

Diseño de un electrolizador alcalino para la generación de hidrógeno

Maycol Andrey Tavera Aguilar y Juan José Bogoya Rodríguez

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida, permitiéndome avanzar con determinación hacia la culminación de esta meta. A mis padres, María Elvira Rodríguez Castro y José Bogoya Pinilla cuyo amor incondicional, apoyo inquebrantable y enseñanzas han sido la base de mi formación tanto personal como profesional, su sacrificio y dedicación han sido mi mayor inspiración para continuar adelante. A todas las personas que hicieron parte de este proceso de formación, desde mis profesores y compañeros, hasta aquellos amigos y seres queridos que, con sus palabras de aliento, su orientación y su compañía, aportaron a mi crecimiento académico y humano.

Juan José Bogoya Rodríguez

Le doy gracias a Dios por acompañarme a lo largo de mi vida, por ayudarme a afrontar cada problema que se ha presentado y permitirme salir adelante. A mis padres, Diego Alexander Tavera González y Nohemy Aguilar Sánchez, y a mis hermanos, Brayan Tavera Aguilar y Nahomy Tavera Aguilar, por su apoyo incondicional y por darme fuerzas cada vez que me sentía desanimado en mi camino académico. Agradezco a mis profesores por compartir sus conocimientos y ayudarme a ser un mejor profesional. En especial, al profesor Yesid Javier Rueda Ordoñez y al profesor David Alfredo Fuentes Díaz, quienes me guiaron con paciencia y dedicación cuando enfrenté dudas y percances durante mi proceso de desarrollo como estudiante. A mi compañero de tesis, Juan José, quien siempre estuvo a mi lado en los momentos más difíciles, trabajando arduamente para sacar adelante este proyecto, y a Dianys Vanessa Mercado Guerra, por su valioso apoyo en el desarrollo del proyecto y por ayudarnos a encontrar conocedores del tema que nos guiaron en este camino. Finalmente, a mis compañeros, quienes siempre estuvieron dispuestos a brindarme una mano amiga, haciendo de este camino una experiencia más alegre y gratificante.

Maycol Andrey Tavera Aguilar

Agradecimientos

A nuestro director de Tesis Yesid Javier Rueda Ordoñez, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación durante este proceso. A los profesores de la Universidad Industrial de Santander, quienes contribuyeron en nuestra formación profesional con su conocimiento y ejemplo.

A nuestros compañeros y amigos, quienes con su apoyo y compañía hicieron de este camino una experiencia más llevadera y enriquecedora.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos las herramientas y el espacio para crecer académicamente, y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron su conocimiento y apoyo para la realización de este trabajo.

Al Tecnoparque Nodo Bucaramanga por brindarnos herramientas materiales y apoyo para la realización este trabajo.

Tabla de contenido

Introducción	13
1 Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Alcances	15
1.4 Limitaciones	16
2 Marco teórico	17
2.1 Hidrógeno.....	17
2.2 Electrólisis.....	18
2.3 Principios energéticos de los electrolizadores.....	20
2.4 Tipos de electrolizadores.....	23
2.5 Electrolizador alcalino.....	23
2.6 Electrolizador PEM.....	24
2.7 Electrolizador SOE.....	25
2.8 Electrolizador AEM	26
2.9 Comparación entre los distintos tipos de electrolizadores	27
2.10 Modelo matemático de un electrolizador alcalino	29
2.11 Curva v-i característica de un electrolizador alcalino	30

3	Marco metodológico	31
3.1	Diseño de la celda electrolítica.....	31
3.1.1	Materiales	33
3.1.2	Diseño mecánico	34
3.1.3	Diseño eléctrico.....	35
3.2	Construcción de la celda	36
3.2.1	Electrolito	37
3.3	Pruebas de operación de la celda.....	39
3.4	Producción de hidrógeno.....	40
3.4.1	Producción de hidrógeno ideal	40
3.4.2	Relación de Faraday y Producción Ideal de Hidrógeno	41
3.4.3	Eficiencia teórica y real.....	42
3.4.4	Producción de hidrógeno real.....	42
4	Diseño experimental.....	43
4.1	Propósito del diseño	43
4.2	Variables.....	44
4.2.1	Concentración de electrolito.....	44
4.2.2	Potencia eléctrica.....	44
4.2.3	Eficiencia energética	45

4.3	Metodología	46
5	Pruebas experimentales y resultados	48
5.1	Producción de hidrógeno vs corriente	48
5.2	PRUEBAS DE RENDIMIENTO DE LA CELDA.....	49
5.3	PRUEBAS RESPECTO A LA CONCENTRACION	51
5.4	PRUEBAS RESPECTO A LA CANTIDAD DE CELDAS.....	57
6	Conclusiones	61
	Referencias bibliográficas	63
	Apéndices	66

Lista de figuras y gráficas

Figura 1 Esquema básico de un electrolizador	19
Figura 2 circuito eléctrico básico del proceso de electrólisis	21
Figura 3 Esquema de un electrolizador alcalino.	24
Figura 4 Esquema de un electrolizador tipo PEM.....	25
Figura 5 Esquema de electrolizador de tipo SOE	26
Figura 6 Esquema básico de un electrolizador AEM	27
Figura 7 Curva característica V-I típica de un electrolizador alcalino a baja y alta temperatura.(Daoudi & Bounahmidi, 2024)	31
Figura 8 Diagrama de actividades	31
Figura 9 Esquema de los componentes del electrolizador	33
Figura 10 Celda electrolítica	35
Figura 11 conexión eléctrica	36
Figura 12 <i>montaje final de la celda</i>	37
Figura 13 Medidor de volumen de gas.....	46
Figura 14 corriente vs caudal, mezcla 25% 5 celdas.....	49
Figura 15 corriente vs eficiencia mezcla 25% 5 celdas.....	51
Figura 16 Corriente Vs voltaje, comparacion de la Mezcla 25%	52
Figura 17 Corriente Vs voltaje, comparacion de la Mezcla 15%.....	53
Figura 18 Caudal VS Corriente Mezcla 25% con 3 Celdas	54
Figura 19 Caudal VS Corriente Mezcla 25% con 3 Celdas	55
Figura 20 Eficiencia Vs Amperaje Mezcla del 25% 3 Celdas	56
Figura 21 Eficiencia Vs Amperaje Mezcla del 15% 3 Celdas	57

Figura 22 Corriente vs Voltaje Comparacion de Cantidad de celdas	58
Figura 23 Corriente vs Caudal Comparacion de Cantidad de celdas	59
Figura 24 Corriente vs Eficiencia Comparacion de Cantidad de celdas	60

Lista de tablas

Tabla 1 Fuentes de producción mundial de hidrógeno	18
Tabla 2 Comparaciones de rendimiento entre alcalino, PEM con agua pura y electrólisis directa de agua de mar	20
Tabla 3 Características de diferentes tipos de electrolizadores	27
Tabla 4 Compuestos para electrolito	38
Tabla 5 Diseño experimental.....	47

Lista de apéndice

Apéndice A piezas del prototipo del electrolizador	66
Apéndice B Datos de la mezcla al 25% y una configuración de 3 celdas.....	67
Apéndice C Datos de la mezcla al 15% y una configuración de 3 celdas.....	69
Apéndice D Datos de la mezcla al 25% y una configuración de 5 celdas	72
Apéndice E Plano de ensamble de todas las piezas del electrolizador.....	75
Apéndice F Plano de la base del electrolizador.....	76
Apéndice G Plano de la tapa del tanque.....	77
Apéndice H Plano de la tapa del tanque.....	78
Apéndice I Plano de los separadores de los tanques de almacenamiento.	79
Apéndice J Plano de la tapa del electrolizador.....	80
Apéndice K Plano del empaque separador de las placas	81
Apéndice L Plano de las placas positiva y negativa.....	82
Apéndice M Plano de las placas neutras	83
Apéndice N Plano del refuerzo de las tapas del electrolizador	84

Resumen

Título: Diseño de un electrolizador alcalino para la generación de hidrógeno*

Autor: Maycol Andrey Tavera Aguilar y Juan José Bogoya Rodríguez**

Palabras clave: Electrolizador alcalino, Hidrógeno, electrolito, transición energética, diseño.

Descripción: El hidrógeno, por sus propiedades como vector energético, destaca por su capacidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial aplicación en sectores como el transporte, la industria química y la generación de energía. Este trabajo se centra en el diseño, construcción y caracterización de un prototipo experimental de electrolizador alcalino capaz de producir entre 0,5 y 1 litro de hidrógeno por minuto.

La metodología implementada determinó la selección de materiales resistentes a la corrosión, como acero inoxidable para los electrodos y acrílico para la estructura, además del uso de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. Se realizaron pruebas experimentales bajo condiciones controladas, variando la concentración del electrolito (15% y 25%) y evaluando configuraciones de 3 y 5 celdas. Estas pruebas permitieron medir el caudal de hidrógeno producido, la eficiencia energética del sistema y su estabilidad operativa, tomando en cuenta factores como la corriente, el voltaje y la temperatura.

Los resultados indicaron que una concentración de electrolito del 25% ofrece mayor eficiencia energética y un mayor caudal de producción en comparación con la del 15%, debido a su mayor conductividad iónica. Por otro lado, el sistema de 5 celdas mostró un incremento significativo en la producción de hidrógeno respecto al de 3 celdas, aunque esto implicó un mayor consumo energético por el incremento del voltaje requerido. Asimismo, se evidencia una relación lineal entre la corriente aplicada y el caudal producido, con una ligera disminución de la eficiencia del sistema al aumentar la corriente debido al sobrecalentamiento del electrolito y las pérdidas energéticas.

En conclusión, el prototipo diseñado demuestra ser una alternativa viable para la producción experimental de hidrógeno verde, destacándose como una solución accesible para futuras aplicaciones en el ámbito industrial y energético. Este proyecto no solo aporta al conocimiento técnico en el área de electrólisis alcalina, sino que también promueve el desarrollo de tecnologías que facilitan la transición hacia un modelo energético más sostenible, alineado con los objetivos globales de reducción de emisiones contaminantes.

*Trabajo de Grado

**Facultad de ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Design of an alkaline electrolyze for hydrogen generation*

Author: Maycol Andrey Tavera Aguilar and Juan José Bogota Rodríguez**

Keywords: Alkaline electrolyze, Hydrogen, electrolyte, energy transition, design.

Description: Hydrogen, due to its properties as an energy vector, stands out for its ability to reduce greenhouse gas emissions and its potential applications in sectors such as transportation, the chemical industry, and energy generation. This work focuses on the design, construction, and characterization of an experimental prototype of an alkaline electrolyze capable of producing between 0.5 and 1 liter of hydrogen per minute.

The implemented methodology determined the selection of corrosion-resistant materials, such as stainless steel for the electrodes and acrylic for the structure, in addition to the use of potassium hydroxide (KOH) as the electrolyte. Experimental tests were conducted under controlled conditions, varying the electrolyte concentration (15% and 25%) and evaluating configurations of 3 and 5 cells. These tests made it possible to measure the hydrogen flow rate, the energy efficiency of the system, and its operational stability, taking into account factors such as current, voltage, and temperature.

The results indicated that an electrolyte concentration of 25% offers greater energy efficiency and a higher production flow compared to the 15% concentration due to its higher ionic conductivity. On the other hand, the 5-cell system showed a significant increase in hydrogen production compared to the 3-cell system, although this required higher energy consumption due to the increase in the required voltage. Likewise, a linear relationship between the applied current and the produced flow rate was observed, with a slight decrease in the system's efficiency as the current increased, due to the overheating of the electrolyte and energy losses.

In conclusion, the designed prototype proves to be a viable alternative for the experimental production of green hydrogen, standing out as an accessible solution for future applications in industrial and energy sectors. This project not only contributes to technical knowledge in the field of alkaline electrolysis but also promotes the development of technologies that facilitate the transition toward a more sustainable energy model, aligned with global objectives of reducing pollutant emissions.

*Degree Work.

** Faculty of Physicalmechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, PhD in Chemical Engineering.

Introducción

Actualmente existen significativos retos en cuanto al consumo y la generación de energías. La utilización de combustibles fósiles no solo afecta al cambio climático, también ha generado una dependencia a la utilización de estos ya que es una fuente muy importante de energía, esto trae consigo una serie de desafíos en cuanto a la seguridad energética y la sostenibilidad. Ante esta situación el hidrógeno, ha aparecido como una alternativa favorable para la disminución de los combustibles fósiles, ayudando a la transición hacia una economía energética más limpia.

El hidrógeno, el elemento más abundante en el universo, es un gran portador de energía. Su alta densidad energética y el hecho de que, al usarse como combustible, solo produce agua como subproducto lo convierten en una opción muy prometedora para lograr un futuro energético más limpio y sostenible. (Rosen & Koochi-Fayegh, 2016)

Existen diferentes formas de producir hidrógeno, dentro de estas está la electrólisis del agua, la cual se ha destacado, especialmente cuando se utiliza con fuentes de energía renovables, como lo son la energía solar o la energía eólica. Los electrolizadores en este ámbito se destacan por su diseño, un bajo costo relativo y su capacidad de operar a una gran escala.

Los electrolizadores utilizan la energía eléctrica suministrada para dividir las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, es común que la solución que se utilice en los dispositivos sea un electrolito alcalino, normalmente es una solución de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), este tipo de soluciones mejora la conducción iónica y en cuanto al proceso mejora su eficiencia. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

Cuando se realiza la caracterización del electrolizador esta no se limita solamente a evaluar su comportamiento y desempeño en condiciones controladas, sino también se busca evaluar otros factores como lo son la temperatura, el tipo de electrodos y la concentración del electrolito,

verificando como estos factores afectan su funcionamiento. Investigaciones realizadas recientemente han indicado que el sobrepotencial utilizado en los electrodos es uno de los principales retos para mejorar la eficiencia en el sistema, lo cual a impulsado una creciente de investigaciones acerca de materiales y recubrimientos catalíticos avanzados.(Rashid et al., 2015)

La utilización de esta tecnología va más allá del sector energético. El hidrógeno que se produce por medio de una celda de electrólisis alcalina tiene varios usos, como en área del transporte, industria química y la generación de energías de respaldo para deferentes tipos de usos. En todas estas áreas la utilización de hidrógeno verde reduciría significativamente el uso de combustibles fósiles y a su vez la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a reducir el cambio climático producido por el exceso de contaminación.

Continuando con este contexto, el presente trabajo se enfoca en el diseño construcción y caracterización de un electrolizador alcalino, con el fin de verificar su potencial como una solución accesible y favorable para la producción de hidrógeno. A medida del estudio, diseño y desarrollo, se tendrán en cuenta la selección de materiales y la respectiva verificación y evaluación del rendimiento experimental de los mismos en el proceso de electrólisis. El desarrollo de la celda de electrólisis no solo busca contribuir con el conocimiento técnico en este ámbito sino también promover estrategias que puedan ser utilizadas en desarrollos a futuro en este campo.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de electrólisis para la producción de hidrógeno entre 0.5 (L/min) o 1 (L/min).

1.2 Objetivos específicos

Dimensionar el sistema de electrólisis, lo cual implica la selección de materiales para los electrodos, así como el diseño de la celda electrolítica y la selección del sistema de suministro de energía para un electrolizador de baja producción de hidrógeno y oxígeno.

Evaluar el rendimiento y la eficiencia teórica del prototipo de electrolizador en la generación de hidrógeno, analizando parámetros como la tasa de producción de hidrógeno y la eficiencia energética.

Construir un prototipo del electrolizador utilizando los materiales y componentes seleccionados, asegurando que cumpla con los estándares de seguridad.

1.3 Alcances

El electrolizador por desarrollar es de fin experimental y lo que busca es optimizar la producción de hidrógeno en bajas cantidades. Los alcances establecidos para el desarrollo del trabajo son los siguientes:

- Diseñar una celda electrolítica funcional, asegurando un buen sellado para evitar fugas del electrolito y de los gases generados durante el proceso de electrólisis, asegurando un uso seguro de la misma.
- Evaluar el rendimiento del sistema teniendo en cuenta los factores como la temperatura y la concentración del electrolito utilizado, de igual forma garantizando

la utilización de materiales de buena calidad que me aseguren la funcionalidad del equipo sin riesgos para el usuario.

- Determinar la producción de hidrógeno y oxígeno bajo condiciones de operación controladas, como la estabilidad del suministro eléctrico, la concentración del electrolito y la cantidad de placas utilizadas.
- Realizar un análisis comparativo entre diferentes configuraciones, considerando variaciones en la concentración del electrolito y las condiciones de operación, con el fin de verificar sobre qué tipo de condiciones el electrolizador tiene una mayor eficiencia en la producción.

1.4 Limitaciones

Las limitaciones en el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- La realización de las pruebas se desarrollará bajo condiciones controladas de laboratorio teniendo en cuenta factores como la concentración del electrolito y la corriente aplicada al electrolizador. Esto implica que los resultados pueden tener variaciones respecto al comportamiento del sistema en escenarios extremos o variables.
- La realización del proyecto se centrará en el diseño, construcción y evaluación de un solo prototipo experimental.
- El análisis matemático, se enfocará únicamente en aspectos eléctricos del sistema, dejando fuera otros factores como la dinámica térmica o el flujo de gases dentro de la celda.

- La producción de hidrógeno y oxígeno estará restringida a un rango de entre 0.5 y 1.0 L/min, ya que este proyecto tiene un carácter experimental y no está orientado hacia aplicaciones a mayor escala.
- El electrolizador no podrá recibir más corriente de la que las fuentes de alimentación pueden proporcionar, lo que limita la capacidad de aumentar la producción de hidrógeno. Las fuentes de corriente utilizadas en el laboratorio tienen un rango específico de salida de corriente y voltaje.

2 Marco teórico

2.1 Hidrógeno

El hidrógeno, el elemento más abundante del universo, tiene un enorme potencial y se utiliza como una fuente de energía limpia. Gracias a su alta densidad energética por unidad de masa se considera importante para el desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles y que contribuyen a bajar los niveles de contaminación. El hidrógeno se puede utilizar en diversas áreas como lo es para la generación de electricidad, como combustible en el área del transporte o en diversas aplicaciones industriales. Cuando se hace referencia a “hidrógeno verde” se está hablando del hidrógeno producido por medio de fuentes renovables sin emitir gases de efecto invernadero.(M & G, 2023).

Además del hidrógeno verde, existen diferentes tipos de hidrógeno los cuales se pueden clasificar mediante su producción, como el hidrógeno gris, obtenido a partir de combustibles fósiles como el gas natural, generando emisiones de CO₂; el hidrógeno azul, que también proviene de combustibles fósiles pero con una captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones; el hidrógeno turquesa generado por pirolisis del metano, que produce carbono sólido como

subproducto; y el hidrógeno rosa que se obtiene a partir de la electrólisis utilizando energía nuclear. Cada tipo tiene diferentes implicaciones en términos de sostenibilidad y emisiones de efecto invernadero.

Existen múltiples fuentes para la producción de hidrógeno, cada uno con características y niveles de producción específicos. En la Tabla 1 se presentan estas fuentes de producción, junto con la cantidad de hidrógeno producido en cada caso.

Tabla 1 Fuentes de producción mundial de hidrógeno

Fuente de energía	Bcm³ /año	%	Tipo de hidrógeno
Gas natural	240	48	Azul
Aceite	150	30	Gris
Carbón	90	18	Gris
Electrólisis	20	4	Verde
Total	500	100	

Bcm: mil millones de metros cúbicos.

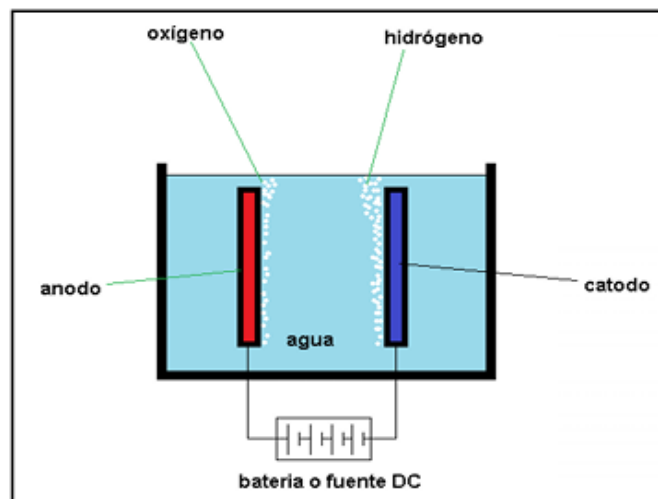
Nota. Información tomada de Hydrogen production by water electrolysis technologies (pag 6), por Mostafa El-Shafie.

2.2 Electrólisis

La electrólisis es proceso en el cual se utiliza corriente eléctrica para obtener la separación de una molécula en los elementos que la constituyen. Continuando con este contexto la generación de hidrógeno, se realiza normalmente en una celda electrolítica, buscando la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, esto ocurre cuando se pasa una corriente eléctrica por medio de un

ánodo y un cátodo los cuales están sumergidos en una solución. Este tipo de generación de energía se está convirtiendo en altamente atractiva, como una alternativa para la disminución del uso de los combustibles fósiles, que son los más utilizados en la actualidad, se está optando por la utilización de fuentes renovables de electricidad para garantizar que el hidrógeno obtenido por medio de este tipo de celdas electrolíticas, sea considerado hidrógeno “verde” o “limpio”.(Mostafa, 2023).

Figura 1 Esquema básico de un electrolizador



Aunque existen varios métodos de electrólisis todos comparten la misma reacción global descrita por la ecuación (1)



En la Figura 1 se observa un esquema básico de un electrolizador, donde, el hidrógeno (H_2) se genera en el cátodo, y el oxígeno (O_2) en el ánodo.

Dentro de este contexto, se realizan comparaciones de rendimiento entre algunas tecnologías de electrólisis, como las celdas alcalinas, las PEM con agua pura y los sistemas de

electrólisis directa de agua de mar, a continuación, podemos evidenciar esta comparación en la Tabla 2.

Tabla 2 Comparaciones de rendimiento entre alcalino, PEM con agua pura y electrólisis directa de agua de mar

Tecnología de electrólisis	Consumo de energía [kWh/kg H₂]	Eficiencia basada en HHV(%)
Electrólisis PEM	47-63	67-82
-Electrólisis alcalina	47-66	62-82
Electrólisis directa de agua de mar	50-53	75-79

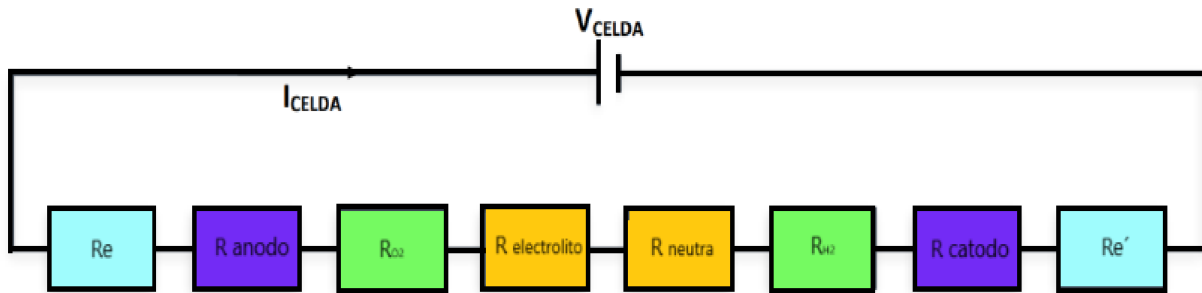
Nota. Información tomada de Hydrogen production by water electrolysis technologies (pag 6), por Mostafa El-Shafie.

2.3 Principios energéticos de los electrolizadores

Para obtener un proceso de electrólisis satisfactorio, se deben tener en cuenta ciertas barreras energéticas, las cuales estas arraigadas a la reacción electroquímica, que ocurre en la celda de electrólisis, como lo son las resistencias eléctricas del circuito, la energía necesaria que hay que aplicar a los electrodos y las placas bipolares intermedias y la resistencia que genera el electrolito, muchas de las cuales se ven afectadas por las burbujas generadas en el proceso de electrólisis. La base de la electrólisis del agua radica en su descomposición mediante la aplicación de corriente a través de una solución conocida como electrolito en la cual normalmente se utiliza hidróxido de potasio o hidróxido de sodio.

La eficiencia de los procesos de electrólisis depende de varios factores como: la concentración del electrolito, cantidad de corriente, temperatura. A continuación, se puede evidenciar desde la parte eléctrica una aproximación del proceso de electrólisis, representado en la Figura 2.

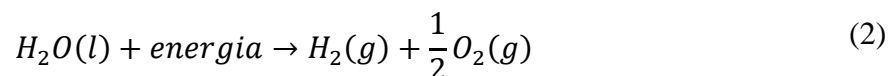
Figura 2 circuito eléctrico básico del proceso de electrólisis



En la Figura 2 tenemos que R_e y $R_{e'}$ indican las resistencias del circuito externo, que corresponden a los encargados de suministrar energía eléctrica al electrolizador. Estas resistencias tienen factores como la conductividad, la longitud y el área transversal de los conductores. También están, R_{O_2} , R_{H_2} , $R_{\text{electrolito}}$ y R_{neutra} , las cuales se denominan resistencias de transporte, en la electrólisis. Comúnmente, R_{O_2} , R_{H_2} están asociadas a las burbujas de hidrógeno y oxígeno que se generan en el proceso, $R_{\text{electrolito}}$ y R_{neutra} corresponden a la resistencia que ofrece el electrolito y las placas bipolares (neutras). Por último, las resistencias del ánodo ($R_{\text{ánodo}}$) y del cátodo ($R_{\text{cátodo}}$).

La separación del agua es una reacción que no ocurre espontáneamente, pero puede inducirse al suministrar electricidad mediante una fuente externa de alimentación. Por este motivo es importante analizar estas condiciones desde un enfoque termodinámico para determinar la potencia de operación de la celda electrolítica.(Herraiz, 2012).

Contemplando lo anterior tenemos que la ecuación (1) ahora puede ser vista de la siguiente manera:



La eficiencia de un electrolizador alcalino está afectada por diversos factores, como por ejemplo la respuesta cinética de los electrodos, la geometría y el diseño de la celda, como también el tipo de electrolito que se emplea. Las anteriores variables pueden afectar la eficiencia del electrolizador y un puede generar a su vez un incremento del voltaje necesario en comparación con el valor teórico, lo que puede dar origen al concepto de sobrevoltaje o sobrepotencial (Ramírez, n.d.). Los sobrevoltajes se pueden clasificar según el fenómeno termodinámico de la siguiente manera;

- **Sobrevoltaje de activación:** Está relacionado con los procesos dinámicos que ocurren durante la transferencia de carga en la electrólisis.(Ramírez, n.d.)
- **Sobrevoltaje de concentración:** Este fenómeno surge debido a la falta de homogeneidad y equilibrio en la concentración del electrolito, además de verse afectado por cambios en la presión y el comportamiento de los líquidos y gases involucrados.(Ramírez, n.d.)
- **Sobrevoltaje de reacción:** Se refiere a la interacción termodinámica que ocurre en la superficie del electrodo cuando entra en contacto con el electrolito.(Ramírez, n.d.)
- **Sobrevoltaje de transferencia:** Este tipo de sobrevoltaje está vinculado al movimiento de corriente hacia o desde el electrodo durante el proceso.(Ramírez, n.d.)
- **Sobrevoltaje óhmico:** Directamente asociado a la resistencia eléctrica en el sistema, según la ley de Ohm, y relacionado con las resistencias presentes en los electrodos y el electrolito.(Ramírez, n.d.)

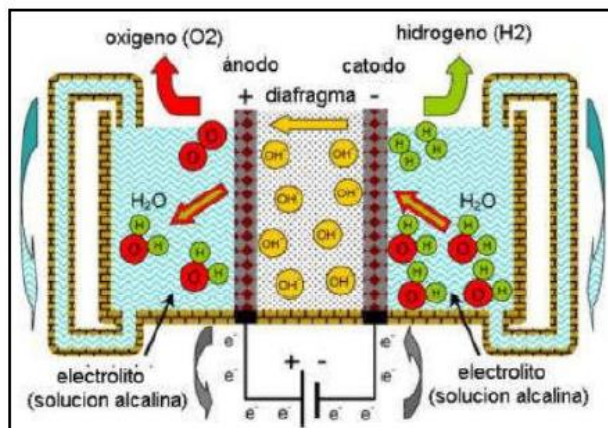
2.4 Tipos de electrolizadores

En la actualidad hay varios tipos de electrolizadores, cada uno de ellos con características diferentes propias de su diseño o de la aplicación para la cual sea utilizado, de manera general un electrolizador está compuesto por electrodos, una fuente de alimentación de corriente continua, el electrolito y un separador que es el encargado de mantener una distancia entre las placas. Es importante mencionar que los más comunes son los electrolizadores alcalinos, SOE, AEM Y PEM, donde a continuación se detallan cada uno de estos:

2.5 Electrolizador alcalino

El electrolizador alcalino comúnmente utiliza como electrolito una solución de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, normalmente estas soluciones tienen concentraciones de un 15% a un 30%, con la finalidad de mejorar la conductividad iónica en el sistema, mejorando la eficiencia del electrolizador. Este es el electrolizador más económico, siendo así el ideal para producir hidrógeno a un bajo o mediano volumen. Los electrodos que se utilizan en este tipo de electrolizador por lo general son de acero inoxidable o de níquel, permitiendo una durabilidad y una buena eficiencia bajo condiciones moderadas de operación(Zeng & Zhang, 2010).

Un esquema general de un electrolizador alcalino se muestra a continuación;

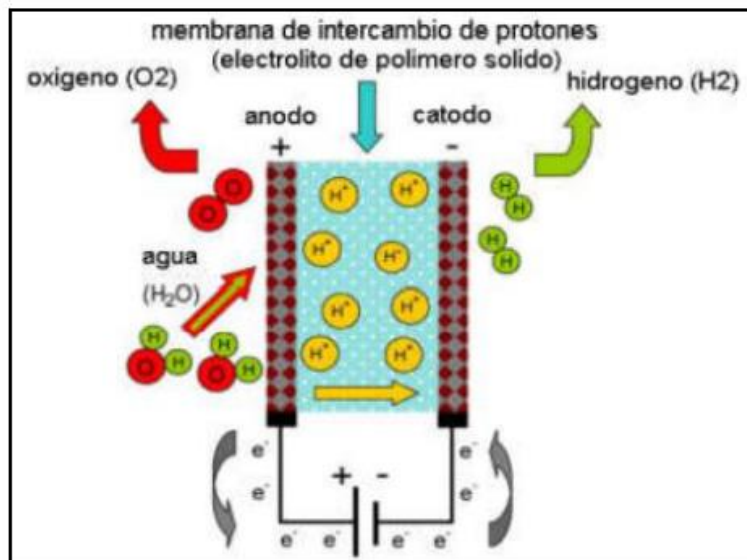
Figura 3 Esquema de un electrolizador alcalino.

2.6 Electrolizador PEM

El electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM) funciona con una membrana sólida como electrolito, lo cual lo hace más compacto y eficiente cuando este trabaja a altas presiones, la función de la membrana es evitar que los gases producidos en la celda se mezclen y también impedir la conducción electrónica de iones, lo que garantiza un funcionamiento más eficiente en la celda. Este tipo de celdas trabajan únicamente con agua desmineralizada no es necesario agregar otros compuestos.

El costo de este tipo de electrolizador es más elevado frente a los electrolizadores alcalinos debido a la utilización de materiales sofisticados como el platino en los electrodos, este tipo de electrolizadores es ideal para áreas o aplicaciones que requieran una mayor demanda y eficiencia energética, estos tipos de celdas son conocidas por tener una respuesta rápida y una buena eficiencia en cuanto a la conversión de energía (Vallejo, 2003).

El esquema de un electrolizador tipo PEM se muestra a continuación:

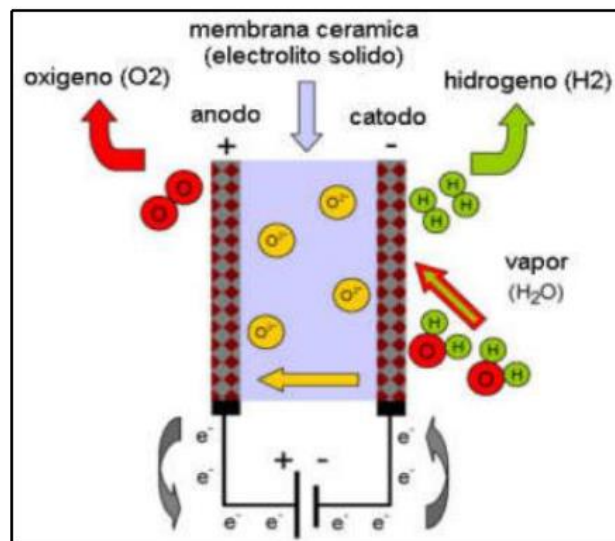
Figura 4 Esquema de un electrolizador tipo PEM

2.7 Electrolizador SOE

La electrólisis de óxido sólido (SOE), es tecnología innovadora que funciona por medio de la electrólisis de vapor de agua, este tipo de electrólisis resiste temperaturas muy altas entre los $500C^\circ$ y $1000C^\circ$, estas temperaturas facilitan y aceleran las reacciones químicas que ocurren en el proceso, lo cual ayuda a reducir en gran medida la energía necesaria para generar la activación de los electrodos, logrando obtener unas eficiencias altas, casi perfectas en comparación con electrolizadores de tipo alcalino o tipo PEM.

Este tipo de tecnología no utiliza electrolito líquido, sino por el contrario estas funcionan con celdas de cerámica sólida las cuales son unas excelentes conductoras de iones. De igual forma sus electrodos suelen estar compuestos de materiales como cerámica y metales. Es importante mencionar que este tipo de tecnología aún se encuentra en fase de investigación, por lo cual en la actualidad no se encuentran comercializadas en gran medida. (Carrasco & Paricio, 2022).

El esquema del electrolizador de tipo SOE se muestra a continuación:

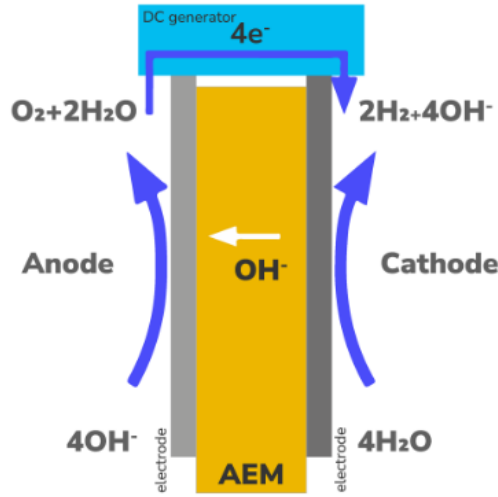
Figura 5 Esquema de electrolizador de tipo SOE

2.8 Electrolizador AEM

Los electrolizadores AEM (membrana de intercambio aniónico) utilizan membranas de intercambio aniónico, las cuales permiten combinar los entornos alcalinos con el uso de electrolitos sólidos. Este tipo de membranas que se utilizan en estos procesos tienen la capacidad de generar un intercambio aniónico mientras bloquean los gases como el oxígeno y el hidrógeno impidiendo que estos se mezclen, la función principal de estas es facilitar el transporte de aniones y separar los reactivos. Este tipo de celdas comparadas con el tipo PEM, son más económicas, pero aún se encuentran en desarrollo y procesos de optimización para un uso comercial (Rondán, 2016).

El esquema de un electrolizador tipo AEM se muestra a continuación:

Figura 6 Esquema básico de un electrolizador AEM



2.9 Comparación entre los distintos tipos de electrolizadores

Existen diferentes tipos de electrolizadores cada uno con características y eficiencias distintas, aplicables a las diferentes áreas o industrias para la cual se necesiten. De igual manera estos cuentan con ventajas y limitaciones las cuales los hacen funcionales para aplicaciones y volúmenes de producción específicos según la necesidad.

Teniendo en cuenta el anterior contexto, se ha indagado acerca de cuatro principales electrolizadores: alcalino, de membrana de intercambio de protones (PEM), de oxido solido (SOE) y por último de membrana de intercambio aniónico (AEM).

La Tabla 1Tabla 3 reúne y compara las características más importantes respecto de cada uno de los tipos de electrolizador nombrados previamente, permitiendo una verificación y evaluación de cada uno de estos.

Tabla 3 Características de diferentes tipos de electrolizadores.

Característica	Alcalino	PEM	SOE	AEM

Electrolito utilizado	Agua + NaOH / Agua + KOH	Nafión 117 / Teflón	Cerámica	Agua + KOH
Material de los electrodos	Acero inoxidable / Níquel	Grafito con platino	Níquel / Cerámica	Níquel / Membranas aniónicas
T° operación [°C]	80-90	80-90	500-1000	60-80
Eficiencia [%]	50-60	55-70	≈100	50-60
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología confiable y estable. • Material de electrodos fácil de obtener. • Fácil manufactura <p>Visualización de operación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Independencia de solución electrolítica. • Electrolito sólido <p>Capacidad de operar a distintas presiones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia (~100%). • Permite coelectrólisis de CO₂ y vapor. • Bajo uso de energía eléctrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas del medio básico • Electrolito sólido • Mayor estabilidad en operación básica

Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Electrolito corrosivo • Mayor tamaño por uso de electrolito líquido 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de manufactura • Complejidad en el ensamblaje • Poca visualización de operación 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas requeridas • Materiales costosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones actuales en el desarrollo de membranas • Menor eficiencia relativa
--------------------	--	--	--	--

Nota. Esta tabla comparativa muestra algunas características importantes de diferentes tipos de electrolizadores.

2.10 Modelo matemático de un electrolizador alcalino

Los dispositivos de electrólisis alcalina son fundamentales para la generación de hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Un modelo matemático facilita la simulación, permitiendo predecir el comportamiento de estos dispositivos bajo diferentes cargas y condiciones operativas, ayudando de esta forma con el desempeño y la eficiencia. Basándonos en la información suministrada con anterioridad tenemos que uno de los modelos con más relevancia, es el cual representa la relación entre la corriente aplicada y el voltaje necesario, que es conocida también como la curva característica voltaje – corriente (V-I))(Zeng & Zhang, 2010). En este tipo de curva se puede evidenciar como varía el voltaje requerido para el funcionamiento del dispositivo en función de la corriente que pasa por todo el sistema, teniendo en cuenta esto es posible identificar diferentes fenómenos físicos y electroquímicos que afectan el rendimiento del electrolizador, como

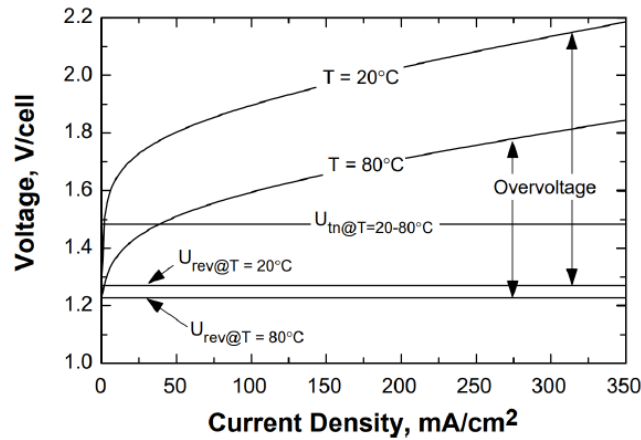
lo son las pérdidas de energía por sobrevoltajes y las resistencias internas que me genera el dispositivo.

2.11 Curva v-i característica de un electrolizador alcalino

La gráfica de voltaje vs corriente (V-I) es una herramienta que ayuda a comprender y a predecir de cierta manera el comportamiento de los electrolizadores alcalinos, teniendo en cuenta las diferentes configuraciones de los parámetros de operación. Por medio de esta gráfica se pueden verificar los puntos de operación óptimos en los cuales la celda se desempeñe mejor, en otras palabras, donde el electrolizador funcione de una manera más eficiente. De igual manera esta gráfica nos permite analizar los efectos que generan en la celda los sobrevoltajes, estos tipos de efectos ayudan a entender como factores como la temperatura, o el diseño del electrolizador influyen en el rendimiento general de la celda. (Daoudi & Bounahmidi, 2024)

En la siguiente Figura 7 se puede observar una forma básica de la curva V-I de un electrolizador alcalino que opera a dos temperaturas específicas: una de 20C° y otra de 80C°. en este tipo de comparación se puede evidenciar como la temperatura afecta los sobrevoltajes, afectando de igual forma el desempeño de la celda. Cuando la temperatura es baja, se tienden a tener sobrevoltajes mayores esto en consecuencia de una cinética más lenta de las reacciones electroquímicas, lo que a su vez genera un aumento de la energía que se requiere para mantener generar la electrólisis. Por otro lado, a temperaturas mayores la cinética de la reacción mejora lo que lleva a una reducción de sobrevoltajes y una operación electrolítica más eficiente.

Figura 7 Curva característica V-I típica de un electrolizador alcalino a baja y alta temperatura. (Daoudi & Bounahmidi, 2024)



3 Marco metodológico

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar, construir y caracterizar la operación de una celda de electrólisis de tipo alcalina, con el fin de realizar un análisis teórico y experimental del proceso de generación de hidrógeno mediante electrólisis. Este estudio se enfoca exclusivamente en el proceso de producción de hidrógeno, considerando que la energía aplicada provendrá de una fuente limitada a 12 amperios y 32 voltios.

Para alcanzar los objetivos planteados, se presenta un diagrama en la Figura 8 que detalla las actividades necesarias para el desarrollo del proyecto.

Figura 8 Diagrama de actividades



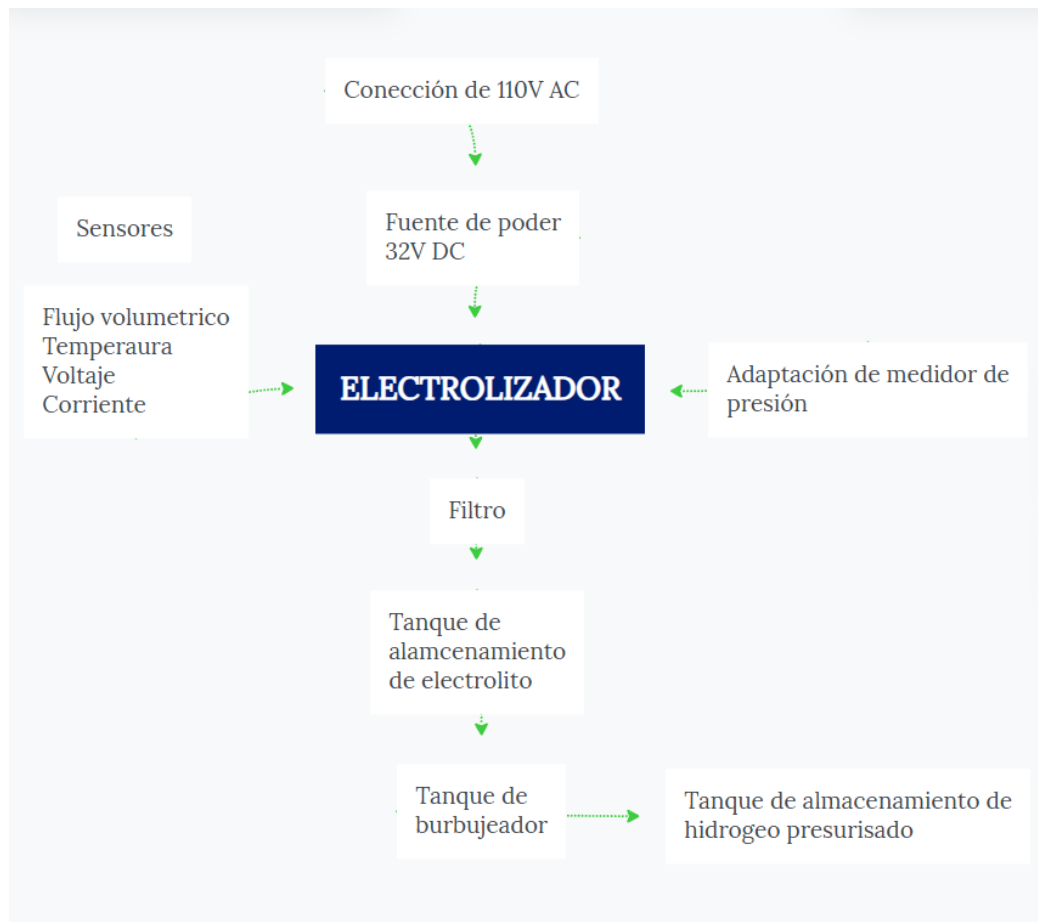
3.1 Diseño de la celda electrolítica

En el presente trabajo de investigación, desarrollado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se aborda un acercamiento

experimental al desarrollo de la producción de hidrógeno como una alternativa de energía limpia para el planeta. Se implementa el proceso de electrólisis utilizando electrolitos para incrementar la conductividad eléctrica del agua, permitiendo así determinar los parámetros de funcionamiento del sistema electroquímico involucrado y la aplicación de la reacción de reducción-oxidación (redox), encargada de la transformación de la materia. (Klaus Schmidt-Rohr, 2018)

La transformación del agua en gases de hidrógeno y oxígeno se realiza comúnmente mediante soluciones ácidas o básicas, según la necesidad de producción de gases y el comportamiento de la celda. Esto favorece el transporte iónico en las moléculas de la mezcla y altera posteriormente el pH de la solución. Dicha acción reduce o incrementa la energía de activación necesaria para la ruptura de las moléculas durante el proceso, permitiendo una producción controlada según el porcentaje de solución electrolítica. (Aguinaga, 2009)

Si bien una parte esencial del diseño y construcción del sistema es evaluar su eficiencia energética al aplicarle una energía, también se debe garantizar que el funcionamiento y la validez del proceso se evalúen mediante variables de operación tangibles y fáciles de medir. Además, es importante considerar un tamaño óptimo para su uso cotidiano, así como las condiciones de trabajo dependiendo de las temperaturas y presiones que puedan presentarse durante su operación.

Figura 9 Esquema de los componentes del electrolizador

3.1.1 Materiales

Los materiales por utilizar en la elaboración del proyecto se pensaron en las diferentes partes que conforman al equipo teniendo en cuenta el comportamiento de del funcionamiento al momento de trabajo del electrolito ya sea básico o ácido, ya que esto es un punto clave al momento de trabajar ya que se puede causar desgaste en los materiales y posibles fugas del gas.

El electrolizador puede estar compuesto por tres materiales diferentes, debido a que se implementó una electrólisis con celda SECA, lo que implica que el líquido no cubre por completo las placas encargadas de facilitar la reacción electroquímica. Para enfrentar la corrosión de las soluciones utilizadas, se optó por emplear materiales no oxidables; en este caso, tales como: acero

inoxidable 304, 316 o platino para los electrodos. En los separadores de placas (empaques) se puede utilizar nitrilo, EPDM, Neopreno entre otros. Un material que presenta alta resistencia a la corrosión y baja porosidad, lo que evita fugas de gas durante la producción. Además, como sistema de ensamblaje de las placas y los empaques, se debe utilizar tornillería resistente a la oxidación y placas de acrílico que permiten visualizar el proceso de generación de hidrógeno en la celda. Para evitar la deformación de los acrílicos, se incorporaron refuerzos en metálicos.

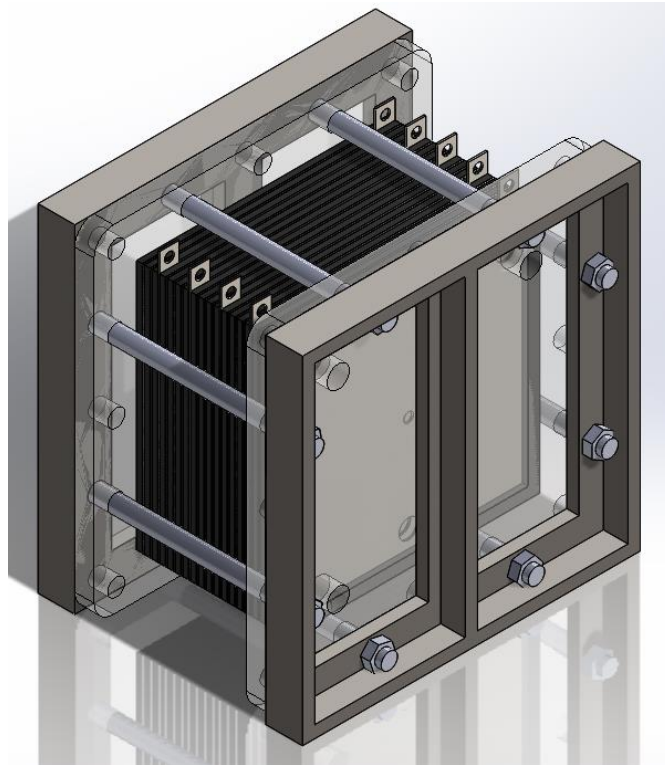
Accesorios: Los accesorios incluyen todas las partes involucradas en el transporte y almacenamiento del gas producido en la celda. Para los conectores se utilizaron racores y válvulas de cobre con un baño de estaño para garantizar resistencia a la corrosión. Como medio de transporte del gas se empleó una tubería de baja porosidad fabricada en poliuretano, mientras que los tanques de almacenamiento del electrolito pueden ser fabricados en acrílico.

3.1.2 Diseño mecánico

La celda fue diseñada utilizando un método de acoplamiento entre las placas de acero inoxidable 304, los empaques, las tapas de acrílico y los refuerzos angulares en dichas tapas, con el objetivo de evitar la deformación del acrílico debido a las fuerzas aplicadas en los extremos durante el ensamblaje. Los paneles de acrílico cuentan con perforaciones destinadas al llenado del fluido y a la salida de los gases generados durante la operación. Además, incorpora una salida de

desagüe que facilita el vaciado del fluido y la limpieza del equipo. La Figura 10 muestra el ensamble completo de la celda.

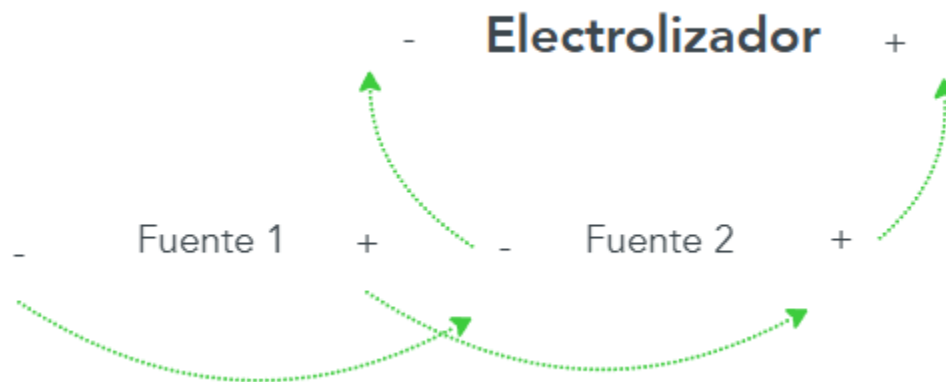
Figura 10 Celda electrolítica



3.1.3 Diseño eléctrico

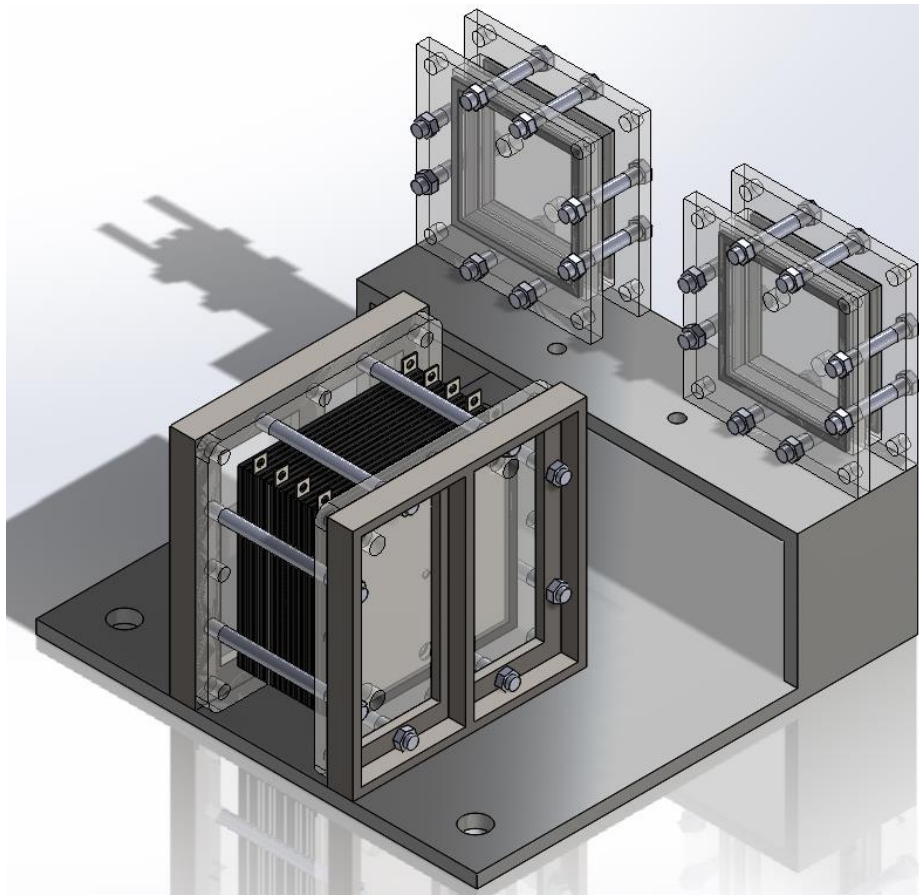
Las conexiones de suministro de energía se presentan en un esquema mostrado en la Figura 11, el cual ilustra la configuración en paralelo de dos fuentes marca ALERTO, cada una con una capacidad de 6 amperios y 32 voltios. Para la operación del equipo, tendrá una limitación de 12 amperios, los cuales se obtienen conectando las fuentes en paralelo, manteniendo el voltaje constante y sumando el amperaje.

En cuanto a las conexiones eléctricas del electrolizador, se deben realizar en serie como en paralelo, para poder comprar cuál de las dos configuraciones es más óptimas al momento de la producción de hidrógeno.

Figura 11 conexión eléctrica

3.2 Construcción de la celda

La elaboración estructural de la celda y la mayoría de sus componentes se diseñó utilizando un programa de diseño 3D, para fabricar cada pieza, el modelo fue convertido a una representación en 2D, lo que permitió trabajar con maquinaria de corte láser y lograr cortes precisos durante el proceso de fabricación. Finalmente, las piezas obtenidas fueron ensambladas para completar la estructura.

Figura 12 *montaje final de la celda*

3.2.1 Electrolito

En la electrólisis, los químicos disueltos en agua actúan como electrolitos, aumentando la conductividad iónica del medio. Al disociarse en iones positivos y negativos (por ejemplo, Na^+ y OH^- en el caso de NaOH) (Marcelo Miranda, 2022), permiten el flujo de corriente eléctrica entre los electrodos. La eficiencia de la reacción depende de la concentración del electrolito: concentraciones bajas reducen la conductividad, mientras que concentraciones excesivamente altas aumentan la resistencia y generan calor. En general, el rango de concentración ideal para electrólisis alcalina con NaOH o KOH es de **15-30% en peso**, mientras que para ácidos como H_2SO_4 es de **10-30% en peso**. Un desequilibrio en la concentración puede afectar la estabilidad

del sistema y la durabilidad de los materiales. En la Tabla 4 se muestran los diferentes químicos utilizados. (Qiyou Wang, 2021)

Tabla 4 Compuestos para electrolito

Electrolito	Fórmula Química	Características de Corrosión	Efectividad en Electrólisis	Notas Importantes
Soda cáustica (hidróxido de sodio)	NaOH	- Corrosivo para metales como aluminio y zinc.	Muy efectivo: Alta conductividad iónica en solución.	- Se usa comúnmente en electrólisis alcalina.
		- Resistente con acero inoxidable (316L).		- Manejar con cuidado, ya que es muy corrosivo para la piel y los ojos.
Hidróxido de potasio	KOH	- Similar a NaOH, pero más agresivo con ciertos metales.	Muy efectivo: Conductividad superior a NaOH a la misma concentración.	- Común en sistemas avanzados debido a su alta conductividad. - Más costoso que NaOH.
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	- Altamente corrosivo para la mayoría de los metales, excepto plomo y platino.	Muy efectivo: Alta conductividad en soluciones diluidas (10-30%).	- Usado en sistemas de electrólisis ácida. - Muy peligroso de manejar, produce quemaduras graves.
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	- Menos corrosivo que NaOH y KOH.	Moderadamente efectivo: Conductividad baja comparada con NaOH o KOH.	- Seguro para uso doméstico. - Adecuado para aplicaciones de bajo rendimiento o experimentos educativos.
Cloruro de sodio (sal común)	NaCl	- Puede corroer metales como acero al carbono y aluminio.	Moderadamente efectivo: Produce cloro y sodio en la electrólisis, lo que puede ser un problema de seguridad.	- Utilizado en electrólisis para la producción de cloro y soda cáustica. - Usar acero inoxidable para resistir la corrosión.

Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	- Corrosivo para la mayoría de los metales, menos agresivo que H ₂ SO ₄ .	Moderadamente efectivo: Conductividad aceptable en concentraciones bajas.	- Usado ocasionalmente en sistemas que requieren fosfatos como subproducto.
Cloruro de potasio	KCl	- Similar al NaCl en términos de corrosión.	Moderadamente efectivo: Conductividad aceptable, pero inferior a NaOH o KOH.	- Usado en aplicaciones específicas donde se requiere potasio como subproducto.
Nitrato de sodio	NaNO ₃	- Moderadamente corrosivo para metales comunes.	Moderadamente efectivo: Conductividad limitada comparada con otros electrolitos.	- Menos común, pero útil en sistemas donde se buscan subproductos de nitrato.
Ácido acético	CH ₃ COOH	- Corrosivo para ciertos metales, especialmente hierro y aluminio.	Poco efectivo: Conductividad baja, adecuado solo para experimentos de baja intensidad.	- Usado para experimentos básicos o como electrolito débil.
Sulfato de sodio	Na ₂ SO ₄	- Baja corrosión en la mayoría de los metales.	Moderadamente efectivo: Conductividad limitada, pero estable.	- Adecuado para sistemas de baja intensidad y aplicaciones educativas.
Amoníaco (solución acuosa)	NH ₃ (acuoso)	- Moderadamente corrosivo, especialmente para cobre y aleaciones de cobre.	Moderadamente efectivo: Produce iones amonio, pero con conductividad baja en comparación con KOH o NaOH.	- Usado en sistemas específicos donde se requiere amoníaco como subproducto.

3.3 Pruebas de operación de la celda

Las pruebas tienen como objetivo caracterizar el sistema evaluando la eficiencia y la producción de hidrógeno en las diferentes configuraciones posibles de trabajo. Mediante cargas variables de corriente y voltaje, se busca validar las curvas de producción y el consumo energético,

determinando que los electrodos y las placas bipolares mantendrán un tamaño constante, mientras que se variará la concentración del electrolito y el químico utilizado para analizar el comportamiento físico del sistema. Una de las variables no controladas es la temperatura, debido a su cambio con el transcurso del tiempo.

Para ello, se obtendrán datos de operación que permitan analizar las curvas de corriente vs. voltaje. Se observará que, a medida que varían los niveles de corriente, el voltaje también cambia de manera simultánea, lo que incrementa la reacción electrolítica y, por consiguiente, aumenta el flujo de hidrógeno. Este proceso está asociado al fenómeno de óxido-reducción en la celda, resultado de la transferencia de electrones.

3.4 Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno mediante electrólisis es un proceso en el cual se descompone agua (H_2O) en sus componentes básicos: hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Este método se realiza aplicando una corriente eléctrica a través de un electrolito, generalmente agua con un compuesto alcalino como el hidróxido de potasio (KOH). En el cátodo se produce hidrógeno, mientras que en el ánodo se genera oxígeno.

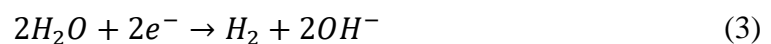
Este proceso es una alternativa sostenible cuando se utiliza electricidad proveniente de fuentes renovables, ya que el hidrógeno producido es limpio y puede emplearse como combustible en aplicaciones industriales, vehículos y generación de energía. Además, la eficiencia del sistema depende de factores como el material de los electrodos, la composición del electrolito y las condiciones de operación, como temperatura y presión.

La electrólisis es clave en la transición hacia energías más limpias, promoviendo el uso del hidrógeno como un vector energético versátil y de baja emisión de carbono.

3.4.1 Producción de hidrógeno ideal

La producción de hidrógeno teórica se calcula por medio de la ley de Faraday, que relaciona la cantidad de electricidad (carga) transferida con la cantidad de sustancia producida. Las reacciones químicas fundamentales desarrolladas se describen en las ecuaciones (1), (4), (4), en las que se representa las reducción, oxidación y reacción global. (Mario León & Edwin García, 2023)

Reacción en el cátodo (reducción): en esta reacción, los iones de agua aceptan electrones y producen hidrógeno



Reacción en el ánodo (oxidación): los iones hidroxilo se descomponen para formar oxígeno molecular y agua, liberando electrones.



Reacción global: esta es la ecuación global del proceso, que muestra la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno la cual se representa en la ecuación (1).

3.4.2 Relación de Faraday y Producción Ideal de Hidrógeno

La producción teórica de hidrógeno está determinada por la ley de Faraday, que relaciona la cantidad de electricidad (carga) transferida con la cantidad de sustancia producida.

Carga total transferida:

$$Q = I * t \quad (5)$$

Donde:

Q: es la carga eléctrica (culombios)

I: es la corriente (amperios)

t: tiempo (segundos)

Moles de electrones transferidos por electrólisis:

$$n = \frac{Q}{F} \quad (6)$$

Donde:

n: número de moles de electrones

F: constante de Faraday (96485C/mol)

Volumen de hidrógeno producido usando el volumen molar del gas (22.414 L/mol) a condiciones estándar.

$$V_{H_2} = \frac{I * t * 22.414}{Z * F} \quad (7)$$

Z: electrones del hidrógeno

3.4.3 Eficiencia teórica y real

Además de las ecuaciones ideales, puedes discutir la eficiencia del sistema:

Eficiencia Faradaica: Relaciona la cantidad de hidrógeno producido experimentalmente con la cantidad teórica basada en la corriente aplicada.

$$\eta_{faraday} = \frac{H_{producido}}{H_{teorico}} * 100 \quad (8)$$

Eficiencia Energética:

$$\eta_{energetica} = \frac{E_{producida}}{E_{suministrada}} * 100 \quad (9)$$

3.4.4 Producción de hidrógeno real

La producción se determina por medio de la medición de caudal del gas al que se transporta por la tubería hacia el tanque de almacenamiento. Pero las condiciones de producción varían según la energía limitada por las fuentes de alimentación y el no superar temperaturas mayores a los 85°C, a medida que aumenta el amperaje, aumenta la producción y la temperatura crece hasta el momento de estabilizarse térmicamente.

El flujo de gas medido permite mediante la ley de gases calcular la cantidad de moles producidas en el proceso, permitiendo tener la cantidad de hidrógeno producida, ya que el principio de generación de gas de hidrógeno y oxígeno en electrólisis tiene un 66.666% de hidrógeno y

33.333% de oxígeno con esto podemos determinar que un porcentaje de las moles totales es la suma de los porcentajes de moles de cada gas por separado.

$$P\dot{V} = nRT \quad (10)$$

\dot{V} : flujo volumetrico $\left(\frac{L}{seg}\right)$

R : contante de los gases ideales $\left(0.08206\left(\frac{L * atm}{mol * k}\right)\right)$

n : numero de moles totales $\left(\frac{moles}{seg}\right)$

$$n_{H_2} = 0.666 * n \quad (11)$$

$$Pot_{H_2} = n_{H_2} * PCI_{H_2} \quad (12)$$

Pot_{H_2} : potencia energetica del hidrogeno (W)

n_{H_2} : numero de moles de hidrogeno $\left(\frac{moles}{seg}\right)$

PCI_{H_2} : poder calorifico superior del hidrogeno $\left(286000\frac{J}{mol}\right)$

Al tener el potencial energético que es capaz de producir el hidrógeno podemos calcular la eficiencia energética al saber el consumo de energía que se utilizó en el proceso de electrólisis.

$$\eta = \frac{Pot_{H_2}}{Pot_{electrica}} * 100 \quad (13)$$

4 Diseño experimental

4.1 Propósito del diseño

ya construida la celda electrolítica, se prosigue a las pruebas de funcionamiento evaluando diferentes tipos de variables tangibles en el proceso de producción de hidrógeno, en el cual se espera extraer datos con de interés para el sector académico e industrial, el enfoque principal de

este trabajo de investigación es evaluar la eficiencia energética a partir de la generación de hidrógeno empleada por el diseño desarrollado.

4.2 Variables

4.2.1 Concentración de electrolito

El objetivo de tener una mezcla de electrolito es conseguir aumentar la cantidad de iones OH^- , esto se debe a que los electrolitos tipo alcalinos tienden a tener una mayor conductividad eléctrica en el proceso. Por su parte, el hidróxido de potasio es una base altamente soluble en agua ($\sim 1190\text{g/L}$) lo que permite tener altas concentraciones de mezcla al momento de disolver la base, por lo tanto, podemos llegar a tener altas concentraciones de K^+ y OH^- a condiciones ambiente. A partir de dicha concentración se puede variar la solución para obtener un pH en un rango de 7-14 según se requiera. El KOH disocia sus iones en la solución como se presenta en la ecuación (14)



4.2.2 Potencia eléctrica

Como se mencionó anteriormente, el propósito principal de este estudio es modelar la producción de hidrógeno (en términos de flujo) junto con su eficiencia energética. Las ecuaciones de Nernst y Butler-Volmer desempeñan un papel crucial al describir las energías de activación y la relación entre corriente y sobrepotencial en las reacciones electroquímicas de reducción de óxido. A partir de estas ecuaciones, es posible identificar, tanto de manera explícita como implícita, los factores que afectan las reacciones clave del sistema.

En el proceso, el hidrógeno molecular producido en la reacción catódica, donde los iones H^+ son reducidos, es proporcional al flujo de electrones generado en la reacción anódica, donde los OH^- son oxidados. (Se deben incluir aquí las reacciones correspondientes). La intensidad de este flujo de electrones está determinada principalmente por el voltaje aplicado entre los electrodos.

Este voltaje debe superar el potencial mínimo de celda (también conocido como sobrepotencial) para garantizar el movimiento de las cargas. Según los diagramas de Pourbaix para el agua pura (Mario León & Edwin García, 2023), la producción de hidrógeno es más favorable a potenciales inferiores a aproximadamente 0V, (pH=0) y 0,8V (pH=14). Un aumento en la concentración de iones. OH^- incrementa la disponibilidad de estas especies para ser oxidadas, lo que, a su vez, eleva la corriente disponible para reducir los iones H^+ Este análisis destaca las variables más relevantes en el proceso: el voltaje, la corriente, el tipo de electrolito y su concentración.

Por otro lado, la eficiencia energética está directamente relacionada con la energía eléctrica suministrada al electrolizador y la cantidad de gas producido (medida en masa o volumen). Para alcanzar una eficiencia del 100%, la relación entre la energía consumida y la cantidad de hidrógeno generado está establecida, desde un punto de vista termodinámico, como 28600 J/molH₂. Finalmente, la potencia eléctrica entregada al electrolizador se calcula a través de la ecuación (15)

$$P = V * I \quad (15)$$

Donde:

P: potencia eléctrica (W)

I: corriente (A)

V: voltaje (V)

4.2.3 Eficiencia energética

Acorde con los datos tomados en la medición de volumen y tiempo en el momento de la producción de hidrógeno se obtendrá el flujo volumétrico del gas producido, mediante la ecuación (10) se podrá calcular la cantidad de moles totales producidos y por medio de la relación de producción se podrá calcular la cantidad de moles de hidrógeno producidos con la ecuación (11),

al tener la cantidad de moles producidas por segundo se puede calcular la cantidad de energía que puede entregar el gas al momento de una reacción de combustión la cual se calcula a partir de la ecuación (12). Teniendo las cantidades energéticas tanto consumidas como generadas se aplica la ecuación (13) y se puede conocer la eficiencia de la celda electrolítica.

4.3 Metodología

Con el propósito de obtener un flujo volumétrico de hidrógeno que se pudiera medir a partir del principio de vaciado de un fluido líquido en un volumen controlado, como se muestra en la Figura 13, se determinó construir una celda de producción variable, a la cual se le puede aumentar o disminuir la cantidad de placas de acero inoxidable 304 disponibles en el comercio. Esta celda tiene un área activa de 110 cm^2 (superficie de contacto del electrolito) y emplea 1 L de solución electrolítica para el llenado del sistema. Cada placa tiene una separación de 2.5 a 3 mm al momento del ensamblaje.

Figura 13 Medidor de volumen de gas



Se utilizó KOH con una concentración del 80% de pureza. Se realizaron pruebas con concentraciones del 25% y 15% para determinar si había una diferencia notable al momento de la

toma de datos. Se utilizó agua destilada al realizar la mezcla para evitar comportamientos no deseados durante las pruebas.

Se realizó una variación del amperaje de 0.25A a partir de los 8 amperios en un sistema de 3 celdas, las cuales están conectadas en serie, y un barrido desde los 5 amperios para un sistema de 5 celdas. Cada configuración es capaz de alcanzar una producción máxima al llegar a las limitaciones de 12 A de las fuentes de alimentación. Se registran datos del tiempo en el que el gas desplaza el contenido de agua que se encuentra en la probeta (Figura 13), y se toman datos por triplicado para calcular un promedio de la producción y poder llenar los respectivos datos en la Tabla 5

Tabla 5 Diseño experimental

Concentración %	Corriente (A)	Voltaje (V)	Pot_elec (V*I)	Tiempo (min)	Volumen (L)	Caudal (L/min)
25%	6	-	-	-	0,1	-
		-	-	-		-
		-	-	-		-
	9	-	-	-		-
		-	-	-		-
		-	-	-		-
	12	-	-	-		-
		-	-	-		-
		-	-	-		-
15%	6	-	-	-	0,1	-
		-	-	-		-
		-	-	-		-
	9	-	-	-		-
		-	-	-		-
		-	-	-		-
	12	-	-	-		-
		-	-	-		-
		-	-	-		-

Con ese experimento, es posible determinar la eficiencia energética de cada configuración que se le dé al sistema de electrólisis. Al tener el caudal, se puede reemplazar en las ecuaciones (10) a (13) para condiciones de trabajo en un tiempo determinado. Se considera una operación continua de 60 minutos al momento de la toma de datos.

5 Pruebas experimentales y resultados.

Posteriormente a la ejecución experimental y la recopilación de los datos, se procedió a realizar un tratamiento de estos utilizando un software de análisis estadístico (Excel). Se utilizó una programación encargada de calcular los promedios de cada dato tomado según las variables medidas y al mismo tiempo graficar el comportamiento físico en cada intervalo registrado según la Tabla 5.

5.1 Producción de hidrógeno vs corriente

En este ítem se analizará la cantidad de hidrógeno producida al momento de aumentar progresivamente la corriente teniendo en cuenta la variación de porcentaje de la mezcla del electrolito y como aumenta la producción al agregar más celdas al electrolizador con los mismos puntos de corrientes aplicados en un instante de tiempo.

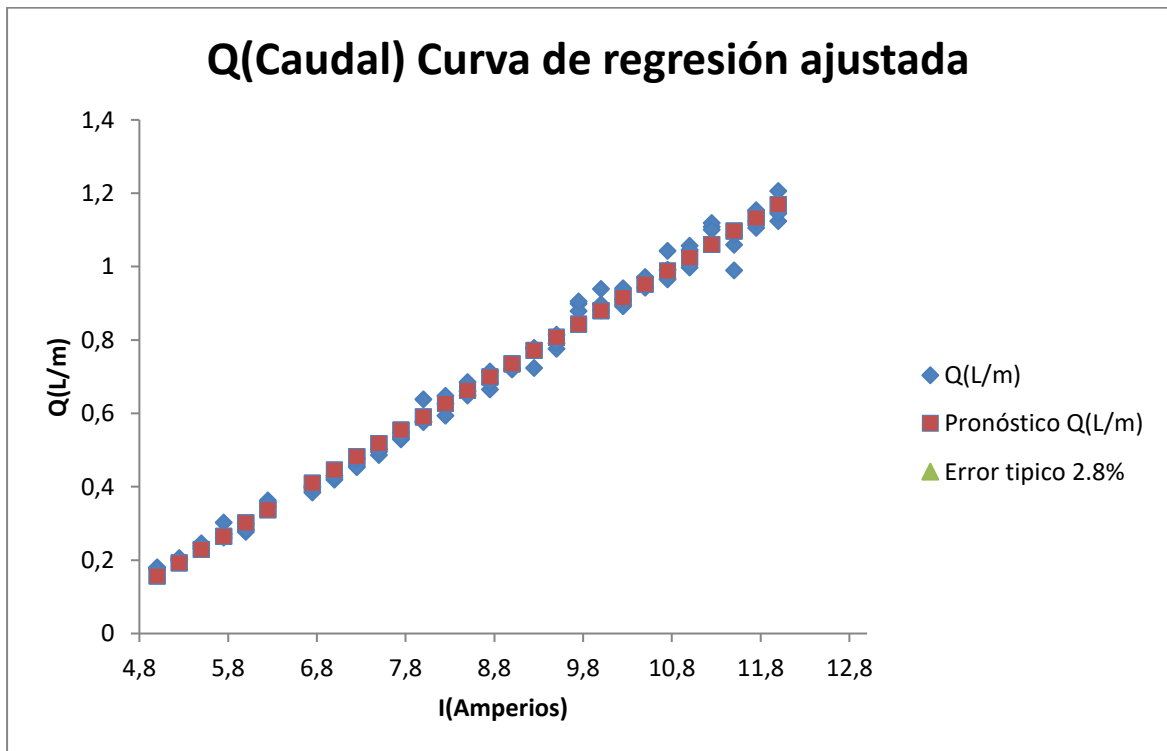
5 celdas: con este tamaño del sistema se llegó a tener una producción máxima de 1.18 L/min al tener el punto más alto de corriente aplicada, en la Figura 15 se muestra como es el crecimiento de flujo al aumentar el amperaje, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice D

En la Figura 15 se muestra la relación entre la corriente aplicada al sistema en amperios (A) y el caudal de hidrógeno producido en litros por minuto (L/min) con una mezcla de electrolito utilizada del 25%. En el eje horizontal (x) se puede evidenciar la corriente aplicada, mientras que el eje vertical (y) muestra el caudal de hidrógeno generado.

En la medida que se aumenta la corriente aplicada se puede evidenciar que el caudal producido también se incrementa, esto debido a que al aumentar la corriente la velocidad de reacción aumenta, lo que hace que se incremente la producción en el sistema.

El rango de corriente donde se evaluó el sistema es desde aproximadamente 5A hasta los 12A, en este rango el caudal que se obtuvo en el sistema va desde los valores cercanos a 0.18 L/min hasta superar un poco la producción de 1.15 L/min, estos resultados son de gran importancia para cumplir con los objetivos del proyecto en cuanto a la producción esperada.

Figura 14 corriente vs caudal, mezcla 25% 5 celdas



5.2 PRUEBAS DE RENDIMIENTO DE LA CELDA

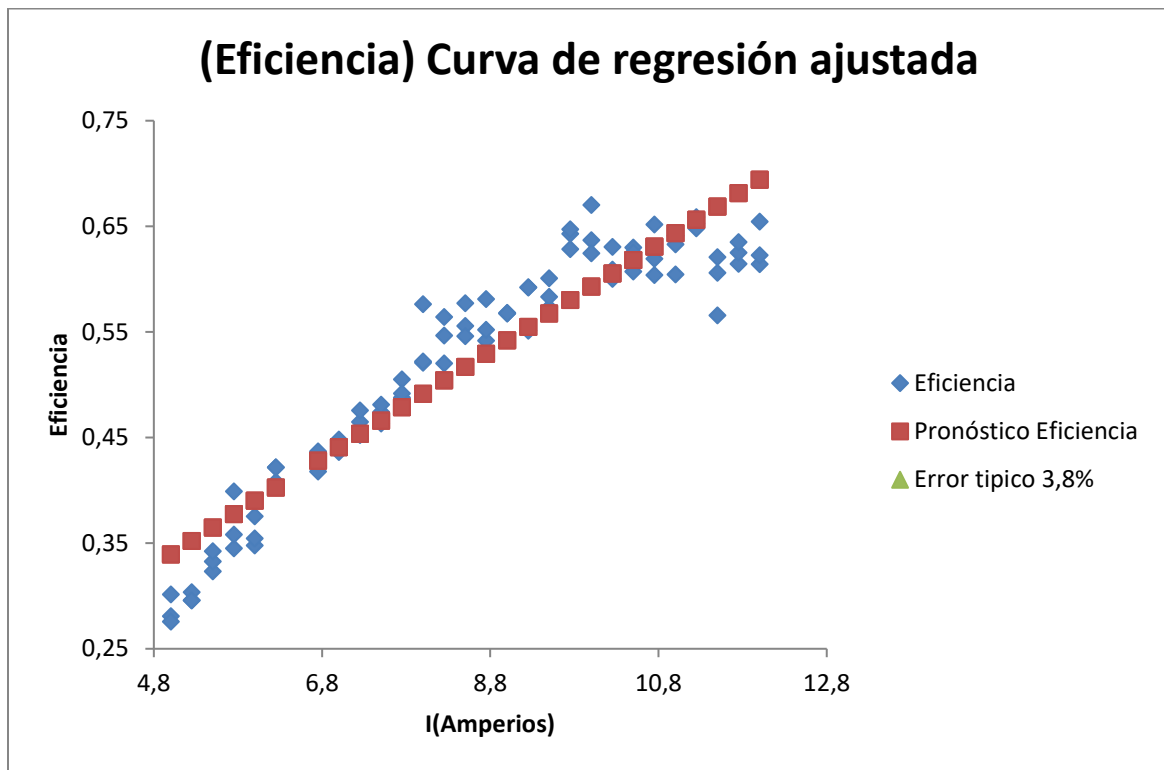
La Figura 15 muestra la relación entre la corriente aplicada al electrolizador y la eficiencia del sistema en cuanto a la producción, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice D de igual forma por medio de esta se puede evidenciar que a medida que se incrementa la corriente

suministrada al sistema, también se aumenta la eficiencia del electrolizador. Se puede evidenciar que, al utilizar corrientes más altas, estas permiten superar las pérdidas iniciales de activación, resistencia óhmica y concentración, entrando unas eficiencias un poco más altas.

En cuanto a los valores de corriente aplicada y eficiencia obtenida estos valores oscilan entre los 5A a 12A y las eficiencias varían entre un 0.3 y un 0.65 aproximadamente (30% y 65%). Estos valores obtenidos son congruentes con electrolizadores alcalinos en aplicaciones experimentales. Hay que tener en cuenta que a partir de ciertos valores de corriente puede que los valores de eficiencia no sigan aumentando significativamente debido a factores como la temperatura del sistema o sobrepotenciales que podrían limitar la eficiencia del sistema.

Este tipo de análisis es importante para comprender y garantizar las condiciones bajo las cuales el sistema ofrece puntos óptimos de trabajo en distintas aplicaciones, sin comprometer la estabilidad del sistema ni generando consumos energéticos excesivos.

Figura 15 corriente vs eficiencia mezcla 25% 5 celdas



5.3 PRUEBAS RESPECTO A LA CONCENTRACION

En la Figura 16 y Figura 17 se puede observar la relación entre la corriente aplicada al electrolizador y el voltaje requerido para su funcionamiento, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice B Y Apéndice D, considerando dos concentraciones de electrolito: una al 25% representada en color azul y la otra al 15% representada por el color naranja.

Teniendo en cuenta que ambas concentraciones de electrolito presentan pendientes similares, los valores obtenidos con la concentración del 15% son considerablemente más altos, lo que indica que hay una mayor resistencia eléctrica debido a una menor concentración de iones en el electrolito.

En cuanto a la comparación entre las dos concentraciones de electrolito se puede evidenciar que la mezcla del 25% es más eficiente hablando desde el punto de vista energético, debido a que se requiere un menor voltaje para poder conducir la misma cantidad de corriente en comparación con la mezcla del 15%.

Al aumentar la concentración del electrolito se obtiene una mejora en la eficiencia del electrolizador al reducir las pérdidas energéticas, lo que genera un menor consumo de energía. Los resultados obtenidos permiten identificar y seleccionar la concentración adecuada del electrolito, para obtener una mayor eficiencia y una disminución en los costos operativos.

Figura 16 Corriente Vs voltaje, comparacion de la Mezcla 25%

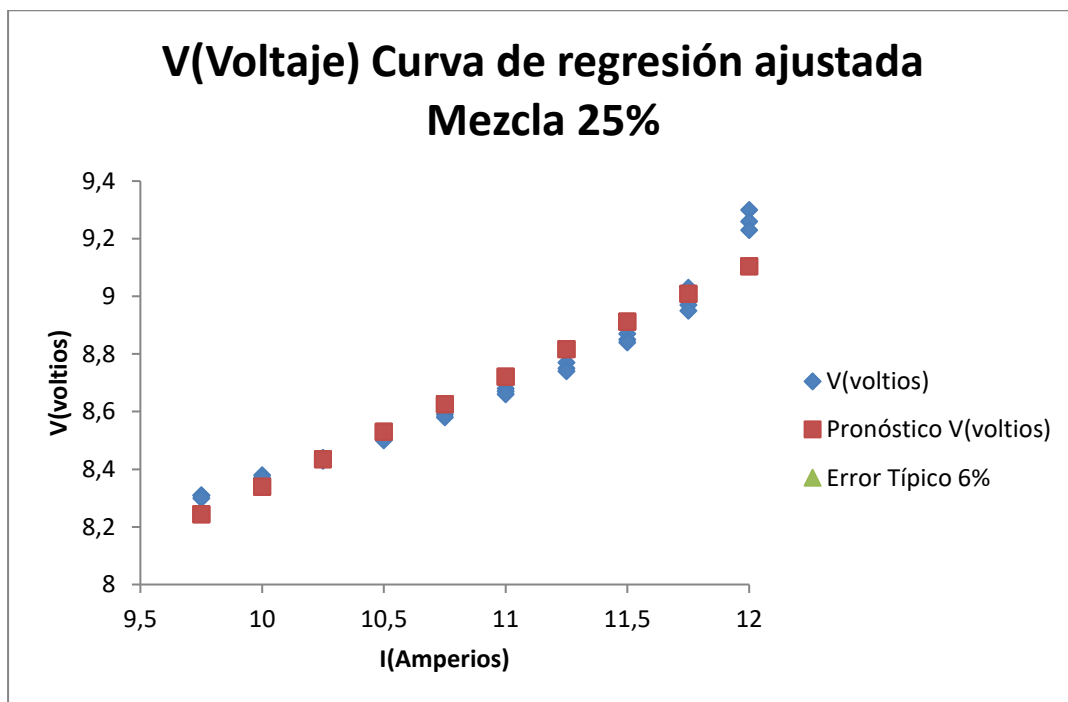
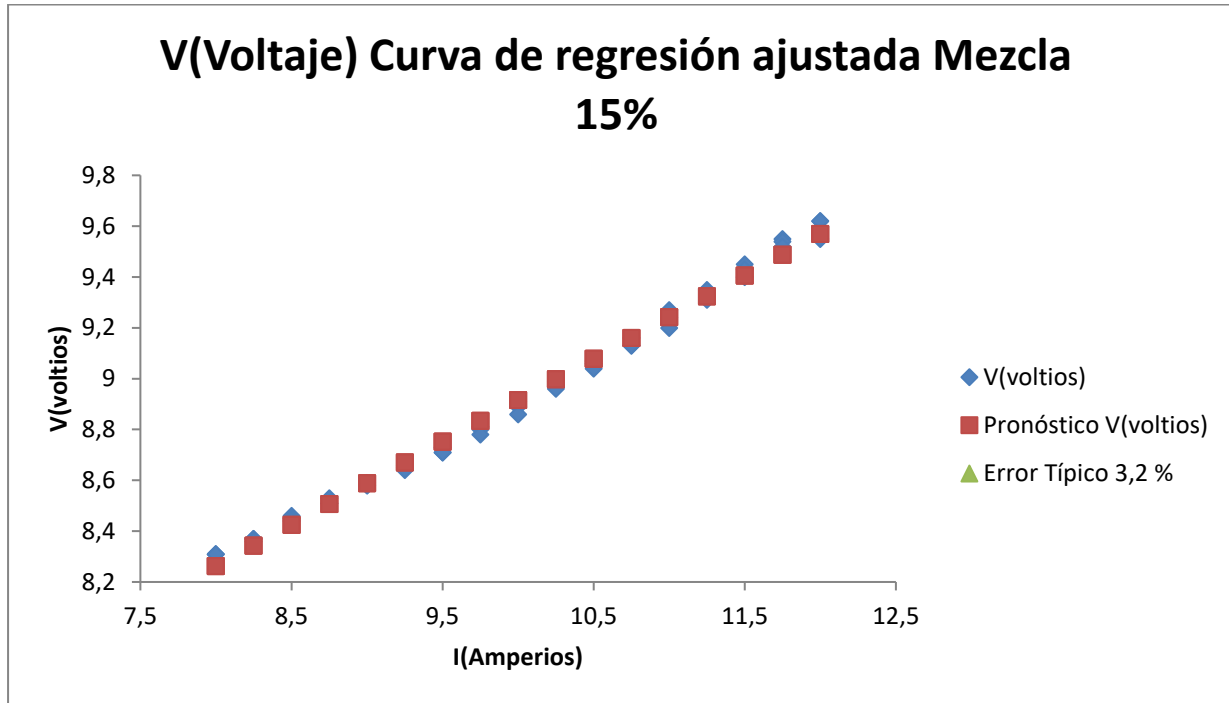


Figura 17 Corriente Vs voltaje, comparacion de la Mezcla 15%

La Figura 18 y Figura 19 presenta la relación entre la corriente aplicada al sistema y el caudal producido, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice B y Apéndice D, considerando dos concentraciones de electrolito, la primera una mezcla al 25%, representada en color azul y la segunda con una concentración del 15% representada de color naranja.

Esta comparación entre las dos curvas muestra que, para un mismo nivel de corriente, la solución que tiene una concentración del 25% produce un caudal superior a la del 15%. Esto es debido a la mayor concentración de iones que proporciona una concentración más alta en el electrolito facilitando el proceso de electrólisis. Teniendo en cuenta la pendiente más pronunciada de la mezcla al 15% del electrolito, esto indica que este tipo de solución tiene una mayor sensibilidad del caudal frente a los cambios en la corriente suministrada al sistema, por lo tanto, se

puede evidenciar que el comportamiento en la solución del 25% de concentración es más estable y eficiente frente a la otra.

Figura 18 Caudal VS Corriente Mezcla 25% con 3 Celdas

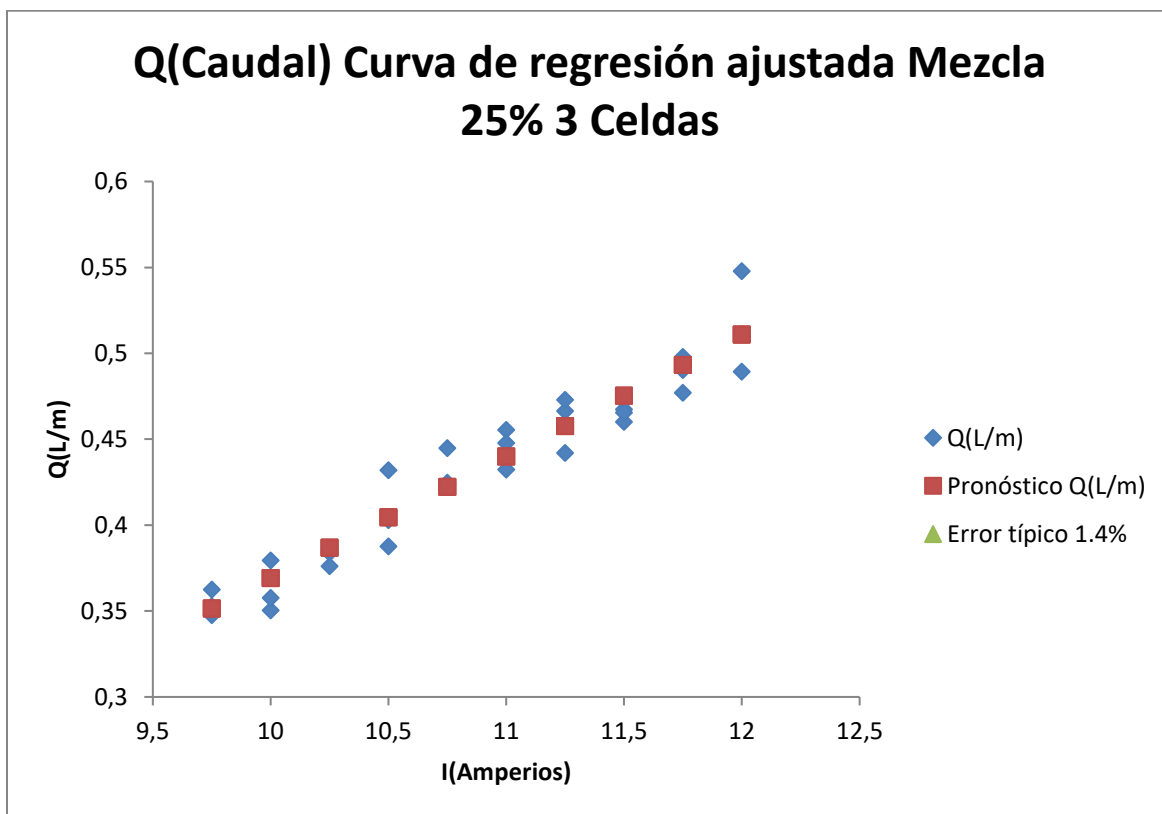
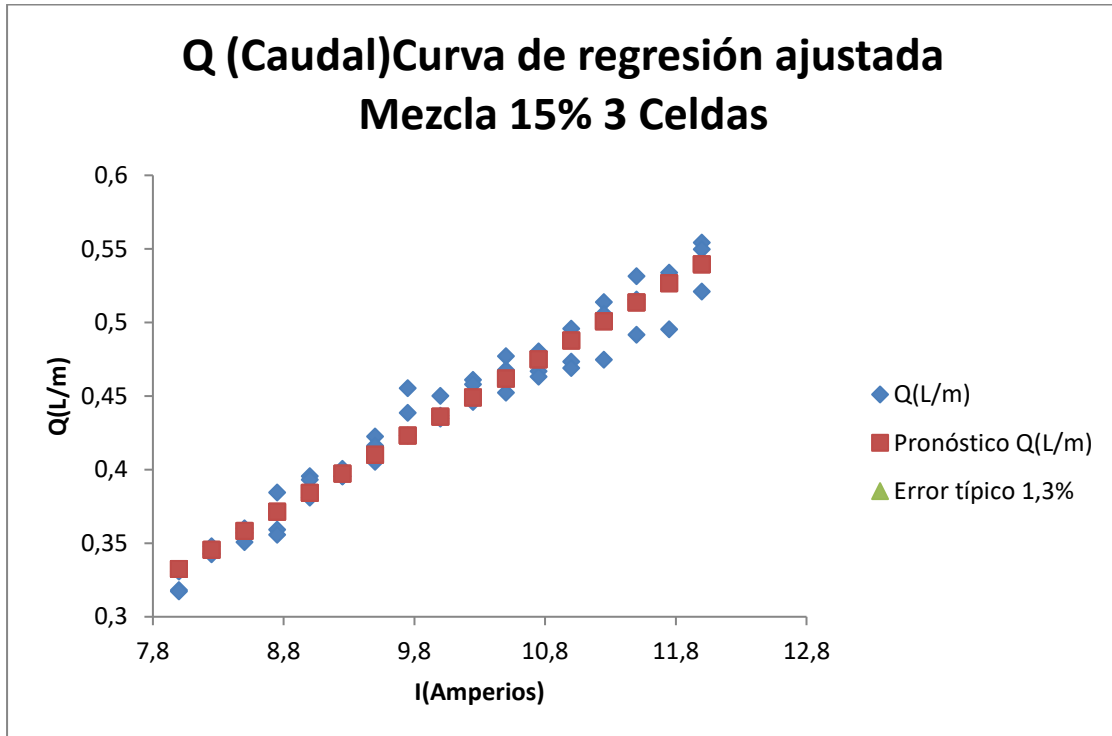


Figura 19 Caudal VS Corriente Mezcla 25% con 3 Celdas

En la Figura 20 y Figura 21 se puede evidenciar la relación entre la corriente aplicada al electrolizador y la eficiencia del proceso, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice B y Apéndice C, teniendo en cuenta las dos concentraciones aplicadas, la primera del 25% representada por el color azul y la segunda del 15% representada en color naranja.

Esta comparación entre las dos concentraciones nos muestra que a bajos valores de corriente el electrolito con una concentración del 15%, presenta una mayor eficiencia en comparación con la concentración del 25%, sin embargo, a medida que se incrementa la corriente, las eficiencias convergen mostrando valores similares en corrientes cercanas a los 12A. Este comportamiento se puede dar debido a que la concentración del 15% tiene una capacidad limitada para mantener la eficiencia a corrientes más altas, debido a una baja conductividad iónica en comparación con la otra concentración de electrolito.

En cuanto a la mezcla del 25% muestra una mayor estabilidad en el proceso y mejora de la eficiencia con el aumento de la corriente, lo cual indica que es adecuada para procesos a corrientes más elevadas.

Figura 20 Eficiencia Vs Amperaje Mezcla del 25% 3 Celdas

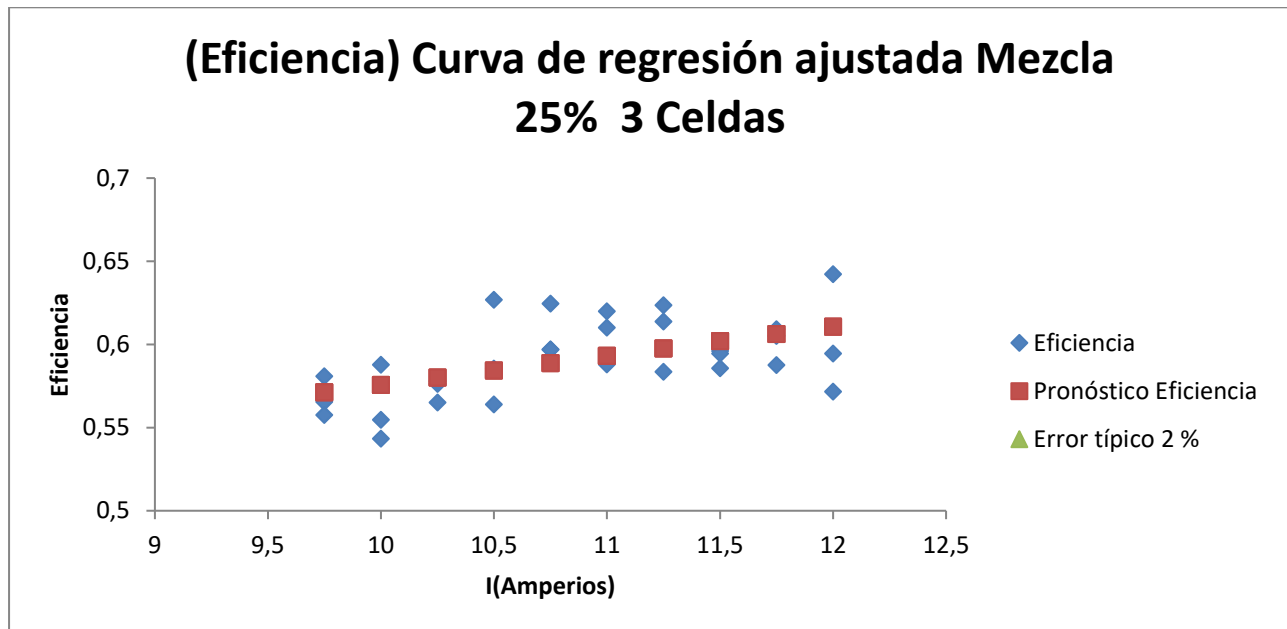
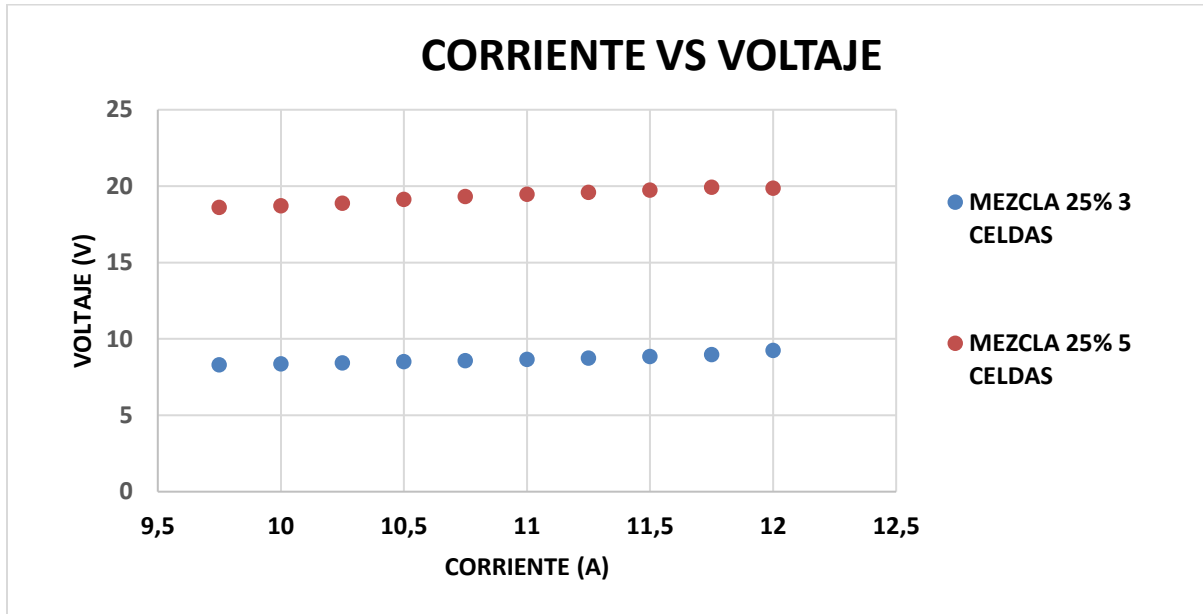


Figura 22 Corriente vs Voltaje Comparacion de Cantidad de celdas



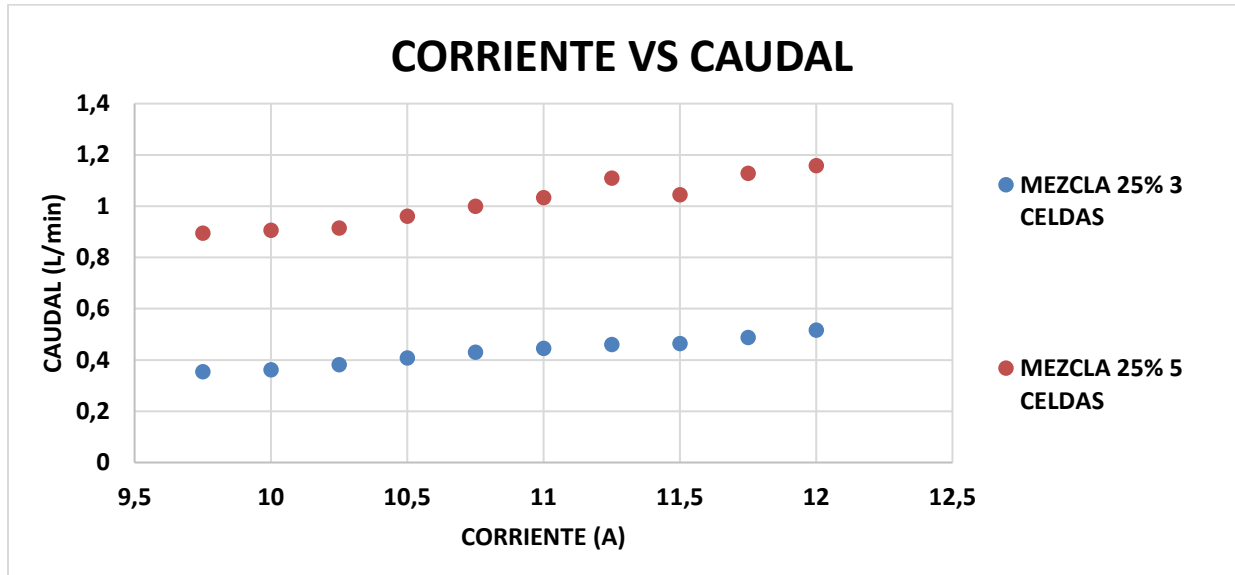
La Figura 23 muestra la relación entre la corriente aplicada al electrolizador y el caudal producido con dos configuraciones, en la cual los datos están tabulados en el Apéndice B y Apéndice D, la primera con una concentración en el electrolito del 25% en un sistema de tres celdas (color azul) y la segunda con una concentración igual del 25% pero con un sistema de 5 celdas (color naranja).

La pendiente de las dos gráficas muestra que el sistema de 5 celdas tiene un incremento mayor en el caudal por unidad de corriente comparado con el sistema de 3 celdas. Esto indica que, bajo las mismas condiciones de corriente aplicada, la configuración de 5 celdas es más eficiente en términos de producción. Cabe recalcar que este tipo de configuración requiere una mayor potencia, debido al incremento en el voltaje.

En la Figura 23 se puede validar que el caudal de hidrógeno que se produce se puede controlar mediante la corriente aplica y se puede evidenciar las diferencias de rendimiento entre

las dos configuraciones analizadas, siendo la configuración de 5 celdas la adecuada para aplicaciones que requieran un caudal de producción mayor.

Figura 23 Corriente vs Caudal Comparacion de Cantidad de celdas



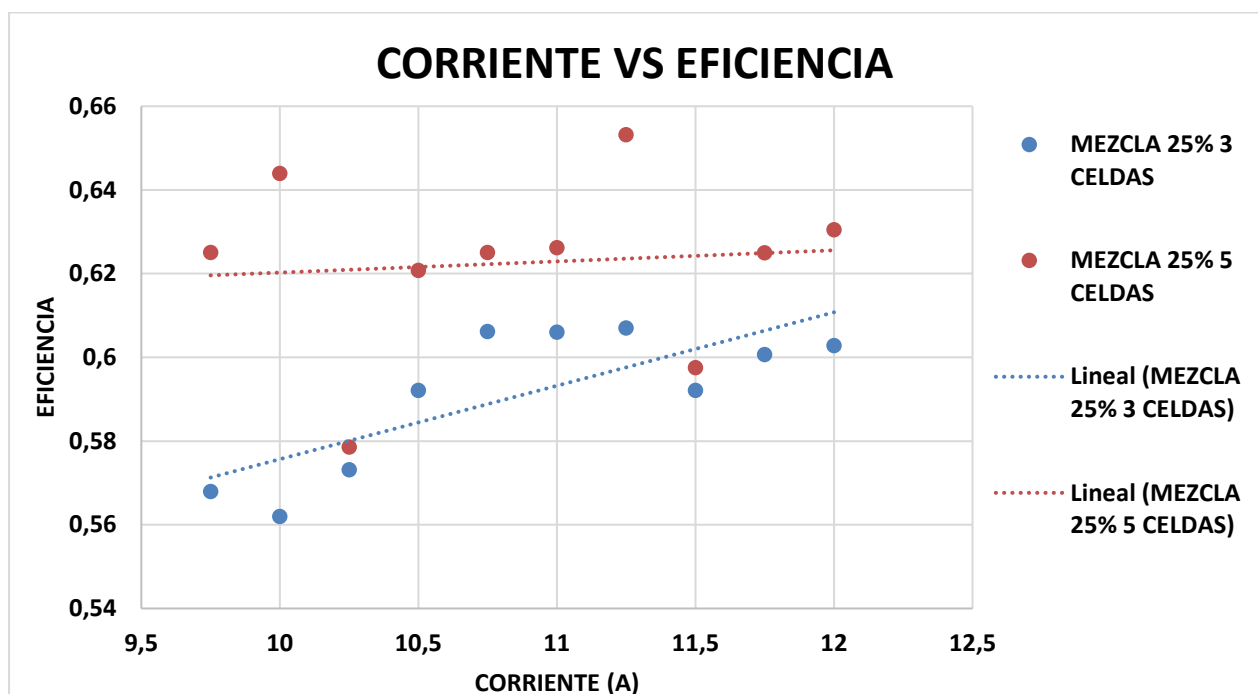
La Figura 24 muestra la relación entre la corriente aplicada al sistema y la eficiencia del proceso para dos tipos de configuraciones analizadas en la cual los datos están tabulados en las tablas Apéndice B y Apéndice D. una configuración con una concentración de electrolito del 25% en un sistema de 3 celdas (representada en color azul) y otra con una concentración del 25% pero con un sistema de 5 celdas (representada en color naranja).

Al comparar las dos configuraciones, el sistema que contiene tres celdas tiene un comportamiento más predecible y una mejora en la eficiencia con el aumento de la corriente mientras que al hacer el análisis del comportamiento del sistema de 5 celdas se puede evidenciar que la eficiencia permanece prácticamente constante con unas leves variaciones independientemente de la corriente aplicada a la celda. Esto podría presentarse porque en la

configuración de 5 celdas, se presentan mayores pérdidas internas o diferencias en la dinámica de la reacción electroquímica que podrían afectar el desempeño del equipo.

Esta gráfica muestra que, en el sistema de 5 celdas a pesar de obtenerse una mayor producción de hidrógeno, como lo pudimos evidenciar en los análisis previos, no optimiza la eficiencia del proceso en comparación con el sistema de 3 celdas en este caso.

Figura 24 Corriente vs Eficiencia Comparacion de Cantidad de celdas



6 Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se logró diseñar y construir el prototipo de un electrolizador alcalino con la capacidad de producir entre 0.5 a 1 L/min. En el diseño se tuvieron en cuenta la selección de los materiales adecuados que garantizaran un correcto funcionamiento y seguridad al utilizar el equipo. La selección de los materiales es importante para garantizar y maximizar la eficiencia en el sistema y así obtener los resultados esperados.

La evaluación de las diferentes concentraciones de electrolito (15% y 25%) permitió identificar que el aumento en la concentración mejora significativamente la producción en el sistema, esto se debe a que hay una mayor conductividad en el electrolito, también hay que tener en cuenta que esto también aumenta el consumo energético. Además de esto, la comparación entre sistemas de 3 y 5 celdas evidencio que un mayor número de celdas incrementa el voltaje necesario, pero ofrece una mayor producción, de igual manera cuando se tienen un mayor número de celdas el sistema se comporta de una manera más estable tanto en producción como en consumo energético.

Las pruebas que se realizaron demostraron una relación lineal entre la corriente aplicada y el caudal producido. De igual manera también se observó que la eficiencia del sistema disminuye ligeramente al aumentar la corriente, esto debido a factores como el sobrecalentamiento del electrolito y las pérdidas energéticas en forma de calor. Esto nos muestra la importancia de operar el electrolizador dentro de los rangos óptimos para obtener la mejor eficiencia que nos puede entregar el sistema.

Las pruebas que se realizaron para caracterizar el comportamiento eléctrico en el electrolizador permitieron identificar que la eficiencia en el sistema se ve influenciada por factores como: el tamaño del equipo, la concentración del electrolito y la configuración de las celdas. Se

evidencio que a medida que aumenta la temperatura del electrolito esta reduce los requerimientos de potencia eléctrica, lo que podría ser importante para integrar en diseños futuros para llegar a un balance energético.

El desarrollo de este proyecto muestra que es viable producir hidrógeno verde mediante un sistema de electrólisis alcalina diseñado para operar con el menor consumo e incluso con la implementación de energías renovables como la solar o la eólica para hacerlo más viable, alineándose con la transición energética y reduciendo las emisiones contaminantes. Los resultados obtenidos contribuyen como punto de partida para el desarrollo de sistemas de obtención de hidrógeno más avanzados y escalables que permitan fomentar el uso de fuentes de energía sostenibles.

Referencias bibliográficas

Aguinaga, Á. (2009). Diseño y construcción de un prototipo de planta dispensadora de hidrógeno doméstica, con electrolizador híbrido, solar y eléctrico.

Andrews, S. Fastqc, (2010). A quality control tool for high throughput sequence data.

Augen, J. (2004). Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine. Addison-Wesley Professional.

Blankenberg, D., Kuster, G. V., Coraor, N., Ananda, G., Lazarus, R., Mangan, M., ... & Taylor, J. (2010). Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists. *Current protocols in molecular biology*, 19-10.

Bolger, A., & Giorgi, F. Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. URL <http://www.usadellab.org/cms/index.php>

Carrasco, E. R., & Paricio, A. I. (2022). Electrolizadores: Análisis, Perspectivas de Mercado y Comparación.

Daoudi, C., & Bounahmidi, T. (2024). Overview of alkaline water electrolysis modeling. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 49, pp. 646–667). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.345>

Giardine, B., Riemer, C., Hardison, R. C., Burhans, R., Elnitski, L., Shah, P., ... & Nekrutenko, A. (2005). Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis. *Genome research*, 15(10), 1451-1455.

Herraiz, I. (2012). *El hidrógeno verde: una alternativa sostenible para la transición energética*. Universidad Politécnica de Valencia.

Klaus Schmidt-Rohr. (2018). Cómo almacenan y liberan energía las baterías: explicación de la electroquímica básica.

M, A., & G, P. K. (2023). Hydrogen towards sustainable transition: A review of production, economic, environmental impact and scaling factors. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101456>

Marcelo Miranda. (2022). Diseño, fabricación y caracterización de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica.

Mario León, & Edwin García. (2023). Diseño y construcción de un electrolizador experimental para la medición de la producción de hidrógeno verde. www.udea.edu.co

Mostafa, E.-S. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>

Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>

Qiyu Wang, Y. G. Y. Z. (2021). Electrocatalizadores altamente activos y duraderos potenciados con fase líquida iónica para la reacción de evolución de hidrógeno en electrolitos ácidos. ELSEVIER.

PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. In *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* (Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/273125977>

Qiyu Wang, Y. G. Y. Z. (2021). Electrocatalizadores altamente activos y duraderos potenciados con fase líquida iónica para la reacción de evolución de hidrógeno en electrolitos ácidos. ELSEVIER.

Ramírez, L. , J. R. (n.d.). Modelo dinámico de un electrolizador alcalino. Universidad de Sevilla.

Rashid, M., Khaloofah, M., Mesfer, A., Naseem, H., Danish, M., & Al Mesfer, M. K. (2015). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. In International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) (Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/273125977>

Rondán, J. (2016). Automatizaci3nCorregido2, Operaci3n yCaracterizaci3n - copia. Universidad de Sevilla.


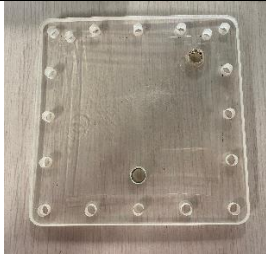
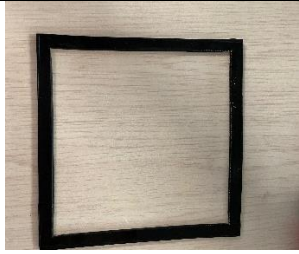


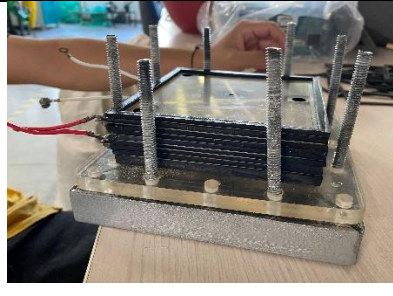
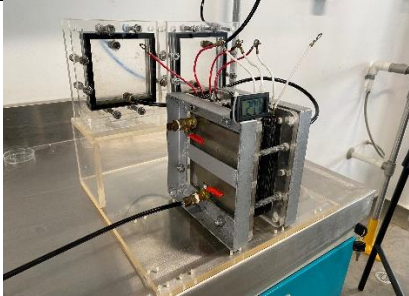

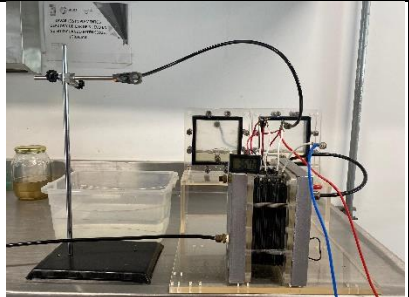
Rosen, M. A., & Koohi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. Energy, Ecology and Environment, 1(1), 10–29. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>

Vallejo, P. O. (2003). "Ensamble y evaluación de una celda combustible tipo PEM " MAESTRÍA EN ELECTROQUÍMICA.

Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. In Progress in Energy and Combustion Science (Vol. 36, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>

Apéndices

Apéndice A piezas del prototipo del electrolizador

PIEZAS DEL PROTOTIPO DEL ELECTROLIZADOR		
Marco en ángulo de acero	Placa de acrílico	Empaque separador de placas
		
Placa de acero inoxidable AISI 304	Inicio proceso de unión de piezas	Montaje de placas con sus diferentes polaridades
		
Montaje final junto con los tanques de distribución	Fuentes de energía	Prueba de producción de hidrógeno
		

Apéndice B Datos de la mezcla al 25% y una configuración de 3 celdas

mezcla 25% 3 Celdas										
vol (ml)	tiempo (s)	Q(ml/s)	Q(L/m)	I(Amperios)	V(voltios)	Pot_electrica (W)	V (L)	n (moles)	potencia del hidrogeno (w) *0.6 de el % de hidrogeno	Eficiencia
	9,39	8,51970181	0,51118211	12	9,3	111,6	0,0085197	0,00023203	66,36160487	0,59463804
	9,81	8,15494393	0,48929664	12	9,26	111,12	0,00815494	0,0002221	63,52043524	0,57163819
	8,76	9,13242009	0,54794521	12	9,23	110,76	0,00913242	0,00024872	71,13418604	0,64223714
	9,64	8,29875519	0,49792531	11,75	9,03	106,1025	0,00829876	0,00022602	64,64060889	0,60922795
	10,06	7,95228628	0,47713718	11,75	8,97	105,3975	0,00795229	0,00021658	61,9418956	0,58769796
	9,79	8,17160368	0,49029622	11,75	8,95	105,1625	0,0081716	0,00022255	63,6502012	0,60525569
	10,43	7,67018217	0,46021093	11,5	8,87	102,005	0,00767018	0,0002089	59,74453209	0,585702
	10,27	7,78967868	0,46738072	11,5	8,85	101,775	0,00778968	0,00021215	60,67531351	0,5961711
	10,31	7,75945684	0,46556741	11,5	8,84	101,66	0,00775946	0,00021133	60,43990977	0,5945299
	10,29	7,77453839	0,4664723	11,25	8,77	98,6625	0,00777454	0,00021174	60,55738287	0,61378318
80	10,15	7,8817734	0,4729064	11,25	8,75	98,4375	0,00788177	0,00021466	61,39265711	0,62367144
	10,86	7,3664825	0,44198895	11,25	8,74	98,325	0,00736648	0,00020063	57,3789567	0,58356427
	11,1	7,20720721	0,43243243	11	8,68	95,48	0,00720721	0,00019629	56,1383306	0,58795906
	10,54	7,59013283	0,45540797	11	8,67	95,37	0,00759013	0,00020672	59,12101231	0,61991205
	10,72	7,46268657	0,44776119	11	8,66	95,26	0,00746269	0,00020325	58,12830874	0,61020689
	10,79	7,41427247	0,44485635	10,75	8,6	92,45	0,00741427	0,00020193	57,75120201	0,62467498
	11,3	7,07964602	0,42477876	10,75	8,59	92,3425	0,00707965	0,00019281	55,14473183	0,59717608
	11,32	7,06713781	0,42402827	10,75	8,58	92,235	0,00706714	0,00019247	55,04730298	0,59681577
	11,11	7,20072007	0,4320432	10,5	8,52	89,46	0,00720072	0,00019611	56,08780105	0,62695955
	11,91	6,7170445	0,40302267	10,5	8,51	89,355	0,00671704	0,00018294	52,3203585	0,58553364
	12,38	6,46203554	0,38772213	10,5	8,5	89,25	0,00646204	0,00017599	50,3340444	0,56396688

12,5	6,4	0,384	10,25	8,44	86,51	0,0064	0,0001743	49,85083758	0,57624364
12,46	6,42054575	0,38523274	10,25	8,44	86,51	0,00642055	0,00017486	50,01087237	0,57809354
12,76	6,26959248	0,37617555	10,25	8,43	86,4075	0,00626959	0,00017075	48,83506816	0,56517164
12,65	6,32411067	0,37944664	10	8,38	83,8	0,00632411	0,00017224	49,25972093	0,58782483
13,7	5,83941606	0,35036496	10	8,37	83,7	0,00583942	0,00015904	45,48434085	0,54342104
13,42	5,96125186	0,35767511	10	8,37	83,7	0,00596125	0,00016235	46,4333435	0,55475918
13,6	5,88235294	0,35294118	9,75	8,31	81,0225	0,00588235	0,00016021	45,81878454	0,56550692
13,24	6,04229607	0,36253776	9,75	8,31	81,0225	0,0060423	0,00016456	47,06461252	0,58088324
13,81	5,79290369	0,34757422	9,75	8,3	80,925	0,0057929	0,00015777	45,12204705	0,55757859

Apéndice C Datos de la mezcla al 15% y una configuración de 3 celdas

mezcla 15% 3 celdas										
vol (ml)	tiempo (s)	Q(ml/s)	Q(L/m)	I(Amperios)	V(voltios)	Pot_electrica (W)	V (L)	n (moles)	potencia del hidrogeno (w) *0.6 de el % de hidrogeno	eficiencia
80	8,66	9,23787529	0,55427252	12	9,55	114,6	0,00923788	0,00025159	71,95559696	0,62788479
	9,21	8,68621064	0,52117264	12	9,62	115,44	0,00868621	0,00023657	67,65857434	0,58609299
	8,73	9,16380298	0,54982818	12	9,62	115,44	0,0091638	0,00024958	71,37863341	0,61831803
	9,69	8,25593395	0,49535604	11,75	9,55	112,2125	0,00825593	0,00022485	64,30706602	0,57308291
	9,06	8,83002208	0,52980132	11,75	9,54	112,095	0,00883002	0,00024049	68,77874942	0,61357553
	8,99	8,89877642	0,53392659	11,75	9,52	111,86	0,00889878	0,00024236	69,31429029	0,61965216
	9,76	8,19672131	0,49180328	11,5	9,45	108,675	0,00819672	0,00022324	63,84584731	0,58749342
	9,31	8,59291085	0,51557465	11,5	9,43	108,445	0,00859291	0,00023403	66,93184422	0,61719622
	9,03	8,8593577	0,53156146	11,5	9,4	108,1	0,00885936	0,00024128	69,00725024	0,63836494
	9,34	8,56531049	0,51391863	11,25	9,35	105,1875	0,00856531	0,00023328	66,71685971	0,63426605
	10,11	7,91295747	0,47477745	11,25	9,32	104,85	0,00791296	0,00021551	61,63555586	0,58784507
	9,49	8,42992624	0,50579557	11,25	9,31	104,7375	0,00842993	0,00022959	65,66232558	0,62692279
	9,68	8,26446281	0,49586777	11	9,27	101,97	0,00826446	0,00022508	64,37349894	0,63129841
	10,14	7,88954635	0,47337278	11	9,24	101,64	0,00788955	0,00021487	61,45320214	0,60461631
	10,23	7,82013685	0,46920821	11	9,2	101,2	0,00782014	0,00021298	60,91255813	0,60190275
	10,28	7,78210117	0,46692607	10,75	9,16	98,47	0,0077821	0,00021195	60,61629083	0,6155813
	10,36	7,72200772	0,46332046	10,75	9,13	98,1475	0,00772201	0,00021031	60,14821136	0,61283488
	9,99	8,00800801	0,48048048	10,75	9,13	98,1475	0,00800801	0,0002181	62,37592289	0,63553247
	10,61	7,54005655	0,45240339	10,5	9,07	95,235	0,00754006	0,00020535	58,7309585	0,61669511
	10,26	7,79727096	0,46783626	10,5	9,06	95,13	0,00779727	0,00021236	60,73445124	0,63843636
	10,06	7,95228628	0,47713718	10,5	9,04	94,92	0,00795229	0,00021658	61,9418956	0,65256949
	10,41	7,68491835	0,4610951	10,25	8,99	92,1475	0,00768492	0,0002093	59,85931505	0,64960325
	10,48	7,63358779	0,45801527	10,25	8,97	91,9425	0,00763359	0,0002079	59,45949138	0,64670301

10,76	7,43494424	0,44609665	10,25	8,96	91,84	0,00743494	0,00020249	57,91221837	0,63057729
10,99	7,27934486	0,43676069	10	8,91	89,1	0,00727934	0,00019825	56,70022472	0,63636616
11,04	7,24637681	0,43478261	10	8,89	88,9	0,00724638	0,00019735	56,44343023	0,63490923
10,66	7,50469043	0,45028143	10	8,86	88,6	0,00750469	0,00020439	58,45548496	0,65976845
10,54	7,59013283	0,45540797	9,75	8,81	85,8975	0,00759013	0,00020672	59,12101231	0,68827396
10,94	7,31261426	0,43875686	9,75	8,8	85,8	0,00731261	0,00019916	56,95936652	0,66386208
11,34	7,05467372	0,42328042	9,75	8,78	85,605	0,00705467	0,00019213	54,95021779	0,6419043
11,84	6,75675676	0,40540541	9,5	8,73	82,935	0,00675676	0,00018402	52,62968494	0,63458956
11,36	7,04225352	0,42253521	9,5	8,71	82,745	0,00704225	0,0001918	54,85347445	0,66292192
11,53	6,93842151	0,41630529	9,5	8,71	82,745	0,00693842	0,00018897	54,04470683	0,6531477
11,98	6,67779633	0,40066778	9,25	8,66	80,105	0,0066778	0,00018187	52,01464689	0,64933084
12,14	6,58978583	0,39538715	9,25	8,65	80,0125	0,00658979	0,00017947	51,32911612	0,64151371
12,13	6,59521847	0,39571311	9,25	8,64	79,92	0,00659522	0,00017962	51,37143196	0,64278569
12,6	6,34920635	0,38095238	9	8,59	77,31	0,00634921	0,00017292	49,45519601	0,63969986
12,13	6,59521847	0,39571311	9	8,58	77,22	0,00659522	0,00017962	51,37143196	0,66526071
12,21	6,55200655	0,39312039	9	8,58	77,22	0,00655201	0,00017844	51,034846	0,66090192
12,48	6,41025641	0,38461538	8,75	8,53	74,6375	0,00641026	0,00017458	49,93072674	0,66897641
13,36	5,98802395	0,35928144	8,75	8,51	74,4625	0,00598802	0,00016308	46,64187648	0,62638075
13,49	5,93031875	0,35581913	8,75	8,51	74,4625	0,00593032	0,00016151	46,19239953	0,62034446
13,33	6,00150038	0,36009002	8,5	8,46	71,91	0,0060015	0,00016345	46,74684694	0,65007436
13,44	5,95238095	0,35714286	8,5	8,45	71,825	0,00595238	0,00016211	46,36424626	0,64551683
13,68	5,84795322	0,35087719	8,5	8,44	71,74	0,00584795	0,00015927	45,55083843	0,63494338
13,99	5,71837026	0,34310222	8,25	8,37	69,0525	0,00571837	0,00015574	44,54149176	0,64503808
13,79	5,80130529	0,34807832	8,25	8,37	69,0525	0,00580131	0,000158	45,18748874	0,65439323
14,01	5,710207	0,34261242	8,25	8,36	68,97	0,00571021	0,00015552	44,47790647	0,64488773
14,51	5,51343901	0,33080634	8	8,31	66,48	0,00551344	0,00015016	42,94524257	0,6459874
15,09	5,30152419	0,31809145	8	8,31	66,48	0,00530152	0,00014439	41,29459706	0,6211582
15,13	5,28750826	0,3172505	8	8,31	66,48	0,00528751	0,000144	41,1854243	0,61951601

8,18	9,7799511	0,58679707	12	8,96	107,52	0,00977995	0,00026636	76,17793028	0,7085001
8,74	9,15331808	0,54919908	12	8,97	107,64	0,00915332	0,00024929	71,2969645	0,66236496
8,95	8,93854749	0,53631285	12	8,97	107,64	0,00893855	0,00024344	69,62407483	0,64682344

Apéndice D Datos de la mezcla al 25% y una configuración de 5 celdas

MEZCLA 25% 5 Celdas										
vol (ml)	tiempo (s)	Q(ml/s)	Q(L/m)	I(Amperios)	V(voltios)	Pot_electrica (W)	V (L)	n (moles)	potencia del hidrogeno (w) *0.6 de el % de hidrogeno	Eficiencia
80	26,64	3,003003	0,18018018	5	15,52	77,6	0,003003	8,1787E-05	23,3909711	0,30143004
	26,89	2,97508367	0,17850502	5	16,5	82,5	0,00297508	8,1026E-05	23,173502	0,28089093
	27,39	2,92077401	0,17524644	5	16,5	82,5	0,00292077	7,9547E-05	22,7504735	0,27576332
	23,92	3,34448161	0,2006689	5,25	16,76	87,99	0,00334448	9,1087E-05	26,050814	0,29606562
	23,29	3,43495062	0,20609704	5,25	16,79	88,1475	0,00343495	9,3551E-05	26,7554946	0,30353095
	23,95	3,34029228	0,20041754	5,25	16,75	87,9375	0,00334029	9,0973E-05	26,0181825	0,2958713
	20,66	3,87221684	0,23233301	5,5	16,96	93,28	0,00387222	0,00010546	30,1614458	0,32334312
	20,08	3,98406375	0,23904382	5,5	16,96	93,28	0,00398406	0,00010851	31,0326429	0,33268271
	19,5	4,1025641	0,24615385	5,5	16,96	93,28	0,00410256	0,00011173	31,9556651	0,34257789
	18,34	4,36205016	0,26172301	5,75	17,12	98,44	0,00436205	0,0001188	33,9768522	0,34515291
	17,67	4,52744765	0,27164686	5,75	17,12	98,44	0,00452745	0,0001233	35,2651652	0,3582402
	15,87	5,04095778	0,30245747	5,75	17,11	98,3825	0,00504096	0,00013729	39,2649949	0,39910548
	17,28	4,62962963	0,27777778	6	17,28	103,68	0,00462963	0,00012609	36,0610804	0,34781135
	16,01	4,99687695	0,29981262	6	17,28	103,68	0,00499688	0,00013609	38,9216408	0,37540163
	16,96	4,71698113	0,28301887	6	17,27	103,62	0,00471698	0,00012847	36,7414782	0,35457902
	13,24	6,04229607	0,36253776	6,25	17,85	111,5625	0,0060423	0,00016456	47,0646125	0,42186768
	13,88	5,76368876	0,34582133	6,25	17,59	109,9375	0,00576369	0,00015697	44,8944863	0,40836372
	13,44	5,95238095	0,35714286	6,25	17,58	109,875	0,00595238	0,00016211	46,3642463	0,42197266
	12,08	6,62251656	0,39735099	6,75	17,71	119,5425	0,00662252	0,00018036	51,5840621	0,43151232
	12,47	6,41539695	0,38492382	6,75	17,71	119,5425	0,0064154	0,00017472	49,9707674	0,41801675
11,93	6,70578374	0,40234702	6,75	17,71	119,5425	0,00670578	0,00018263	52,2326462	0,43693788	
11,44	6,99300699	0,41958042	7	17,83	124,81	0,00699301	0,00019045	54,4698837	0,43642243	
11,14	7,18132855	0,43087971	7	17,83	124,81	0,00718133	0,00019558	55,9367567	0,44817528	
11,31	7,07338638	0,42440318	7	17,82	124,74	0,00707339	0,00019264	55,0959743	0,4416865	

10,5	7,61904762	0,45714286	7,25	17,61	127,6725	0,00761905	0,0002075	59,3462352	0,46483178
10,58	7,56143667	0,4536862	7,25	17,96	130,21	0,00756144	0,00020594	58,8974924	0,45232695
10,06	7,95228628	0,47713718	7,25	17,96	130,21	0,00795229	0,00021658	61,9418956	0,47570767
9,86	8,11359026	0,48681542	7,5	18,18	136,35	0,00811359	0,00022097	63,1983235	0,46350072
9,69	8,25593395	0,49535604	7,5	18,08	135,6	0,00825593	0,00022485	64,307066	0,4742409
9,55	8,37696335	0,5026178	7,5	18,08	135,6	0,00837696	0,00022815	65,2497874	0,48119312
8,76	9,13242009	0,54794521	7,75	18,17	140,8175	0,00913242	0,00024872	71,134186	0,5051516
9,07	8,82028666	0,5292172	7,75	18,17	140,8175	0,00882029	0,00024022	68,7029184	0,48788622
8,99	8,89877642	0,53392659	7,75	18,18	140,895	0,00889878	0,00024236	69,3142903	0,49195706
8,32	9,61538462	0,57692308	8	17,97	143,76	0,00961538	0,00026187	74,8960901	0,52098004
7,52	10,6382979	0,63829787	8	17,97	143,76	0,0106383	0,00028973	82,8637593	0,57640345
8,3	9,63855422	0,57831325	8	17,97	143,76	0,00963855	0,00026251	75,0765626	0,52223541
8,08	9,9009901	0,59405941	8,25	18,06	148,2525	0,00990099	0,00026965	77,1207264	0,52019849
7,41	10,7962213	0,64777328	8,25	18,06	148,995	0,01079622	0,00029403	84,0938556	0,56440723
7,65	10,4575163	0,62745098	8,25	18,06	148,995	0,01045752	0,00028481	81,455617	0,54670034
7,27	11,0041265	0,66024759	8,5	18,14	154,19	0,01100413	0,0002997	85,7132696	0,55589383
7	11,4285714	0,68571429	8,5	18,14	154,19	0,01142857	0,00031126	89,0193528	0,57733545
7,4	10,8108108	0,64864865	8,5	18,14	154,19	0,01081081	0,00029443	84,2074959	0,54612813
7,21	11,0957004	0,66574202	8,75	18,23	159,5125	0,0110957	0,00030219	86,4265561	0,54181682
6,72	11,9047619	0,71428571	8,75	18,23	159,5125	0,01190476	0,00032423	92,7284925	0,5813243
7,04	11,3636364	0,68181818	8,75	18,32	160,3	0,01136364	0,00030949	88,513561	0,55217443
6,69	12,012012	0,72072072	9	18,32	164,88	0,01201201	0,00032715	93,5638843	0,56746655
6,65	12,0300752	0,72180451	9	18,32	164,88	0,01203008	0,00032764	93,7045819	0,56831988
6,66	12,012012	0,72072072	9	18,32	164,88	0,01201201	0,00032715	93,5638843	0,56746655
6,63	12,066365	0,7239819	9,25	18,43	170,4775	0,01206637	0,00032863	93,9872503	0,55131762
6,17	12,9659643	0,77795786	9,25	18,43	170,4775	0,01296596	0,00035313	100,994404	0,59242072
6,17	12,9659643	0,77795786	9,25	18,44	170,57	0,01296596	0,00035313	100,994404	0,59209945
6,18	12,9449838	0,77669903	9,5	18,52	175,94	0,01294498	0,00035256	100,830982	0,57309868
6,07	13,1795717	0,7907743	9,5	18,52	175,94	0,01317957	0,00035894	102,658232	0,58348433
5,89	13,582343	0,81494058	9,5	18,53	176,035	0,01358234	0,00036991	105,795496	0,60099126
5,34	14,9812734	0,8988764	9,75	18,61	181,4475	0,01498127	0,00040801	116,692036	0,64311735
5,46	14,6520147	0,87912088	9,75	18,62	181,545	0,01465201	0,00039905	114,127375	0,6286451
5,3	15,0943396	0,90566038	9,75	18,63	181,6425	0,01509434	0,00041109	117,57273	0,64727545

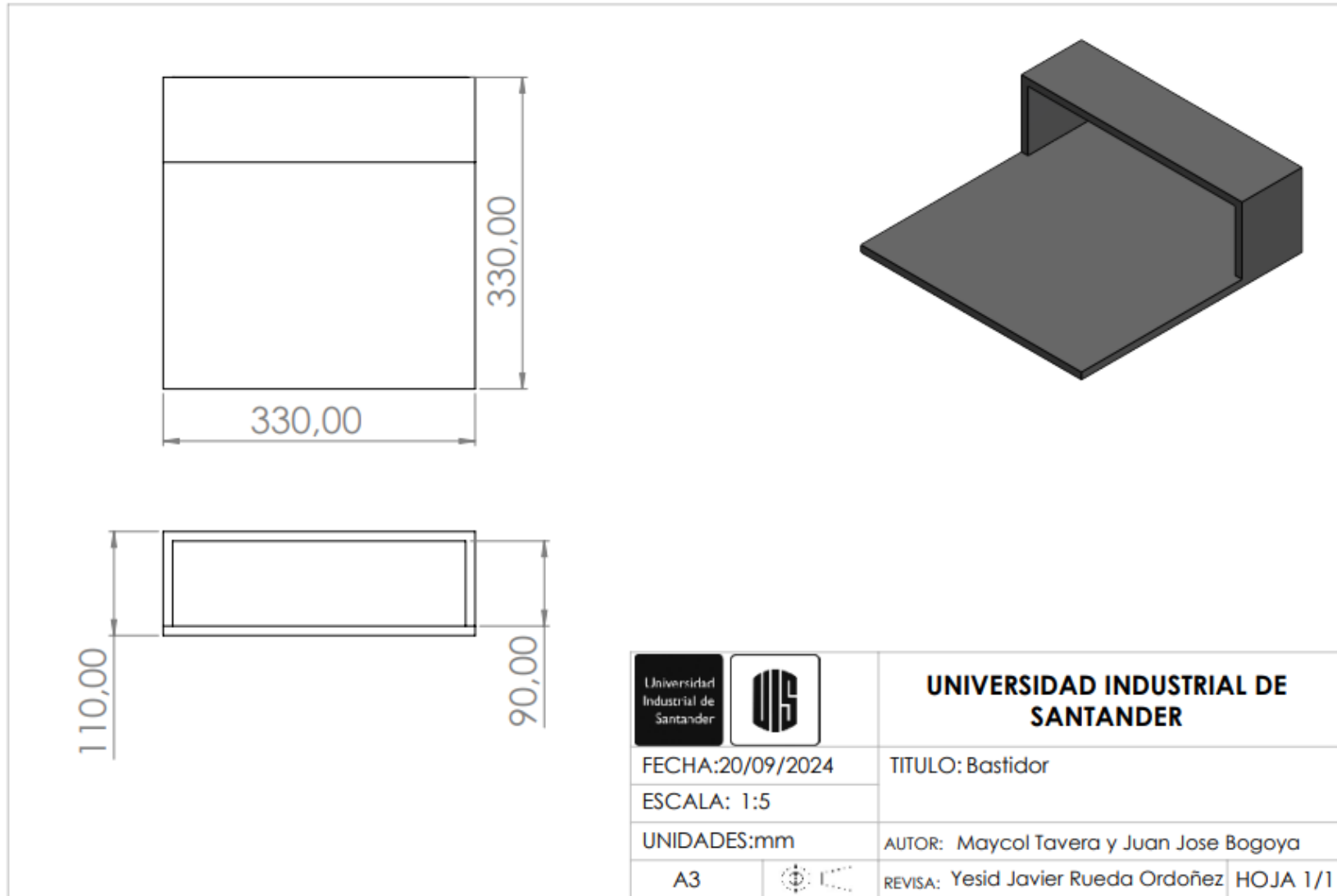
5,11	15,6555773	0,93933464	10	18,66	181,935	0,01565558	0,00042638	121,944319	0,67026311
5,35	14,953271	0,89719626	10	18,75	182,8125	0,01495327	0,00040725	116,47392	0,6371223
5,45	14,6788991	0,88073394	10	18,78	183,105	0,0146789	0,00039978	114,336783	0,62443289
5,38	14,8698885	0,89219331	10,25	18,82	192,905	0,01486989	0,00040498	115,824437	0,60042216
5,1	15,6862745	0,94117647	10,25	18,9	193,725	0,01568627	0,00042721	122,183425	0,63070551
5,27	15,1802657	0,91081594	10,25	18,94	194,135	0,01518027	0,00041343	118,242025	0,60907113
4,94	16,194332	0,97165992	10,5	19,07	200,235	0,01619433	0,00044105	126,140783	0,62996371
4,95	16,1616162	0,96969697	10,5	19,18	201,39	0,01616162	0,00044016	125,885953	0,62508542
5,09	15,7170923	0,94302554	10,5	19,2	201,6	0,01571709	0,00042805	122,423471	0,60725928
4,97	16,0965795	0,96579477	10,75	19,31	207,5825	0,01609658	0,00043839	125,37937	0,60399778
4,6	17,3913043	1,04347826	10,75	19,33	207,7975	0,0173913	0,00047365	135,464233	0,65190502
4,84	16,5289256	0,99173554	10,75	19,34	207,905	0,01652893	0,00045016	128,746998	0,61925879
4,54	17,6211454	1,05726872	11	19,46	214,06	0,01762115	0,00047991	137,254509	0,64119643
4,81	16,6320166	0,997921	11	19,48	214,28	0,01663202	0,00045297	129,549994	0,60458276
4,59	17,4291939	1,04575163	11	19,5	214,5	0,01742919	0,00047468	135,759362	0,63291078
4,33	18,4757506	1,10854503	11,25	19,6	220,5	0,01847575	0,00050319	143,911194	0,65265848
4,29	18,6480186	1,11888112	11,25	19,6	220,5	0,01864802	0,00050788	145,253023	0,65874387
4,36	18,3486239	1,10091743	11,25	19,6	220,5	0,01834862	0,00049972	142,920979	0,64816771
4,53	17,6600442	1,05960265	11,5	19,74	227,01	0,01766004	0,00048097	137,557499	0,60595348
4,42	18,0995475	1,08597285	11,5	19,74	227,01	0,01809955	0,00049294	140,980875	0,62103377
4,85	16,4948454	0,98969072	11,5	19,75	227,125	0,01649485	0,00044924	128,48154	0,56568647
4,34	18,4331797	1,10599078	11,75	19,88	233,59	0,01843318	0,00050203	143,579601	0,61466502
4,27	18,735363	1,12412178	11,75	19,87	233,4725	0,01873536	0,00051026	145,933365	0,62505591
4,16	19,2307692	1,15384615	11,75	20,07	235,8225	0,01923077	0,00052375	149,79218	0,63519037
4,27	18,735363	1,12412178	12	19,8	237,6	0,01873536	0,00051026	145,933365	0,61419767
4,19	19,0930788	1,14558473	12	19,9	238,8	0,01909308	0,00052	148,719683	0,62277924
3,98	20,1005025	1,20603015	12	19,93	239,16	0,0201005	0,00054744	156,566701	0,65465254

Apéndice E Plano de ensamble de todas las piezas del electrolizador

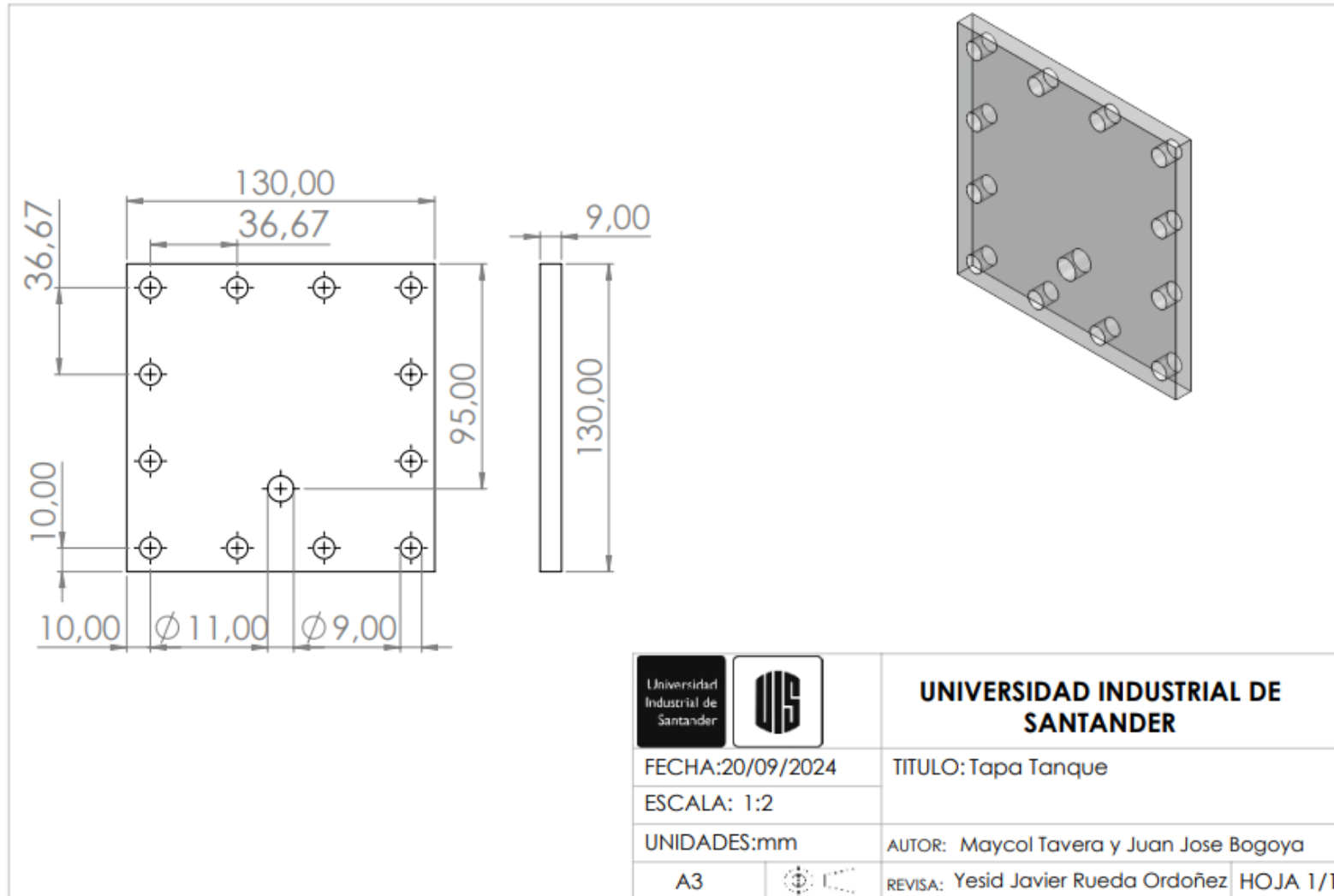
Numero	Titulo	Material	Cantidad
1	Bastidor	Acrilico	1
3	Tapa Tanque	Acrilico	4
4	Empaque Tanque	Nitrilo	6
5	Separador Tanque	Acrilico	4
6	Tapa Electrolizador	Acrilico	2
7	Empaque Electrolizador	Nitrilo	19
8	Placa Negativa	Acero 304	5
9	Placa neutra	Acero 304	9
10	Placa Positiva	Acero 304	5
11	Tornillos 8mm	Acero 304	24
12	Refuerzo de Tapa	Acero 304	2
13	Tuerca de 8mm	Acero 304	24

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	FECHA: 20/09/2024	TITULO: Ensamblaje
ESCALA: 1:5	AUTOR: Maycol Tavera y Juan Jose Bogoya	
UNIDADES: mm	REVISAR: Yesid Javier Rueda Ordoñez	HOJA 1/1
A3		

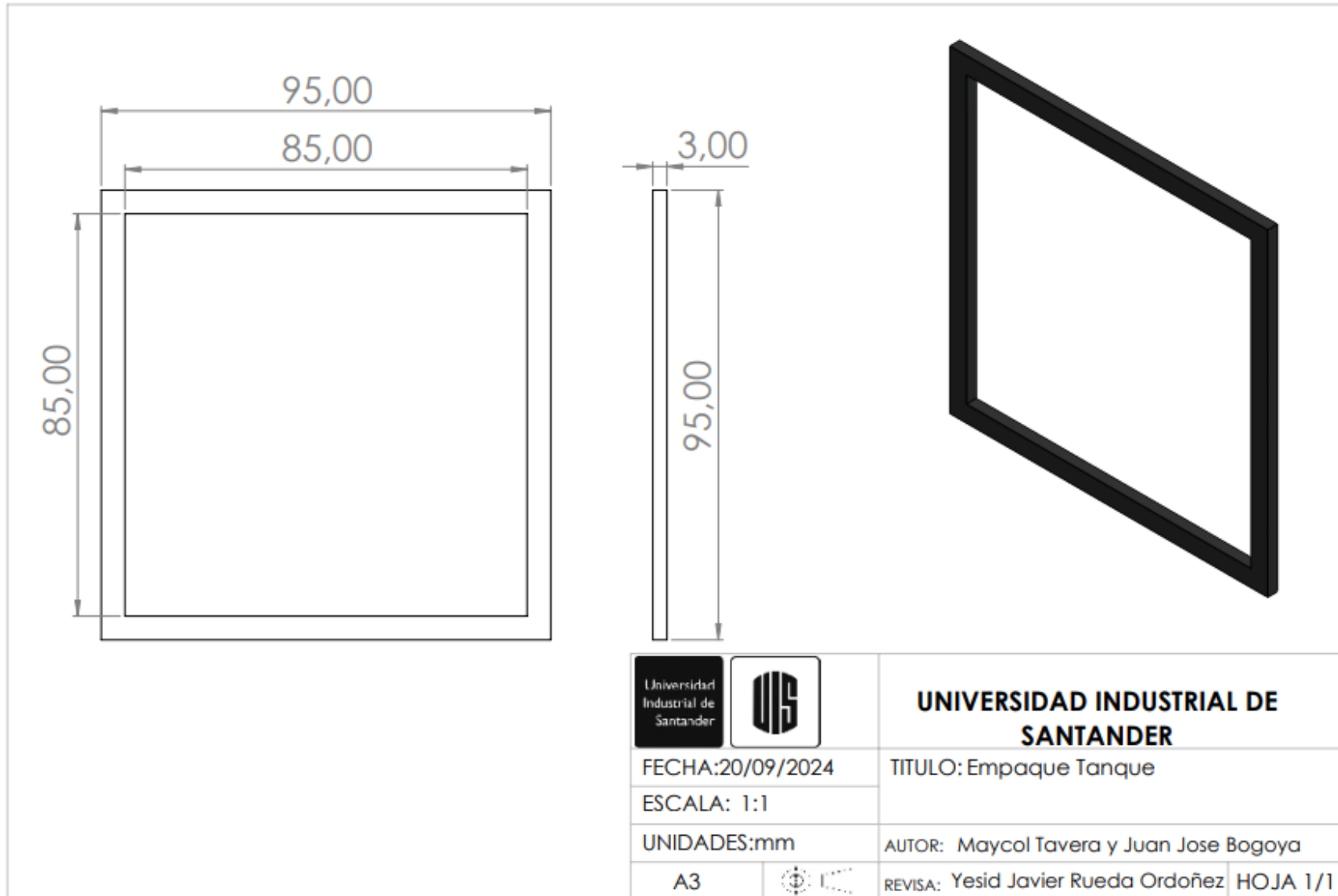
Apéndice F Plano de la base del electrolizador



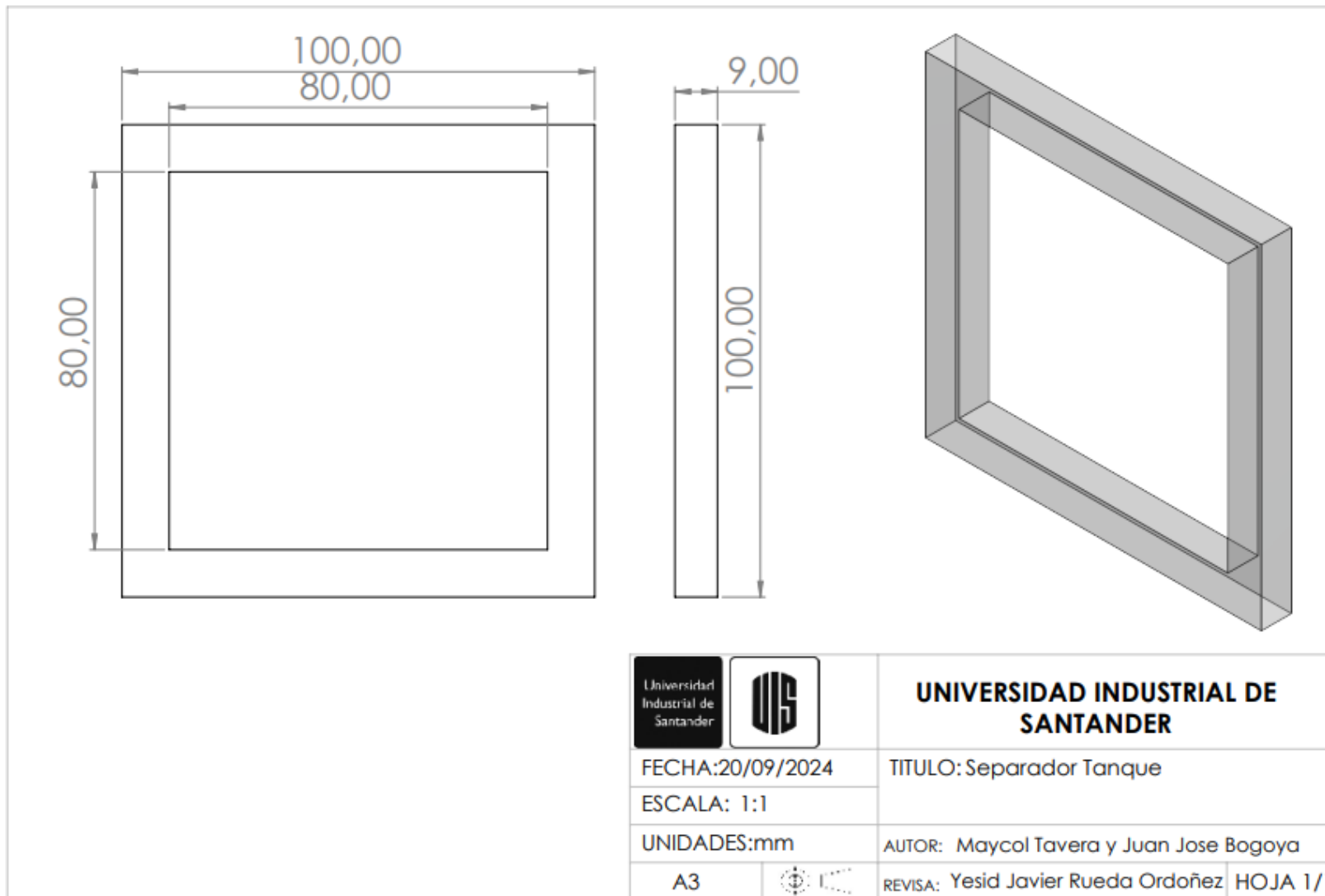
Apéndice G Plano de la tapa del tanque



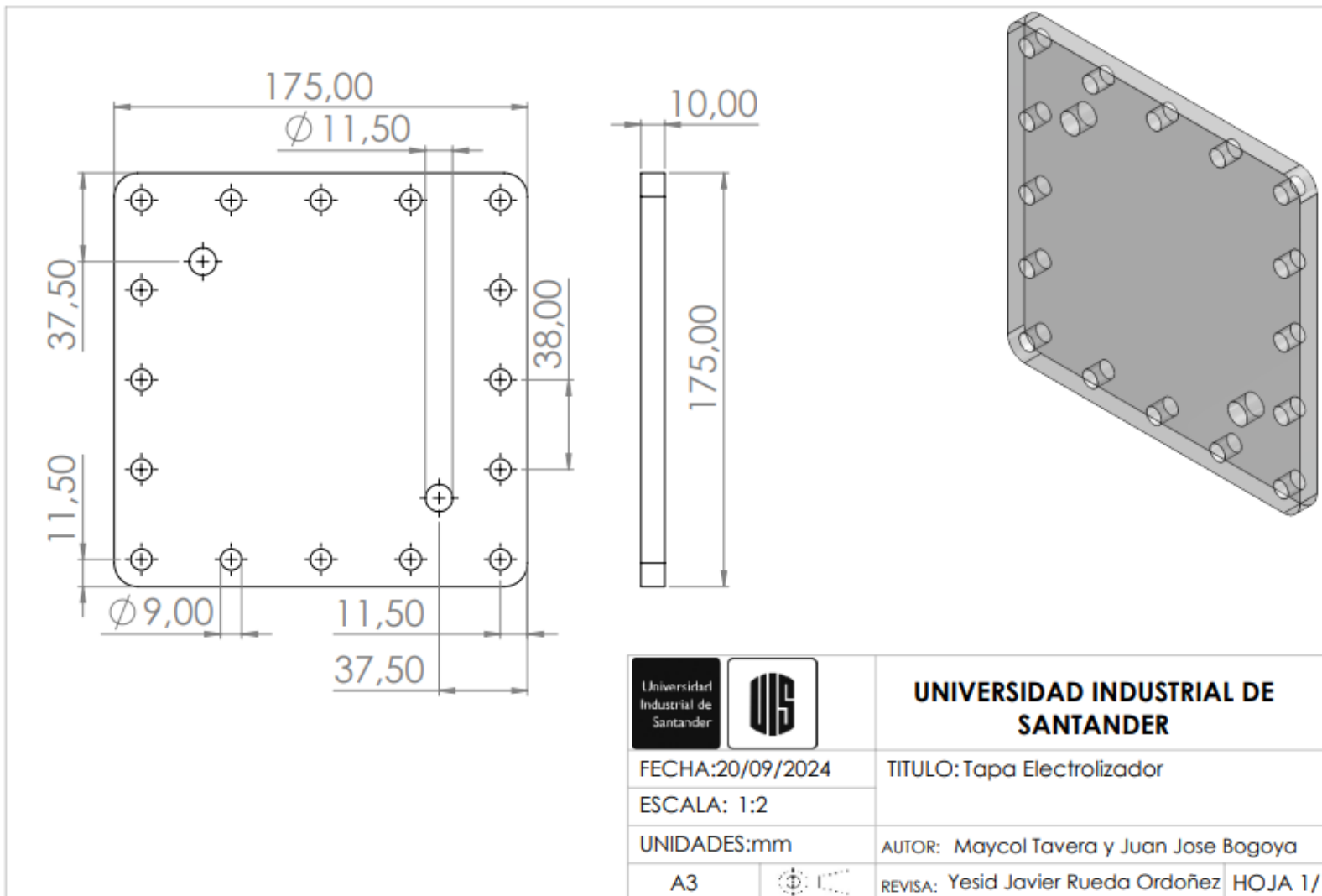
Apéndice H Plano de la tapa del tanque



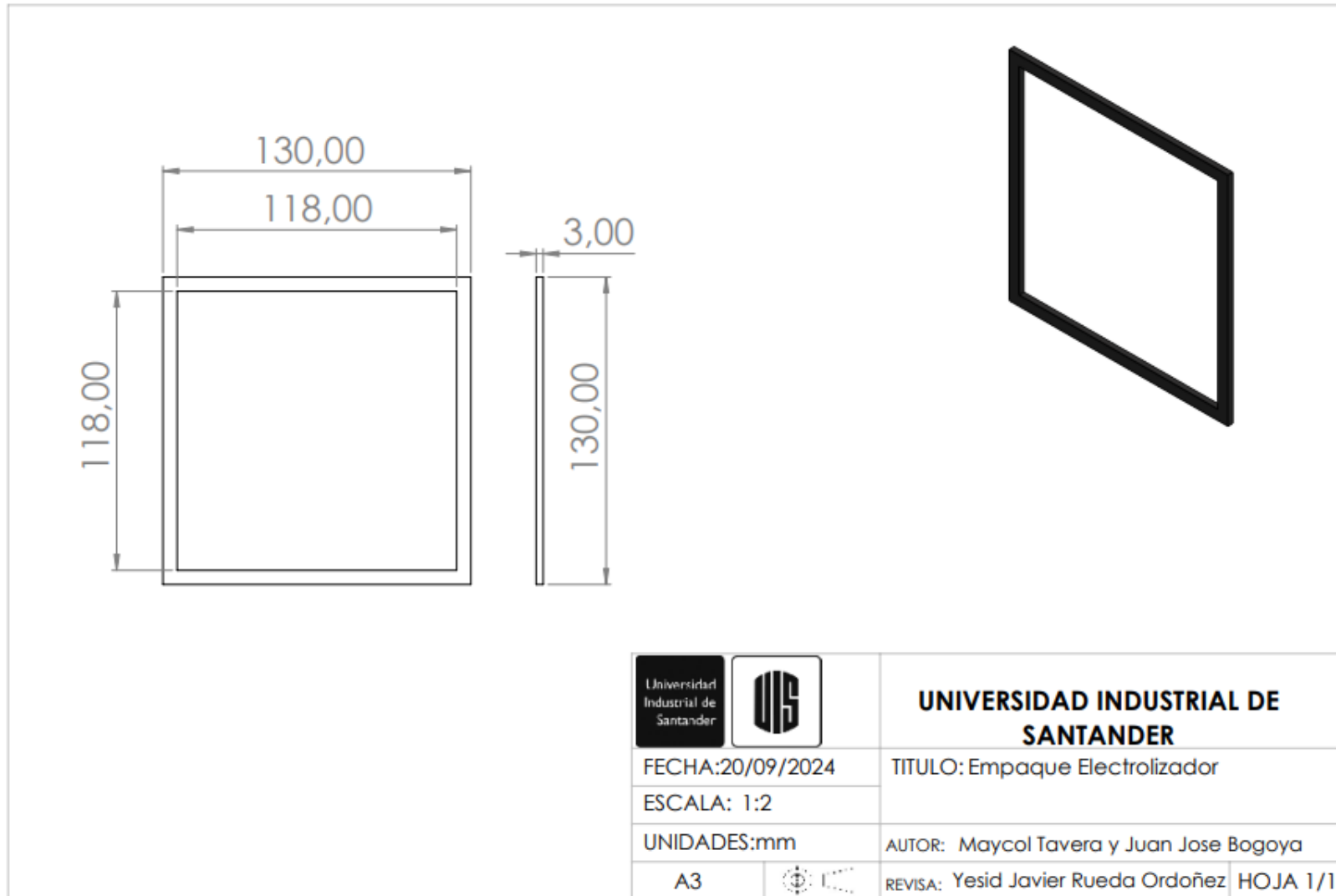
Apéndice I Plano de los separadores de los tanques de almacenamiento.



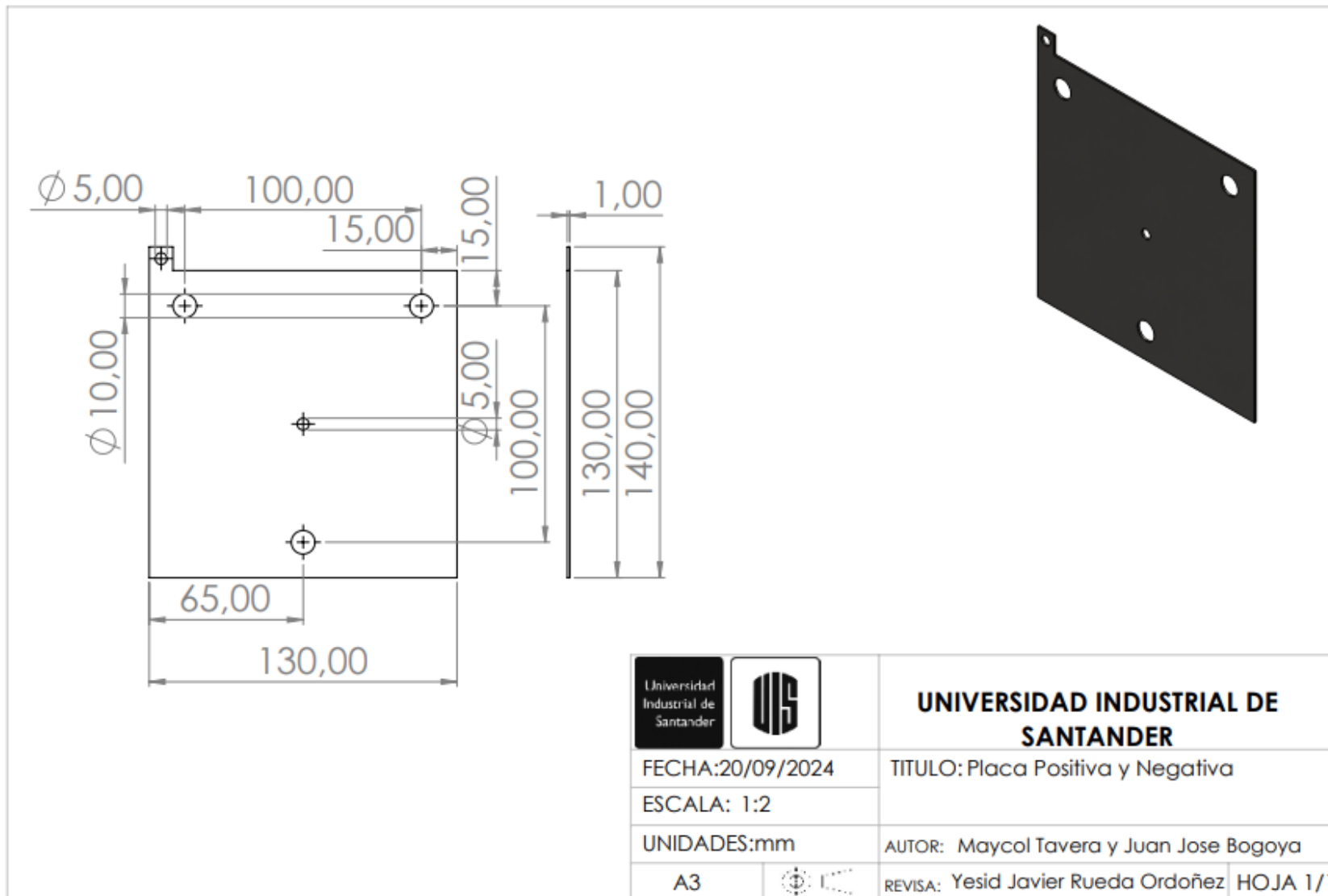
Apéndice J Plano de la tapa del electrolizador



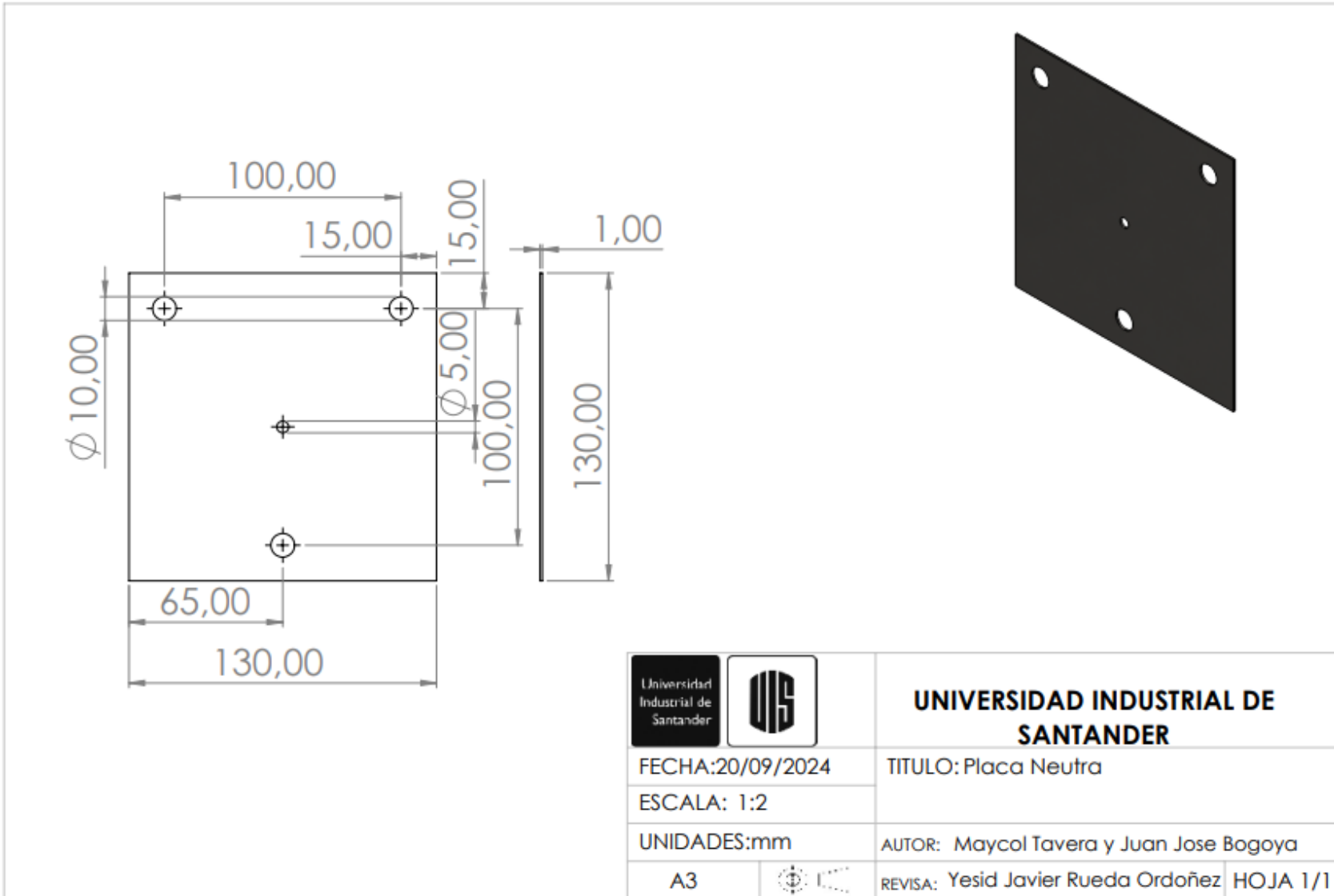
Apéndice K Plano del empaque separador de las placas



Apéndice L Plano de las placas positiva y negativa



Apéndice M Plano de las placas neutras



Apéndice N Plano del refuerzo de las tapas del electrolizador

