2 Método para la fabricación de la MEA

MEA (Membrane Electrode Assembly), corresponde al conjunto formado por la capa de difusión (GDL) y la membrana protónica, aquí es donde se llevará a cabo la reacción química como ya vimos en la introducción.

4.2.1 Capa de difusión

Las capas de difusión (GDL) utilizadas en este trabajo son las fabricadas y patentadas por la Universidad Politécnica de Cartagena (**Figura 21**) y utilizamos también unas GDL de titanio (**Figura 22**) que son las usadas en la mayoría de electrolizadores comerciales y que nos servirán para comparar los resultados entre ellas (**Figura 23**).

En la **Figura 21** se pueden observar dos GDL de la Universidad de Cartagena, una MPL (capa micro-porosa), ésta se realiza empleando una mezcla de celulosas y fibras de vidrio como matriz porosa a la que se le puede añadir una mezcla de carbon black, grafito y fibras de vidrio. La otra es una MPL+MPS y su principal diferencia con la MPL es que la MPL+MPS lleva carbón y por tanto los poros son más pequeños, mejorando la porosidad debido a la capa de carbón aplicada sobre la MPL.

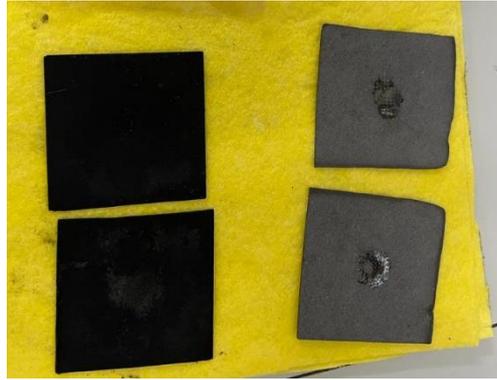


Figura 21. GDL de la Universidad Politécnica de Cartagena.



Figura 22. GDL de titanio.

4.2.2 Método para la aplicación del catalizador

En nuestro experimento se han utilizado dos catalizadores, platino para el cátodo e iridio para el ánodo. El procedimiento para su aplicación consiste en preparar una “tinta” a base de alcohol isopropílico (IPA), agua y nafión. La tinta para el platino se compone de un 95% de IPA, un 3,5% de agua y 1,5% de nafión. Para el Iridio la tinta se preparó con un 99% de IPA y un 1% de nafión [KOK:2007]. Esta tinta, la hemos aplicado sobre la membrana protónica o sobre la GDL. El método de aplicación que utilizamos para comenzar fue con pinceles pero, durante su aplicación, se producía la ruptura de la membrana por lo que finalmente se optó por utilizar un aerógrafo y así proyectar de manera uniforme sobre la superficie de la membrana.

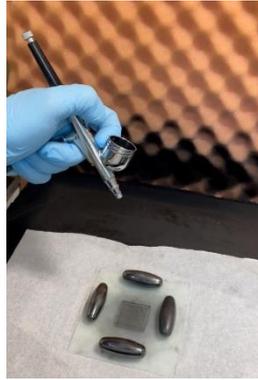


Figura 23. Método para deposición del catalizador mediante aerografía.

El montaje de la MEA consistirá en unir los electrodos (GDL) de forma que estos estén en lados opuestos de la membrana protónica y con las superficies catalizadas en contacto con la membrana protónica. En la **Figura 24**, podemos ver una la imagen de una MEA generada siguiendo el proceso anteriormente descrito.

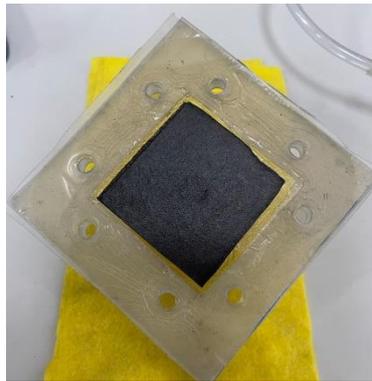


Figura 24. Montaje de la MEA.

4.3 Montajes

A continuación, procedemos a describir los montajes que se fueron realizando a lo largo de este TFM, desde su inicio, basado en estudios preliminares, hasta llegar a conseguir un montaje final basado en el aprendizaje a lo largo del tiempo.

En la **Figura 25**, podemos observar el primer montaje que se realizó del electrolizador. Podemos ver dos depósitos con agua conectados a ambos lados del electrolizador (ánodo y cátodo) por donde saldrán tanto el hidrógeno como el oxígeno.

El electrolizador lleva conectado además una fuente de alimentación.



Figura 25. Ejemplo de montajes del electrolizador (I)

El uso de dos depósitos de agua fue uno de los primeros cambios que se realizaron en estos montajes debido a la humedad que obteníamos como resultado en el gas producto de la electrolisis.

Una vez se realizó el primer montaje, teníamos que comenzar a realizar ensayos a diferentes temperaturas, para ello, realizamos algunas pruebas de montaje para conseguir que tanto el electrolizador como el agua de nuestros recipientes consiguieran una temperatura de ensayo lo más homogénea posible.

En las **Figura 26** y **27** podemos observar el primer ensayo con temperatura de nuestro electrolizador.



Figura 26. Ejemplo de montajes del electrolizador (II)

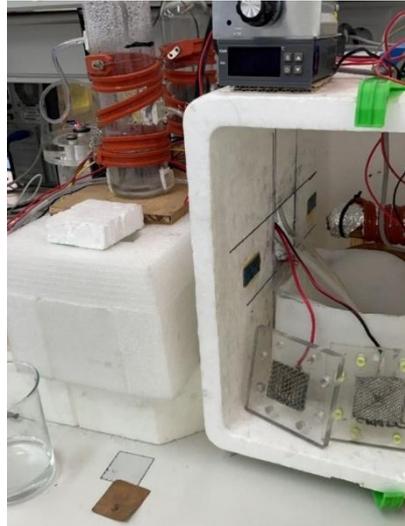


Figura 27. Ejemplo de montajes del electrolizador (III)

Tras varios ensayos fuimos mejorando y corrigiendo los errores que nos iban surgiendo, así como aprendiendo la mejor manera de montar lo que denominaríamos Montaje final del electrolizador, que podemos observar en la **Figura 28**.

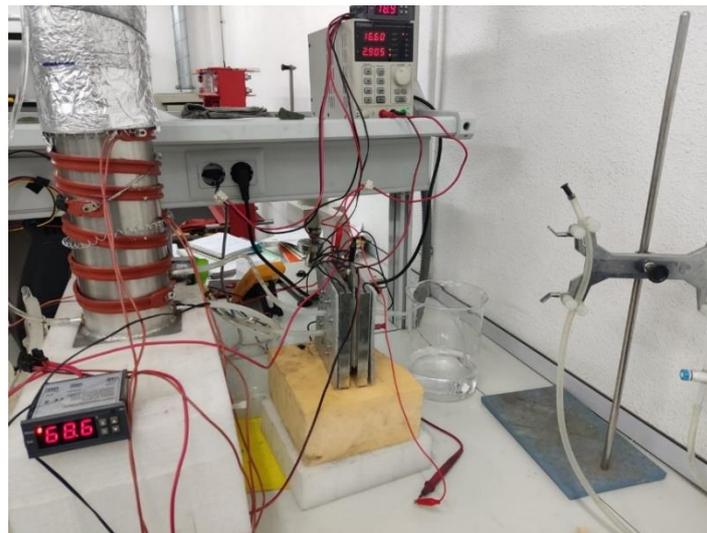


Figura 28. Montaje final del electrolizador.

En este montaje final vemos como únicamente tenemos un depósito con agua, que alimentará la zona del ánodo, dónde obtendremos oxígeno por la parte superior, e hidrógeno en el cátodo como producto de la electrólisis, también por la parte superior.

En este montaje final, el electrolizador ya cuenta con la placa calefactora para homogeneizar la temperatura dentro del electrolizador, el depósito de agua termostatada, las placas de titanio, la MEA con la aplicación del catalizador en la membrana y todos los componentes que hemos descrito anteriormente y que concluyen en este “Montaje final del electrolizador”.

5. RESULTADOS

En este quinto apartado vamos a describir los resultados de los diferentes ensayos que realizamos con nuestro electrolizador, para ello definiremos previamente el montaje realizado, así como los elementos usados, la cantidad de catalizador y las zonas de aplicación del mismo. Definiremos las condiciones del mismo e iremos comentando los cambios realizados entre ensayos.

Ensayo 1:

Para este primer ensayo realizamos el montaje del electrolizador con los dos depósitos con agua tanto para el hidrógeno como para el oxígeno, como se describió en la **Figura 25**.

Las partes del electrolizador fueron:

- A) Las dos GDL utilizadas son de titanio, ya que este ensayo fue el primero de todos y buscábamos acercarnos lo máximo posible a los estudios realizados previamente. Los mallazos que se utilizan para este experimento son de acero inoxidable.
- B) La membrana utilizada es la Nafion 117, esta membrana es lo suficientemente gruesa para no romperse por el apriete a la hora del montaje y lo suficientemente fina para que tengamos una conductividad óptima.
- C) La aplicación del catalizador, mediante el uso de tinta, se realiza sobre la membrana con un área circular de 3cm de diámetro.
- D) Se aplica en total 1,5mg/cm² de Iridio en el ánodo y 0,6mg/cm² de Pt en el cátodo. Estas cantidades vienen determinadas por los estudios previos anteriormente citados y que optimizan el uso o los usos de catalizador en electrolizadores.
- E) Las juntas utilizadas tienen un grosor de 2.5mm.
- F) Se deja activar el electrolizador conectado a la fuente durante 24h a 80°C.

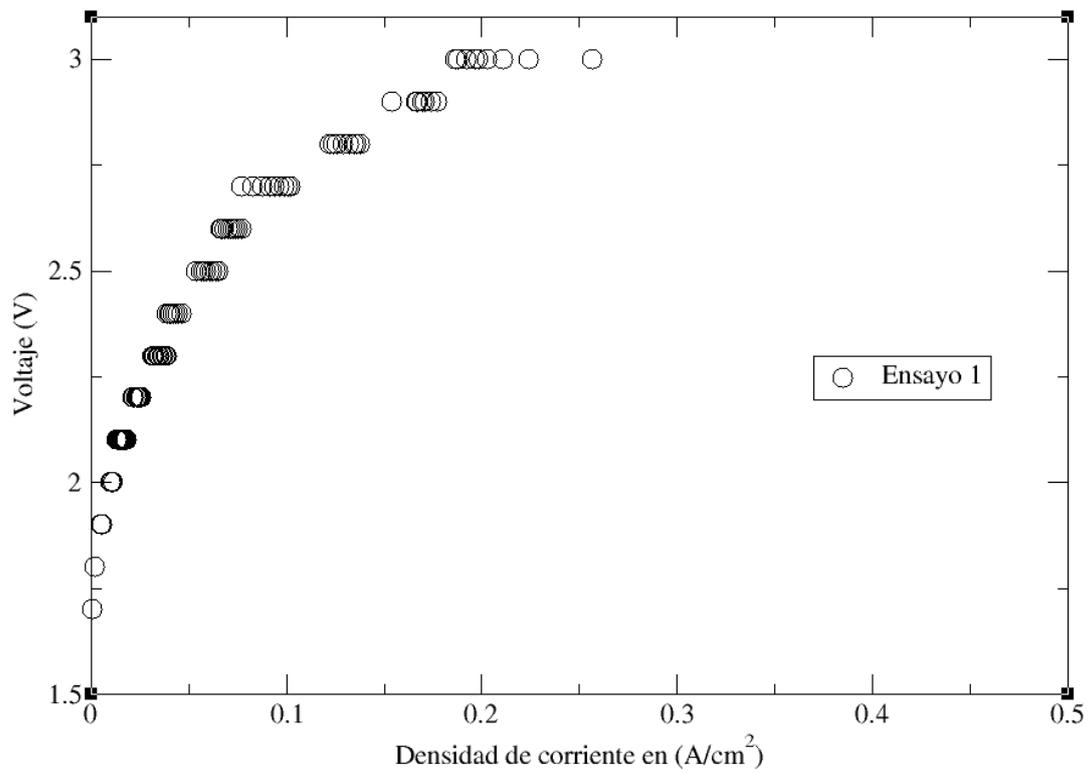


Figura 29. Curva de polarización del Ensayo 1

Podemos observar como tenemos que irnos a altos valores de voltaje para que el electrolizador se active y comience a producirse la reacción. Observamos también en este ensayo que nuestros mallazos de acero inoxidable se oxidaron en la parte del cátodo.

Ensayo 2:

En este segundo ensayo realizamos el montaje del electrolizador con los dos depósitos con agua tanto para el hidrógeno como para el oxígeno, como se describió en la **Figura 25**.

Las partes del electrolizador fueron:

- A) Una GDL es de titanio para el ánodo, como en el ensayo anterior, pero en este caso vamos a realizar un cambio y usaremos para la otra GDL una MPS (395) sin propiedades hidrofóbicas en el cátodo y usaremos mallazos de titanio, ya que observamos que los de acero inoxidable se oxidan a potenciales más elevados y mantenidos en el tiempo.
- B) La membrana utilizada continúa siendo la Nafion 117.
- C) La aplicación del catalizador, mediante el uso de tinta, se realiza sobre la membrana y en este caso sobre una superficie rectangular de 9cm², que será el área que utilizaremos desde este ensayo en todos los demás, ya que permite una mejor aplicación del catalizador.
- D) Se aplica en total 1,5mg/cm² de Iridio y 0,6mg/cm² de Pt, como en el ensayo anterior.
- E) Las juntas utilizadas tienen un grosor de 2,5mm, como en el ensayo anterior.
- F) Se deja activar 24h a 80°C, como en el ensayo anterior.

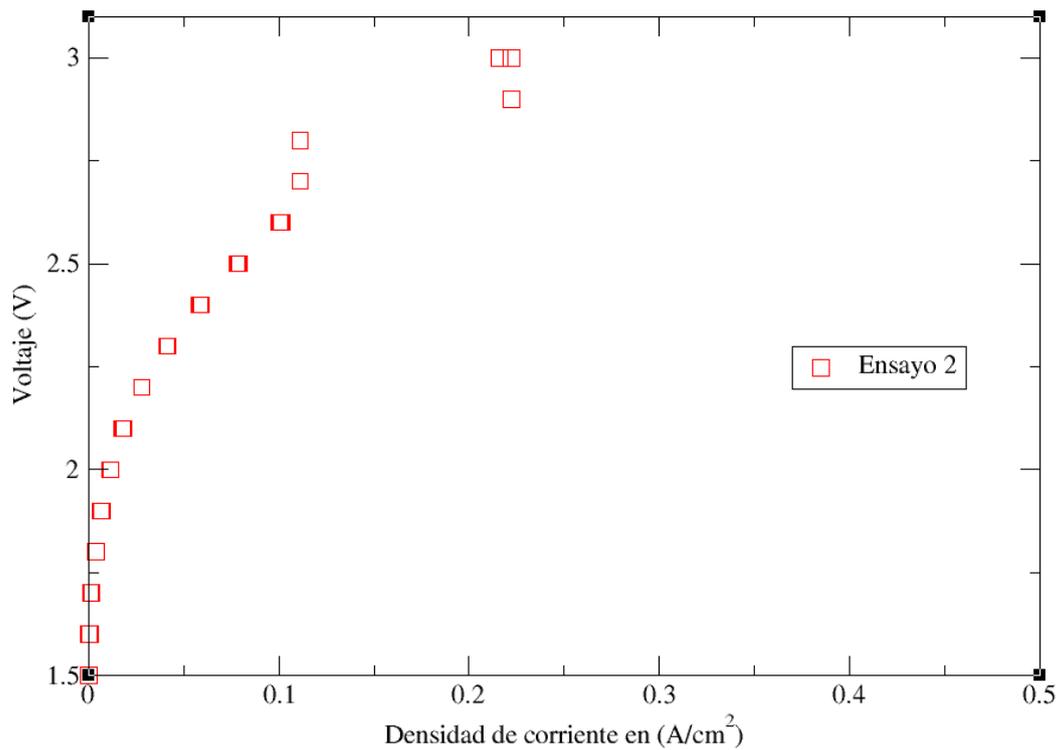


Figura 30. Curva de polarización del Ensayo 2.

En este segundo ensayo, seguimos observando que necesitamos altos valores de voltaje, pero en este caso ya no se produce oxidación en ninguna de las partes del electrolizador. Asimismo, se observa mal funcionamiento del electrolizador, al igual que en el ensayo 1, debido en gran parte al catalizador y a un montaje que se aleja todavía del óptimo.

Ensayo 3:

En este tercer ensayo, tras varios experimentos de montaje, se realiza el montaje del electrolizador final, es decir, el montaje al que llegamos después de todos los ensayos citados en este trabajo y que se puede ver en la **Figura 28**.

Las partes del electrolizador fueron:

- A) La GDL de titanio para el ánodo con mallazo de titanio se mantendrá en el resto de ensayos. La otra GDL es MPS 395 sin propiedades hidrofóbicas en el cátodo y mallazo de titanio, como en el ensayo número 2.
- B) La membrana utilizada es la Nafion 117, membrana que no nos ha causado ningún tipo de problema durante los ensayos y que permite una conductividad óptima para nuestros ensayos.
- C) La aplicación del catalizador se realiza sobre la GDL de titanio (Iridio-Ánodo) y se pinta sobre la membrana en el lado del Cátodo con Platino. Ambas con una superficie rectangular de 9cm². En este caso probamos una aplicación de catalizador para el lado del ánodo diferente ya que estábamos viendo una activación baja por parte del catalizador.
- D) Se aplica en total 1,5mg/cm² de Iridio y 0,6mg/cm² de Pt, como en los ensayos anteriores.
- E) Las juntas utilizadas tienen un grosor de 2,5mm, como en los ensayos anteriores.
- F) Se deja activar 24h a 80°C, como en los ensayos anteriores.

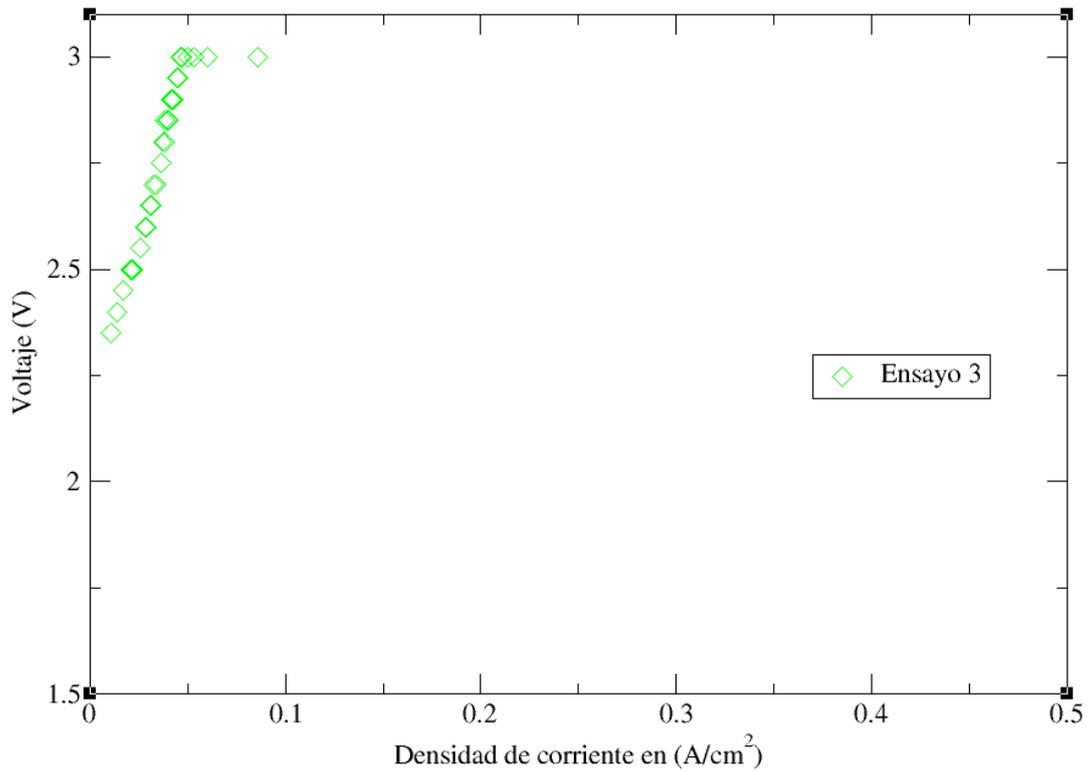


Figura 31. Curva de polarización del Ensayo 3.

En este tercer ensayo, con montaje final, no observamos ninguna mejora con respecto a los ensayos anteriores, uno de los motivos estaba en la aplicación del catalizador sobre la GDL y no sobre la membrana, como veremos en experimentos posteriores.

Ensayo 4:

En este cuarto ensayo, seguimos realizando el montaje del electrolizador final, es decir, el que podemos ver en la **Figura 28**.

Las partes del electrolizador fueron:

- A) Una GDL es de Titanio en el ánodo con mallazo de titanio y la otra GDL es MPL sin hidrofugante con mallazo de titanio en el cátodo. Para este ensayo decidimos usar una GDL con carbón, ya que al contener carbón como sustrato buscábamos un mejor contacto del catalizador y una mejora sustancial en la difusión de gases. La intención es estudiar como se comportan estos electrolizadores cuando la GDL lleva hidrofugante y cuando no lo lleva para comprobar el efecto que tiene sobre nuestros resultados.
- B) La membrana utilizada es la Nafion 117, como en los ensayos anteriores.
- C) La aplicación del catalizador es sobre la membrana tanto para el cátodo como para el ánodo con una superficie rectangular de 9cm².
- D) Se aplica en total 2mg/cm² de Iridio y 0,6mg/cm² de Pt, en este caso comenzamos a aplicar más catalizador en el ánodo, ya que estábamos observando una baja activación por lo que decidimos aumentar la cantidad de Iridio aplicado.
- E) Las juntas utilizadas tienen un grosor de 2,5mm, al igual que en los ensayos anteriores.
- F) Se deja activar 24h a 80°C, al igual que en los ensayos anteriores.

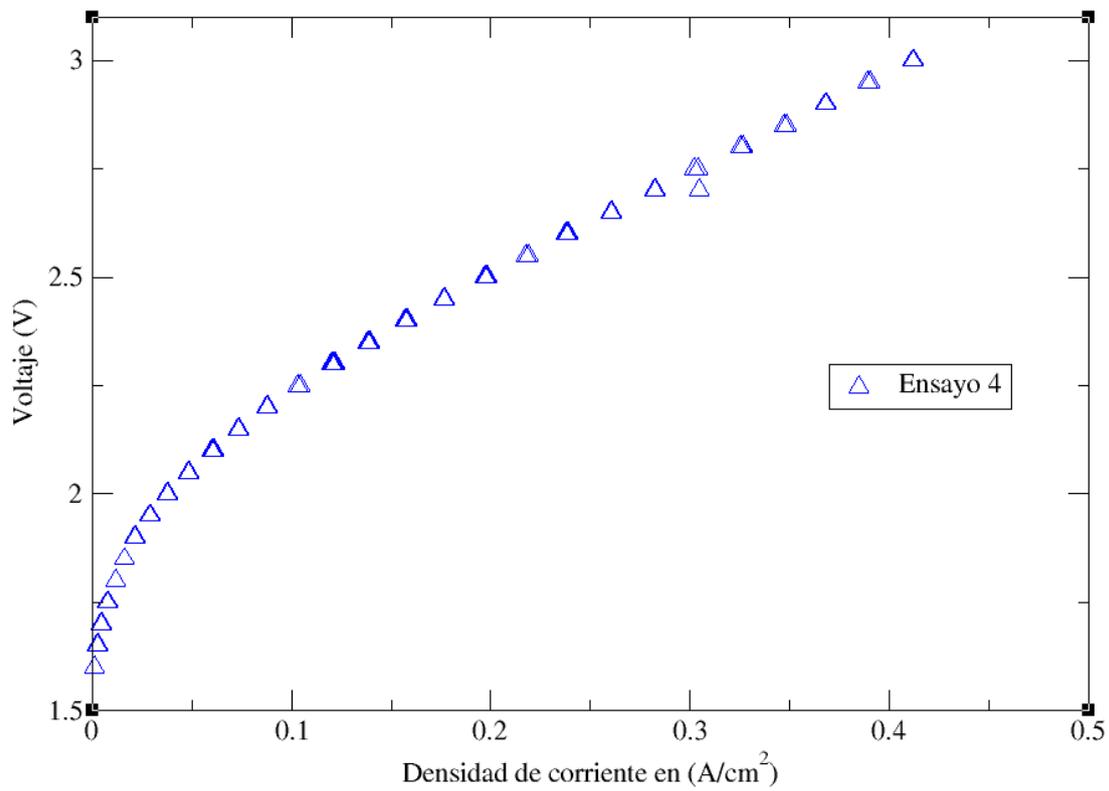


Figura 32. Curva de polarización del Ensayo 4.

En este cuarto ensayo se puede observar una mejora notable con respecto a los ensayos anteriores. Apreciamos una activación a lo largo del tiempo del electrolizador, pero los potenciales utilizados continuaban siendo demasiado elevados.

Ensayo 5:

En este cuarto ensayo, seguimos realizando el montaje del electrolizador final, es decir, el que podemos ver en la **Figura 28**.

Las partes del electrolizador fueron:

- A) Las GDL fueron las mismas que en el ensayo número 4, una GDL es de titanio en el ánodo con mallazo de titanio y la otra GDL compuesta por MPS+MPL, en este caso con hidrofugante y con mallazo de titanio en el cátodo.
- B) La membrana utilizada es la Nafion 117, como en los ensayos anteriores.
- C) La aplicación del catalizador es sobre la membrana tanto para el cátodo como para el ánodo con una superficie rectangular de 9cm², como en los ensayos anteriores.
- D) Se aplica un total de 2mg/cm² de Iridio y 0,6mg/cm² de Pt, como en el ensayo anterior.
- E) Las juntas utilizadas tienen un grosor de 2,5mm, como en los ensayos anteriores.
- F) Se deja activar 24h a 80°C, como en los ensayos anteriores.

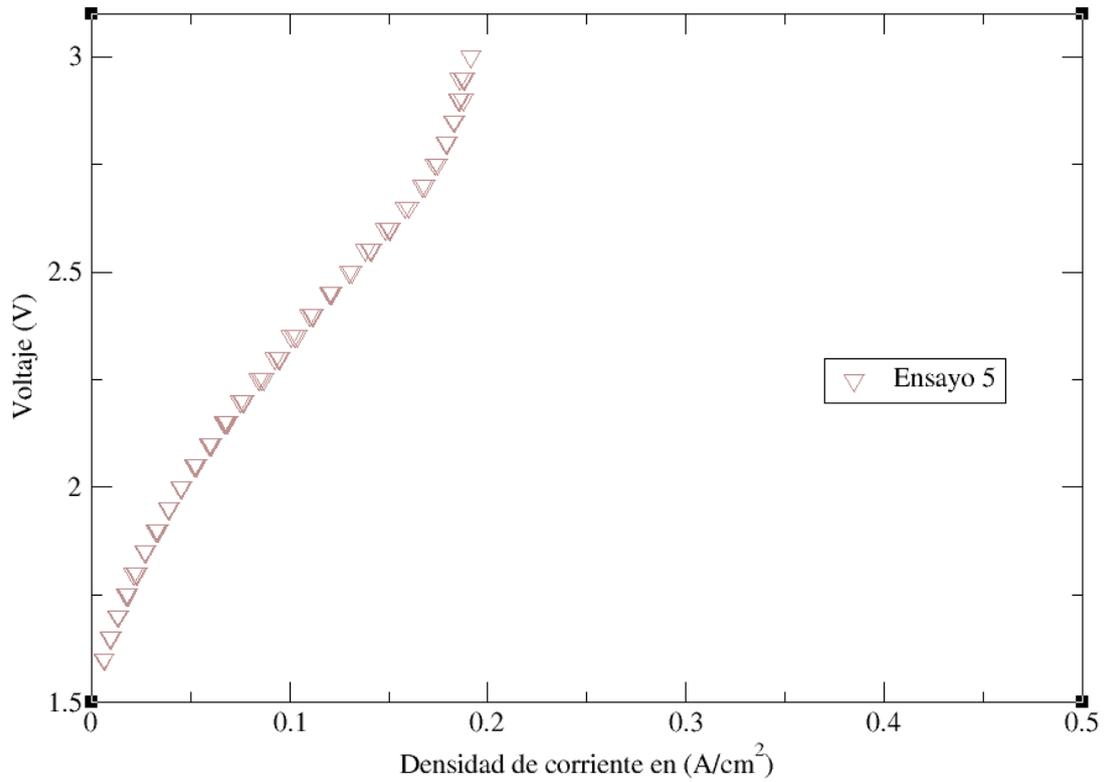


Figura 33. Curva de polarización del Ensayo 5.

Podemos observar, en este quinto ensayo en el que únicamente cambiamos la aplicación de hidrofugante en el cátodo si afecta de manera negativa al resultado. Podemos ver como no hay una activación progresiva del electrolizador y reduciéndose la eficiencia del mismo.

Conjunto de los ensayos:

A continuación, vemos en la **Figura 35** superpuestos los cinco ensayos realizados:

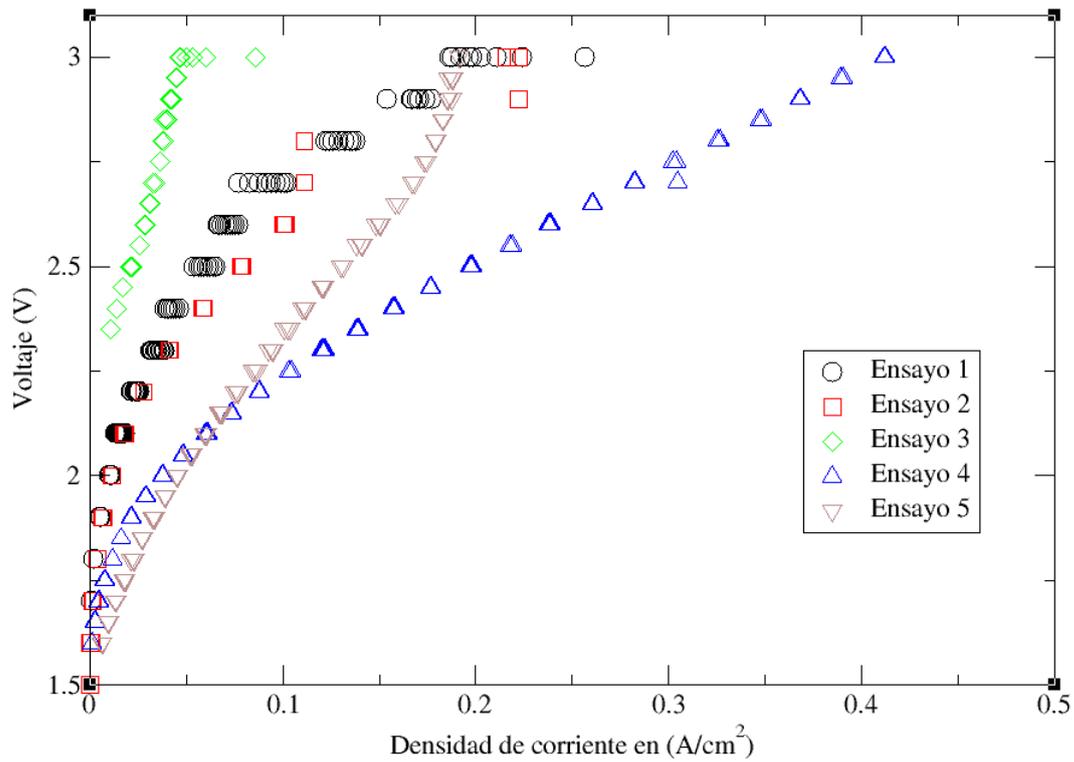


Figura 34. Curvas de polarización de todos los ensayos.

Vemos como resultado el avance de los ensayos y los diferentes montajes, así como los cambios que se han ido realizando sobre las diferentes partes del catalizador.

Para finalizar, observamos como el Ensayo 4, es el ensayo que más se acerca al electrolizador que buscamos, pero muy alejados todavía de resultados convincentes.

6. CONCLUSIONES

La base de este trabajo era la de caracterizar las GDL eCo-Cell en electrolizadores tipo PEM. Pero la realidad de este trabajo, que partía de cero y, a pesar de que los resultados obtenidos se han alejado de los resultados esperados, ha servido como prototipo para lo que serán los futuros ensayos en electrolizadores tipo PEM del a Universidad Politécnica de Cartagena, ya que podemos concluir que se ha obtenido un montaje válido para el estudio de la hidrólisis. Este montaje ya está siendo utilizado a día de hoy por alumnos y alumnas de la Universidad Politécnica de Cartagena.

También destacar, gracias al estudio “Recent advances in understanding oxygen evolution reaction mechanisms over iridium oxid”, utilizado en este trabajo, descubrimos que el principal problema de nuestros experimentos se encontraba en el catalizador, Óxido de Iridio (IrO_2) suministrado por la empresa Alfa Aesar (*Iridium IV oxide powder*).

Es por ello que los primeros ensayos tras este TFM fueron los de comparar estos mismos ensayos con un catalizador de otro proveedor y que se adecuase a las características que se pedían. Obteniendo unos resultados mucho más cercanos a los resultados que se esperaban obtener como se puede observar en la **Figura 35**.

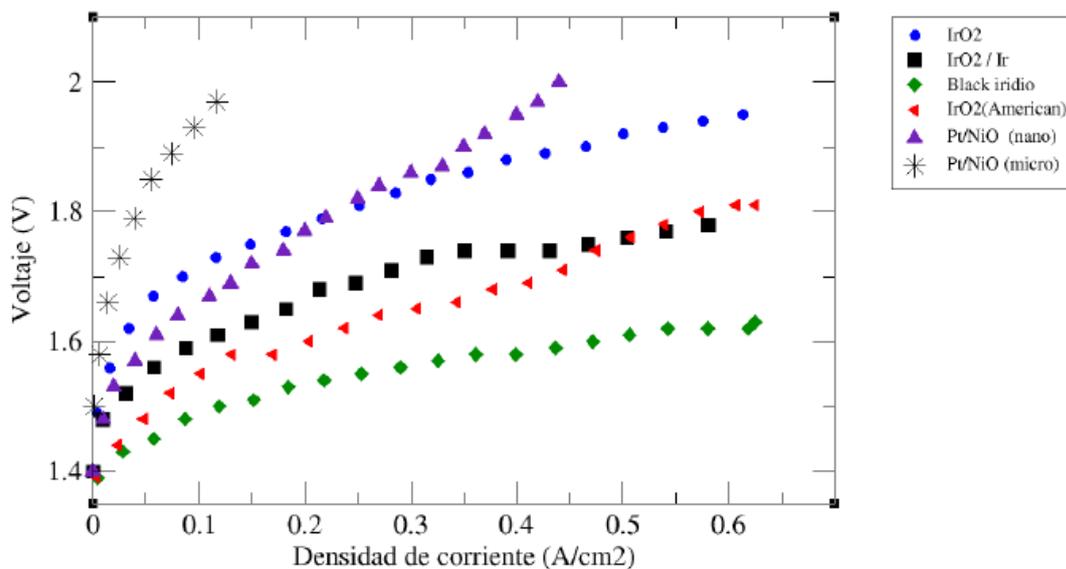


Figura 35. TFM de la UPCT de Daniela Lorena Canelas Montaña

7. BIBLIOGRAFIA

[**BUSBY:2005**] R.L. Busby “Hydrogen and fuel cells”, Penwell-store, 2005.

[**GUPTA:2009**] Ram B. Gupta, “Hydrogen fuel: production, transport, and storage”, CRC Press, 2009.

[**JODRA:2005**] Luis Gutiérrez Jodra, “El hidrógeno, combustible del futuro”, Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales, 2005.

<http://www.rac.es/ficheros/doc/00447.pdf>

[**KOK:2007**] Poh Chee Kok, “Fabrication of membrane-electrode assembly for polymer electrolyte membrane fuel cell”, national university of singapore, 2007.

[**LISTER:2004**] S. Litster and G. McLean “PEM fuel cell electrodes”, J. of Power Sources 130, 61-76, 2004.

[**SPIEGEL:2007**] Colleen Spiegel, “Designing and building fuel cells, McGraw-Hill, 2007.

[**SHIVA:2019**] S. Shiva Kumar, V. Himabindu, “Materials Science for Energy Technologies” Volume 2, Issue 3, pages 442-454, December 2019.

[**TAKAHIRO:2021**] Takahiro Naito, Tatsuya Shinagawa, Takeshi Nishimoto and Kazuhiro Takanabe, “Recent advances in understanding oxygen evolution reaction mechanisms over iridium oxide”, Inorganic Chemistry frontiers, Volume 8, number 11, 7 June 2021.

[**BARRERAS & LOZANO:2012**] Barreras, F., & Lozano, A. Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM. 2012 www.energia2012.es

8. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

8.1 Índice de tablas

Tabla 1. Características fisicoquímicas del hidrógeno

Tabla 2. Comparación del hidrógeno con otros combustibles

8.2 Índice de figuras

Figura 1. Métodos de producción de hidrógeno

Figura 2. Esquema de la electrolisis Alcalina

Figura 3. Esquema de la electrolisis de óxido sólido

Figura 4. Esquema de la electrolisis microbiana

Figura 5. Esquema de la electrolisis tipo PEM

Figura 6. Balanza OHAUS PIONEERTM PA-114C.

Figura 7. Pie de rey digital.

Figura 8. Compresor y aerógrafo

Figura 9. Fuente de alimentación Tenma.

Figura 10. Resistencias con sensores de temperatura

Figura 11. Multímetro digital KAISE

Figura 12. Ultrasonidos Ulsonix

Figura 13. Campana FlowTronic con placa calefactora

Figura 14. Electrolizador tipo PEM visto en partes

Figura 15. Plato terminal de metacrilato.

Figura 16. Plato terminal de titanio

Figura 17. Mallazo de titanio

Figura 18. Junta de silicona.

Figura 19. Aislantes de Nylon para tornillería.

Figura 20. Placas de Aluminio.

Figura 21. GDL de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Figura 22. GDL de titanio.

Figura 23. Método para deposición del catalizador mediante aerografía

Figura 24. Montaje de la MEA.

Figura 25. Ejemplo de montajes del electrolizador (I)

Figura 26. Ejemplo de montajes del electrolizador (II)

Figura 27. Ejemplo de montajes del electrolizador (III)

Figura 28. Montaje final del electrolizador

Figura 29. Curva de polarización del Ensayo 1

Figura 30. Curva de polarización del Ensayo 2

Figura 31. Curva de polarización del Ensayo 3

Figura 32. Curva de polarización del Ensayo 4

Figura 33. Curva de polarización del Ensayo 5

Figura 34. Curvas de polarización de todos los ensayos

Figura 35. TFM de la UPCT de Daniela Lorena Canelas Montaña