

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE CELDA PARA LA ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL  
AGUA BASADA EN EL USO DE ELECTROCATALIZADORES ALTERNATIVOS.

Autor:

Jose Felipe Rodríguez Castañeda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Sergio Ismael Blanco Vásquez

PhD en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2024

### **Agradecimientos**

Agradezco a Díos por todas y cada una de las oportunidades y bendiciones que me ha dado, por estar siempre que lo necesito. Agradezco a mis padres y mi hermano por ser apoyo incondicional y agradezco a mi novia por ser un pilar importante en mi formación, apoyo y amor incondicional.

A la Universidad Industrial de Santander por ser parte importante de mi formación personal y social además de la profesional. A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por su fraternidad con sus integrantes, su apoyo y cooperación, a los docentes quienes compartieron su conocimiento y así poder contribuir a mi formación profesional.

Al profesor Sergio Blanco por confiar en mí y ver un potencial que no es fácil de notar en la multitud, por su interés y conocimiento.

A mis compañeros y amigos más cercanos gracias por siempre de alguna manera ayudarme, con cada aporte se forma una persona, una vida, un futuro, hoy agradezco a todos quienes han hecho parte de mi vida académica y personal. De corazón gracias por tanto y por todo.

Jose Felipe Rodríguez Castañeda

## Tabla de contenido

Introducción .....	10
1. Planteamiento del problema .....	13
1.1 Pregunta de investigación.....	13
2. Objetivos .....	13
2.1 Objetivo general .....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Justificación.....	14
4. Marco Teórico .....	16
5. Metodología .....	18
5.1 Fase 1: Estudio comparativo de los diseños de celdas existentes utilizados en la electrólisis alcalina del agua .....	18
5.2 Fase 2: Diseño de boceto CAD .....	18
5.3 Fase 3: Selección de materiales.....	18
6. Resultados .....	19
6.1 Fase 1: Estudio comparativo de los diseños de celdas existentes utilizados en la electrólisis alcalina del agua .....	19
6.1.1 Tipos de celdas para la electrólisis del agua .....	19
6.1.1.1 Celda electrolítica alcalina (AEC).....	20
6.1.1.2 Celda electrolítica tipo (PEM).....	22

PROTOTIPO DE CELDA; ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA	4
6.1.1.3 Celda de Óxido Sólido (SOFC).....	24
6.1.1.4 Estudio comparativo 1.....	25
6.1.2 Configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas (AEC).....	27
6.1.2.1 Configuración tradicional (AEC).....	27
6.1.2.2 Configuración bipolar. ....	28
6.1.2.3 Configuración Zero Gap.....	29
6.1.2.4 Estudio comparativo 2.....	31
6.2 Fase 2: Diseño de boceto CAD .....	33
6.2.1 Electrodo.....	33
6.2.2 Membrana.....	34
6.2.3 Carcasa base .....	35
6.2.4 Base portaelectrodo y contacto eléctrico.....	36
6.2.5 Tornillos y tuercas .....	37
6.2.6 Plano General .....	38
6.3 Fase 3: Selección de materiales y procesos de fabricación .....	39
6.3.1 Electrodo.....	39
6.3.2 Membrana.....	43
6.3.3 Carcasa base y portaelectrodos .....	44
6.3.4 Contacto eléctrico.....	47
6.3.5 Tornillos y tuercas .....	47

PROTOTIPO DE CELDA; ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA 5

Conclusiones .....49

Recomendaciones .....49

Referencias Bibliográficas .....50

## Lista de figuras

<i>Figura 1. Esquema básico de una celda electrolítica.</i> .....	19
<i>Figura 2. Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica alcalina AEC.</i> .....	20
<i>Figura 3. Esquema de funcionamiento de una celda tipo PEM.</i> .....	22
<i>Figura 4. Esquema de funcionamiento de una celda SOFC (Óxido Sólido).</i> .....	24
<i>Figura 5. Configuración tradicional (AEC)</i> .....	27
<i>Figura 6. Configuración bipolar (AEC)</i> .....	28
<i>Figura 7. Configuración Zero Gap</i> .....	29
<i>Figura 8. Cell voltage at varying interelectrode gaps and Ohmic resistance vs current density.</i> .....	30
<i>Figura 9. Plano del electrodo</i> .....	33
<i>Figura 10. Membrana.</i> .....	34
<i>Figura 11. Plano Carcasa Base.</i> .....	35
<i>Figura 12. Plano Base portaelectrodo y contacto eléctrico.</i> .....	36
<i>Figura 13. Plano y posición de tornillos y tuercas.</i> .....	37
<i>Figura 14. Plano general de la celda ensamblada.</i> .....	38
<i>Figura 15. Conductividad eléctrica (Siemens/m) vs precio (USD/kg)</i> .....	40
<i>Figura 16. Huella de CO2, producción primaria, grado típico (kg/kg)</i> .....	41
<i>Figura 17. Resistencia a la corrosión (PREN) vs precio (USD/kg)</i> .....	42
<i>Figura 18. Resistividad eléctrica vs precio</i> .....	45
<i>Figura 19. Huella de CO2, reciclaje (kg/kg) vs precio (USD).</i> .....	46
<i>Figura 20. Transmisión de vapor de agua (kg.m/m<sup>2</sup>.s) vs precio (USD.)</i> .....	46
<i>Figura 21. Propiedades mecánicas del acero inoxidable-austenítico-AISI 316L</i> .....	48
<i>Figura 22. Durabilidad y resistencia a la corrosión del acero inoxidable-austenítico-AISI 316L</i> .....	48

**Lista de Tablas**

*Tabla 1. Matriz de comparación de tipos de celda electrolíticas.....26*

*Tabla 2. Matriz de comparación (configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas AEC) .....32*

## Resumen

**Título:** Diseño de un prototipo de celda para la electrólisis alcalina del agua basada en el uso de electrocatalizadores alternativos.

**Autor:** Jose Felipe Rodríguez Castañeda

**Palabras clave:** Hidrógeno, electrólisis, agua, celda electrolítica, diseño CAD.

El presente trabajo aborda los desafíos energéticos que han sido preocupación global, como consecuencia la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la generación y almacenamiento de energía. Entre estas alternativas, el hidrógeno emerge como una opción prometedora tanto para el almacenamiento como para la producción de energía. Sin embargo, su implementación enfrenta obstáculos significativos, tales como los costos asociados con su producción, almacenamiento y la infraestructura requerida para su utilización.

Con el objetivo de abordar estos desafíos, se llevó a cabo una investigación exhaustiva centrada en los diseños de celdas electrolíticas para la electrólisis del agua, un proceso crucial en la producción de hidrógeno. Este análisis se enfocó en identificar configuraciones óptimas que maximicen la eficiencia de la celda y minimicen los costos energéticos y de fabricación asociados como lo es la celda electrolítica alcalina. Para ello, se examinaron detalladamente los materiales más adecuados y con mejor desempeño para el funcionamiento de estas celdas de los cuales se sugieren acero inoxidable, níquel y materiales poliméricos, recurriendo a fuentes bibliográficas especializadas en el tema.

La integración de los tres aspectos clave; diseño, configuración y materiales, dio lugar a la elaboración de un diseño CAD utilizando el software FUSION 360, que incluye planos detallados del prototipo. Este diseño se basó en las recomendaciones de la literatura, incorporando una selección de materiales identificados como óptimos para la aplicación en el Software Ansys Granta Edupack. Dada la complejidad y exigencia computacional de este proceso de diseño, se optó por desarrollar una versión a menor escala del prototipo, de este modo se logró diseñar sin complicaciones.

---

Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Ingeniería Metalúrgica. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD en Ingeniería.

## Abstract

**Title:** Design of a cell prototype for alkaline electrolysis of water based on the use of alternative electrocatalysts.

**Author:** Jose Felipe Rodríguez Castañeda

**Key Words:** Hydrogen, electrolysis, water, electrolytic cell, CAD design.

**Descripción:** This work addresses the energy challenges that have been a global concern, resulting in the search for sustainable and efficient alternatives for energy generation and storage. Among these alternatives, hydrogen emerges as a promising option for both energy storage and production. However, its implementation faces significant obstacles, such as the costs associated with its production, storage, and the infrastructure required for its use.

In order to address these challenges, extensive research was carried out focusing on electrolytic cell designs for water electrolysis, a crucial process in hydrogen production. This analysis focused on identifying optimal configurations that maximize cell efficiency and minimize associated energy and manufacturing costs, such as the alkaline electrolytic cell. To this end, the most suitable materials with the best performance for the operation of these cells were examined in detail, of which stainless steel, nickel and polymeric materials were suggested, resorting to specialized bibliographic sources on the subject. The integration of the three key aspects; design, configuration and materials, led to the preparation of a CAD design using the FUSION 360 software, which includes detailed drawings of the prototype. This design was based on recommendations from the literature, incorporating a selection of materials identified as optimal for the application in the Ansys Granta Edupack Software. Given the complexity and computational demand of this design process, it was decided to develop a smaller scale version of the prototype, in this way it was possible to design without complications..

## Introducción

Diversos materiales han emergido como candidatos prometedores para electrocatalizadores alternativos para ser utilizados en los electrodos que componen una celda para la electrólisis del agua. Los óxidos de metales de transición, carburos y nitruros, por ejemplo, han demostrado propiedades electrocatalíticas notables. Además, la nanotecnología ha permitido la exploración de nanoestructuras y nanocompuestos como nanohojas de grafeno, abriendo nuevas posibilidades para mejorar la actividad catalítica.

La evolución en la investigación de electrocatalizadores alternativos responde a la necesidad de impulsar la eficiencia y la sostenibilidad en la producción de hidrógeno, especialmente en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más limpias. Esta tendencia promete no solo mejorar la economía de estos procesos, sino también abrir nuevas oportunidades en la conversión eficiente de energía eléctrica en productos químicos valiosos.

Debido al continuo avance tecnológico e industrial y al incremento de la población en las últimas décadas, se ha experimentado un notable aumento en la demanda de energía. En la actualidad, aproximadamente el 80% de la energía a nivel mundial proviene de recursos como el carbón, el petróleo y el gas natural. Sin embargo, la quema de estos combustibles fósiles conlleva riesgos ambientales significativos, ya que libera gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que contribuyen al aumento de la temperatura global y a la ocurrencia de fenómenos climáticos anómalos (Hassam, et al. 2023)

Para abordar estos desafíos, se ha buscado la implementación de fuentes de energía renovable, como la energía eólica, solar, geotérmica e hidroeléctrica, debido a su naturaleza limpia y virtualmente inagotable. No obstante, estas energías son a menudo volátiles e impredecibles, además de depender de condiciones geográficas específicas. Por esta razón, el

hidrógeno se ha convertido en un área de investigación de gran interés en los últimos años. El hidrógeno se presenta como un vector energético que puede convertirse en electricidad y posee una alta capacidad calorífica. Según su origen, el hidrógeno se clasifica en tres categorías: gris, azul y verde. El hidrógeno gris se produce a partir de combustibles fósiles, el azul también se origina a partir de estos combustibles, pero con la captura y almacenamiento de carbono, mientras que el hidrógeno verde se considera una fuente de energía limpia, ya que se produce a partir de materias primas renovables como el agua y la biomasa. Además, el hidrógeno tiene ventajas en cuanto a su eficiencia de transporte y almacenamiento en comparación con otras fuentes de energía (Li, et al. 2020).

No obstante, hasta el momento, la producción de hidrógeno gaseoso ha estado mayoritariamente vinculada a combustibles fósiles. En la actualidad, dos sistemas se han estudiado ampliamente para la producción de hidrógeno gaseoso. Uno de ellos es el uso de biodigestores, que consisten en recipientes que contienen materia orgánica, como biomasa, y que, a través de procesos de descomposición, generan hidrógeno gaseoso para su posterior almacenamiento y uso. Sin embargo, este método depende del tipo de biomasa empleada y conlleva tiempos de espera considerables. El segundo método es la electrólisis, que implica una celda electroquímica que, mediante reacciones de oxidación y reducción en materiales metálicos, genera hidrógeno gaseoso en períodos más cortos y en mayor cantidad. La eficiencia y efectividad de la producción de hidrógeno gaseoso mediante electrólisis están relacionadas con dos factores principales. Uno de ellos es el material de los electrodos; en diversos estudios se ha demostrado que los metales nobles, como el platino, ofrecen un rendimiento superior debido a su alta actividad catalítica (Zhou, et al. 2023). No obstante, el alto costo del platino ha impulsado la investigación de electrodos recubiertos con níquel y sus aleaciones, que han demostrado tener alta actividad catalítica y bajo sobrepotencial inicial. Además, se ha evidenciado que el área

superficial del electrodo es un factor crítico en la producción de hidrógeno, ya que un aumento en el área conlleva una mayor producción a un valor de corriente o voltaje aplicado constante. Por lo tanto, se han utilizado espumas de níquel, mallas de acero inoxidable y otros materiales para aumentar el área efectiva del electrodo.

Otro factor importante en la electrólisis es el electrolito, que es el medio a través del cual se desplazan los electrones y del cual se extrae el hidrógeno. Aunque el electrolito suele ser agua, se ha observado que su rendimiento mejora con el uso de medios básicos y la incorporación de ciertos catalizadores y compuestos orgánicos.

La distribución y el uso subsiguiente del hidrógeno gaseoso producido mediante estos procesos requieren una inversión económica significativa, ya que deben someterse a diversas etapas, como el almacenamiento y el transporte. Aunque existen varios métodos de almacenamiento, estos aún se ven limitados por condiciones específicas que dificultan su adopción generalizada, incluyendo la presurización, la licuefacción, la combinación química, la adsorción en hidruros metálicos y otros sistemas emergentes en investigación.

Un enfoque interesante que se está evaluando en la actualidad es la integración de sistemas de electrólisis con fuentes de energía renovable, con el objetivo de aprovechar toda la energía generada y minimizar las pérdidas energéticas, que son una desventaja común en la implementación de energías renovables. En este enfoque, los sistemas de electrólisis no reemplazarían a las fuentes de energía renovable, sino que trabajarían en conjunto con ellas.

La energía generada por fuentes renovables, como la eólica, solar o geotérmica, se utilizaría para alimentar sistemas de electrólisis en paralelo con el sistema eléctrico convencional. Esto permitiría la producción de hidrógeno gaseoso, que podría utilizarse cuando las fuentes de energía renovable no estén disponibles o presenten limitaciones, como es el caso de la energía

solar, que solo está disponible durante el día. El hidrógeno producido de esta manera se podría utilizar directamente a través de pilas de combustible. (El-Shafie. 2023)

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Pregunta de investigación**

¿Es posible seleccionar y diseñar un prototipo de celda para la electrólisis alcalina del agua basada en el uso de electrocatalizadores alternativos?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Diseñar un prototipo de celda para la electrólisis alcalina del agua basada en el uso de electrocatalizadores alternativos.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Realizar un estudio comparativo de los diferentes modelos de celdas utilizadas para la electrólisis alcalina del agua.
2. Seleccionar, adaptar y modificar un diseño de celda de manera que se ajuste al uso de electrocatalizadores alternativos desarrollados en el GIBIM.
3. Realizar la selección de materiales, procesos de fabricación y evaluación de esfuerzos mecánicos en la celda diseñada en simulación computacional.

### 3. Justificación

La transición energética en Colombia gana impulso a medida que avanzan los años. Según el Centro Regional de Estudios de Energía (CREE), Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones en un 51% para 2030 en comparación con su línea base. Se prevé que la electricidad sea la fuente de energía más significativa en todos los escenarios hasta 2050 (CREE, 2022). Además, Colombia cuenta con una amplia variedad de fuentes de energía alternativa, como la biomasa, el biogás, la energía solar, la energía eólica, la energía hidroeléctrica y la energía eléctrica, que son las principales fuentes de energía.

En cuanto a su aplicación en el sector del transporte, los vehículos eléctricos se destacan como la principal opción en el mercado. Sin embargo, presentan limitaciones en cuanto al almacenamiento de energía, ya que dependen de baterías recargables. Estas baterías están condicionadas por las propiedades de los materiales de construcción, son costosas y tienen una vida útil limitada.

En este contexto, el hidrógeno emerge como una alternativa para el almacenamiento energético en lugar de las baterías. El hidrógeno puede ser utilizado para generar electricidad en una celda de hidrógeno, y su eficiencia puede mejorarse mediante la selección y configuración adecuada de materiales. Una de sus principales ventajas radica en su peso, ya que las celdas de hidrógeno son más livianas que las baterías convencionales y requieren menos materias primas escasas. Además, el hidrógeno es un vector energético que solo emite vapor de agua y no genera residuos en el aire. Los vehículos que utilizan hidrógeno pueden recargarse en un promedio de 3-5 minutos al 100% y no causan contaminación. Se estima un costo promedio de 34,500 a 43,200 pesos colombianos por cada 100 kilómetros recorridos. (Prades, 2006) (Muñoz y Beleño, s.f.).

No obstante, uno de los desafíos más significativos es reducir el costo de producción del hidrógeno. Actualmente, el costo está entre 2.50 y 6.80 dólares estadounidenses por kilogramo, pero se espera que disminuya en un 30% para 2030 y alcance alrededor de 0.80 dólares por kilogramo para 2050. Para lograr la electrólisis del agua es necesario que esta contenga sales de modo que pueda conducir la electricidad, luego dos electrodos sumergidos en el agua se conectan a una fuente de energía eléctrica y se aplica una corriente continua, la disociación del hidrógeno y el oxígeno se producen cuando los electrodos atraen para sí a los iones de carga opuesta; durante la electrólisis se produce una reacción oxidación-reducción por el efecto de la electricidad sobre el agua y los electrodos. (Castiblanco y Cárdenas, 2020) En este sentido, se presenta un gran reto en la reducción de costos de electrodos, con la búsqueda, análisis, selección e implementación de diversos materiales, se logrará obtener el menor costo y de esta manera también conseguir la mayor eficiencia en desempeño y tamaño posible en comparación a otros modelos similares.

En el Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología (GIBIM), se ha trabajado en los últimos años en el desarrollo de electrocatalizadores de aleaciones de níquel utilizando residuos electrónicos como materia prima, logrando eficiencias comparables a los electrodos comerciales. Con miras a una posible ampliación del sistema de producción de hidrógeno, es necesario diseñar una celda adaptada a los materiales y características fisicoquímicas de los electrocatalizadores desarrollados.

## 4. Marco Teórico

La electrólisis es un procedimiento en el que un electrolito convierte la energía eléctrica en energía química. Este proceso se lleva a cabo a través de un sistema compuesto por dos electrodos, uno con carga positiva encargado de la oxidación (ánodo), que libera electrones, y otro con carga negativa responsable de la reducción (cátodo), que captura los electrones procedentes del ánodo. Estos electrodos están sumergidos en un electrolito, que puede ser ácido, alcalino o neutro. La aplicación de una corriente eléctrica en este sistema permite el desplazamiento de electrones y la ocurrencia de reacciones de oxidación-reducción que culminan en la producción de oxígeno e hidrógeno gaseoso.

La reacción de generación de hidrógeno, conocida como Reacción de Evolución de Hidrógeno (HER, por sus siglas en inglés, Hydrogen Evolution Reaction), representa el proceso por el cual un átomo de hidrógeno adsorbido en una superficie actúa como intermediario en el proceso de electrólisis, dando lugar a la formación de moléculas de hidrógeno gaseoso. Este proceso comienza con el primer paso denominado Reacción de Volmer, en el cual los átomos de hidrógeno adsorbidos se generan a través de la reducción de las moléculas de agua mediante la transferencia de electrones (Dey, et al. 2019)



El segundo paso de la reacción consiste en la generación de hidrógeno gaseoso a través de las vías de Heyrovsky o Tafel, dependiendo de la tasa de cobertura de  $H_{ads}$ . Estas reacciones tienen lugar en medios básicos, ya que es el medio más estudiado.



La producción de hidrógeno a través del proceso de electrólisis tiene como objetivo aprovecharlo como una fuente de energía. Sin embargo, históricamente, el hidrógeno gaseoso ha sido principalmente empleado como una fuente de calor. En algunos países, por ejemplo, se ha utilizado la mezcla de hidrógeno gaseoso con gas natural para aplicaciones de calefacción y otros fines similares, no obstante, existe una aplicación más avanzada para el hidrógeno gaseoso, que es su utilización en la generación de electricidad a través de sistemas conocidos como pilas de combustible. Estas pilas de combustible operan siguiendo los mismos principios fundamentales de reacciones de reducción y oxidación química que permiten el flujo de electrones en el entorno donde se encuentran los electrodos. La diferencia radica en que, en el caso de las pilas de combustible, se alimentan con hidrógeno gaseoso y oxígeno. (Timmers. 2022) Este proceso da como resultado la liberación de electrones, que pueden ser aprovechados para abastecer una amplia variedad de dispositivos y sistemas, desde automóviles hasta residencias que puede ocurrir en las pilas de combustible, presentan un enfoque altamente eficiente y sostenible para la generación de electricidad, ya que su funcionamiento se basa en reacciones químicas limpias que no emiten gases contaminantes. Además, su capacidad de generar energía eléctrica de manera continua y silenciosa las hace atractivas para diversas aplicaciones, contribuyendo así al avance de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente y eficientes desde el punto de vista energético. (Arsad. 2023)

## **5. Metodología**

### **5.1 Fase 1: Estudio comparativo de los diseños de celdas existentes utilizados en la electrólisis alcalina del agua**

La primera fase del proyecto implicó una investigación exhaustiva en diversas fuentes bibliográficas que han abordado diseños similares o distintas configuraciones de celdas electrolíticas. El objetivo de esta etapa fue identificar las ventajas y desventajas de los diferentes componentes y su disposición, con el propósito de aprovechar las ventajas de cada diseño y combinar estas ideas para lograr una configuración de celda de diseño óptima y eficiente mediante un estudio comparativo.

### **5.2 Fase 2: Diseño de boceto CAD**

En la Fase 2, se planteó la creación de un diseño asistido por computadora (CAD) utilizando el software Fusion 360. El propósito de esta etapa fue prevenir cualquier complicación que pudiera surgir durante la futura construcción tridimensional del prototipo. No obstante, se realizó un diseño con medidas reducidas a la de un montaje real debido a la exigencia computacional del diseño de la celda electrolítica, en función al recurso computacional disponible.

### **5.3 Fase 3: Selección de materiales**

Siguiendo la configuración elegida en la Fase 1, se revisaron y consideraron los materiales empleados en diseños previos de la bibliografía y requerimientos de cada tipo de celda. El objetivo fue seleccionar los materiales que ofrecieran el mejor desempeño para cada componente y esté disponible para su obtención o compra. Para esta búsqueda se utilizó el software Ansys Granta Edupack, se realizaron los filtros de interés y se consultaron los procesos de fabricación, además de las consultas de investigaciones y desarrollos de la bibliografía.

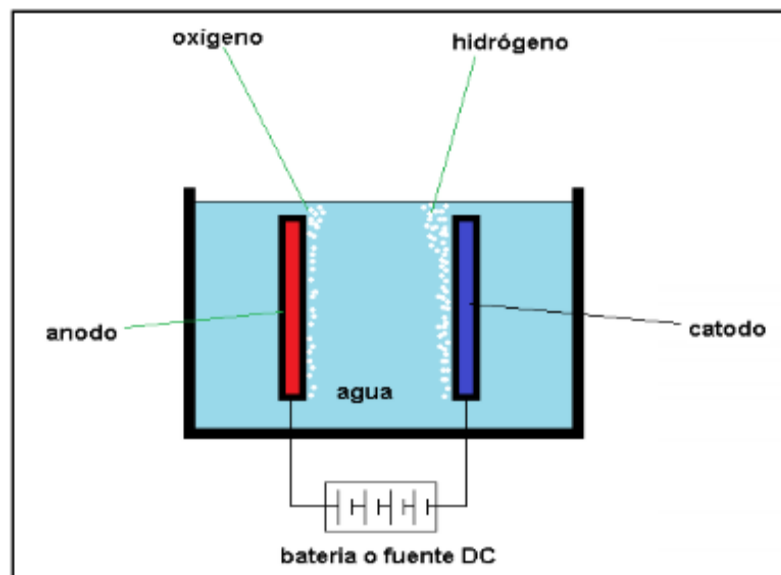
## 6. Resultados

### 6.1 Fase 1: Estudio comparativo de los diseños de celdas existentes utilizados en la electrólisis alcalina del agua

#### 6.1.1 Tipos de celdas para la electrólisis del agua

#### Figura 1

*Esquema básico de una celda electrolítica.*



Nota: Adaptado de Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrocatalizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada, por Soto, O. E., (2020). Tesis de grado. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería eléctrica.

En la Figura 1. Se ilustra el principio de funcionamiento de una celda electrolítica. Se compone por dos electrodos dispuestos de manera separada y en medio de ellos se sitúa una membrana o diafragma que actúa como separador de gases. Todo este conjunto se encuentra inmerso en un electrolito líquido, que comúnmente consiste en una solución acuosa altamente

concentrada de agua destilada con hidróxido de potasio (KOH). Esta solución suele tener una concentración del orden del 25-30% en peso de KOH, lo cual se realiza con el fin de aumentar la conductividad iónica del electrolito. (Ursua, A. et al. 2012).

**6.1.1.1 Celda electrolítica alcalina (AEC).** Se produce hidrógeno gaseoso en la superficie del cátodo y los iones producidos son impulsados por el campo eléctrico hacia el ánodo:

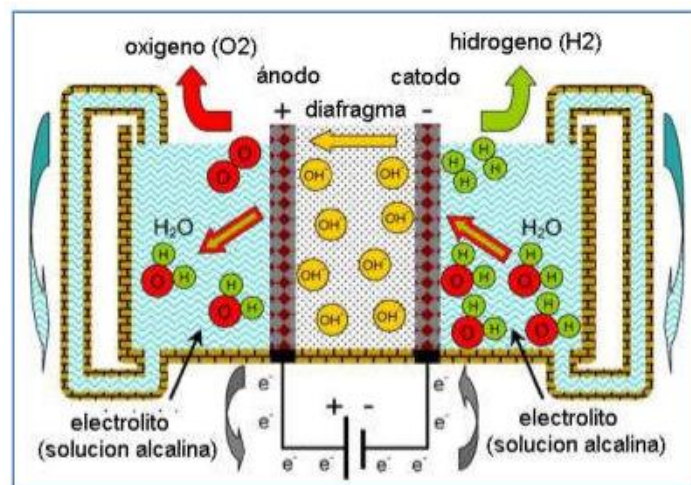


Por otro lado, en el ánodo, se combinan los iones producidos en el cátodo para producir oxígeno y así, liberar electrones hacia el circuito eléctrico: (Ursua, A. et al. (2012)



**Figura 2**

*Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica alcalina AEC*



Nota: Adaptado de Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends, por Ursua, A. et al. (2012). Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 100 (2), 410-426. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2156750>

En la Figura 2. Se representa el esquema de una celda electrolítica alcalina (AEC), es una tecnología más sólida y con buenos antecedentes en investigación y desarrollo. Se compone de dos electrodos (cátodo y ánodo), una membrana de intercambio aniónico entre los electrodos y un circuito eléctrico (contactos eléctricos) que conectan entre sí los electrodos. Como ventajas principales; el uso elementos químicos no nobles como catalizadores en el ánodo y cátodo, esto se traduce en la reducción de costos de construcción de la celda. Se establece de manera general que la vida útil de la celda está alrededor de 90.000 horas aproximadamente. (Carmo, M., et al. 2013).

#### Ventajas:

- Temperatura de operación (60-80 °C)
- Tecnología más desarrollada actualmente.
- Bajo costo.
- Construcción sencilla.

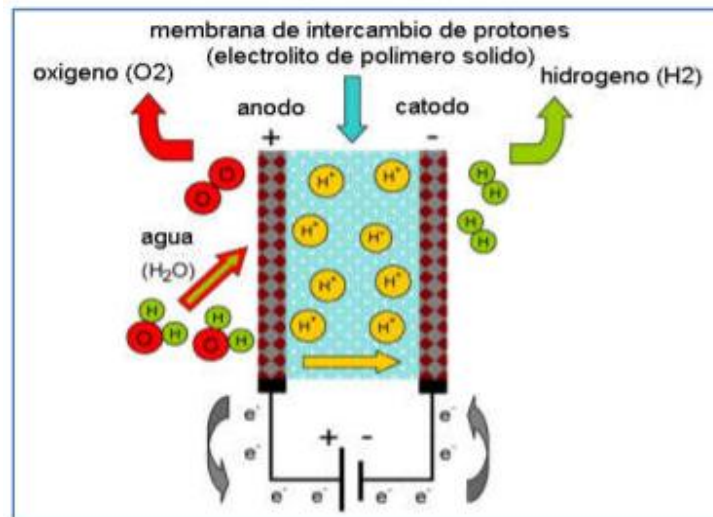
#### Desventajas:

- Baja presión de operación a causa de usar un electrolito líquido, por tanto, se hace voluminoso para construir en serie, lo que sería un arreglo tipo pila.
- Bajas densidades de corriente debido a altas pérdidas óhmicas.
- La membrana no impide completamente el cruce de gases producidos, por esto, el hidrógeno puede alcanzar una pureza de aproximadamente 99.0%

### 6.1.1.2 Celda electrolítica tipo (PEM).

**Figura 3**

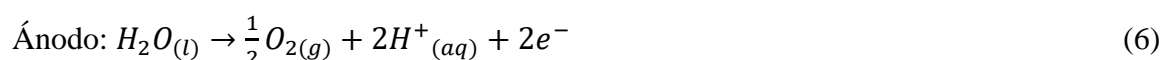
*Esquema de funcionamiento de una celda tipo PEM*



Nota: Adaptado de Hydrogen production with alkaline electrolyzers: Electrochemical modelling, electric power supplies and integration with renewable energies por Ursua, A. et al. (2010). Universidad de Navarra, Pamplona, Spain.

En la Figura 3. Se representa el esquema de funcionamiento de una celda electrolítica tipo PEM, este tipo de celdas el electrolito líquido es reemplazado por una membrana polimérica delgada. Este tipo de membrana microporosa tiene como objetivo impedir la mezcla de los gases producidos en cada lado de la celda; en el ánodo y en el cátodo, también impide la conducción electrónica. Se compone de grupos funcionales del ácido sulfónico ( $-SO_3H$ ) los cuales permiten la conducción del protón ( $H^+$ ) a través de esta. Según la literatura, la membrana más utilizada para este tipo de celdas PEM en la electrólisis del agua es Nafión. (Rifkin, J. 2003)

Las ecuaciones que describen el funcionamiento de la celda son:





El principio que ocurre es la ruptura de la molécula de agua y como resultado oxígeno. Se liberan los electrones al circuito eléctrico exterior y también se liberan protones de hidrógeno. Los protones atraviesan la membrana en sentido hacia el cátodo, donde se combinan con los electrones del circuito eléctrico y de este modo forman hidrógeno según la ecuación (7). (Rifkin, J. 2003)

Las ventajas más destacables de este tipo de celda son: (Carmo, M., et al. 2013).

- Debido al delgado espesor de la membrana se alcanzan altas densidades de corriente y es capaz de proveer buena conductividad de protones del orden de 0.1 S/cm (Siemens por cada centímetro).
- Diseño compacto gracias al uso de un electrolito sólido.
- Debido a que la membrana funciona como barrera a que se dé la mezcla de gases producidos, la pureza alcanzada de los gases es del 99,999%.
- Las celdas tipo PEM son de menor tamaño a otros tipos de celdas debido a la alta densidad de corriente que alcanza, mayor a  $1 A/cm^2$ .

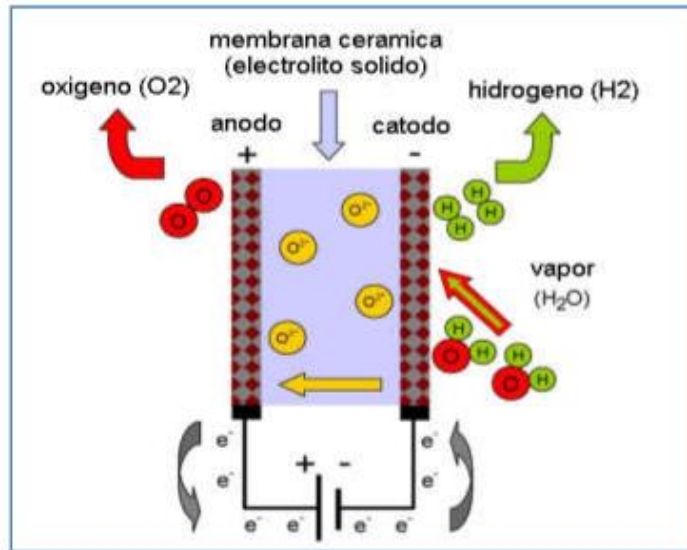
En el caso de las desventajas: (Salzano, F. et al. 1985).

- Alto costo de los componentes. La membrana utilizada comúnmente (Nafión) se produce actualmente en Estados Unidos y generalmente los electrodos son recubiertos por elementos químicos nobles; platino e iridio.
- En caso de construir la celda de manera no especializada, el ensamblaje podría presentar; ajuste de piezas con excesiva fuerza, electrodos con bordes filosos en contacto con la membrana, entre otros) causarían una baja durabilidad de los materiales de la celda, lo que se traduce en aumentar costos no programados.

### 6.1.1.3 Celda de Óxido Sólido (SOFC).

**Figura 4**

*Esquema de funcionamiento de una celda SOFC (Óxido Sólido)*



Nota: Adaptado de Hydrogen production with alkaline electrolyzers: Electrochemical modelling, electric power supplies and integration with renewable energies por Ursua, A. et al. (2010). Universidad de Navarra, Pamplona, Spain.

En la Figura 4. se representa el funcionamiento de una celda de Óxido Sólido (SOFC), permite la electrólisis del vapor de agua a temperaturas que oscilan entre 650 °C – 1000 °C, en consecuencia, se obtiene una mayor eficiencia en comparación a las celdas electrolíticas alcalinas y las celdas tipo PEM, sin embargo, es materia de estudio en laboratorios actualmente.

(Hočevaret, S. al. 2008)

En el cátodo el agua se reduce para producir hidrógeno, según la ecuación (8):



Debido al campo eléctrico aplicado, los aniones de óxidos generados en el cátodo pasan a través del electrolito sólido al ánodo, donde se combinan como lo describe la ecuación (9), de

este modo, forman oxígeno y liberando electrones hacia el circuito exterior. (Hočevaret, S. al. 2008)

En el ánodo ocurre la siguiente ecuación:



De las ventajas más destacables, se consideran: (Hočevaret, S. al. 2008)

- Operación a altas presiones y bajo voltaje.
- No requiere uso de elementos químicos nobles, de lo contrario su costo de construcción se elevaría.
- La eficiencia del proceso es del 100 %.

Desventajas:

- Muy alto costo.
- Uso de fuentes de energía adicionales para alcanzar las altas temperaturas de operación; solar, geotérmica, nuclear, entre otras. (Carmo, M. et al 2013)

**6.1.1.4 Estudio comparativo 1.** Se realiza matriz de comparación donde se cuantificaron las ventajas y desventajas principales de los tres tipos de celdas. (Ver Tabla 1). La cuantificación se realizó en una escala de 1-5 puntos donde (1) es poco favorable y (5) muy favorable. Se realiza un “Peso, %” que representa el valor cualitativo de cada factor. Para obtener una calificación general de todos los factores, se realizó una operación de multiplicación entre el “Peso (%)” (en porcentaje) y los puntos obtenidos en cada factor para cada tipo de celda.

La calificación tiene un rango de 0.0-5.0, donde 0.0 representa una calificación general poco favorable y 5.0 representa una calificación muy favorable. Se concluye que la celda electrolítica alcalina (AEC), en función de los factores más representativos para este estudio,

representa el mejor tipo de celda para diseñar y producir, por tanto se elige la celda electrolítica (AEC) por su bajo costo, capacidad de producción, manufactura y operatividad.

**Tabla 1**

*Matriz de comparación de tipos de celda electrolíticas*

		<b>Celda electrolítica alcalina (AEC)</b>		<b>Celda electrolítica tipo PEM</b>		<b>Celda de Óxido Sólido (SOFC)</b>	
<b>Factores</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>
<b>Costo inicial</b>	20	<b>5</b>	1.0	<b>3</b>	0.6	<b>3</b>	0.6
<b>Eficiencia</b>	20	<b>3</b>	0.6	<b>4</b>	0.8	<b>5</b>	1.0
<b>Capacidad de producción</b>	30	<b>4</b>	1.2	<b>3</b>	0.9	<b>2</b>	0.6
<b>Operatividad</b>	15	<b>4</b>	0.6	<b>3</b>	0.45	<b>3</b>	0.45
<b>Manufactura</b>	15	<b>5</b>	0.75	<b>3</b>	0.45	<b>3</b>	0.45
<b>Total</b>	100		<b>4.15</b>		<b>3.2</b>		<b>3.1</b>

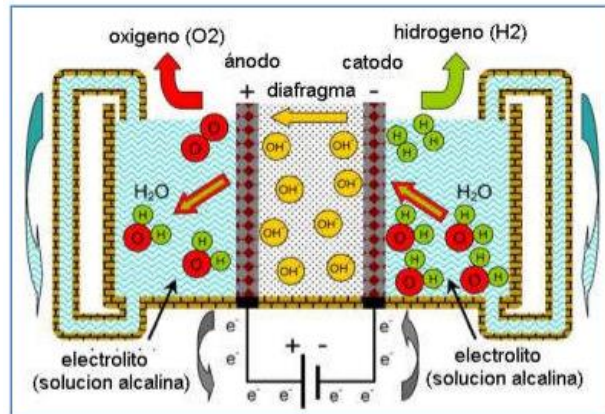
Nota. Esta tabla muestra la matriz de comparación de los tres tipos de celdas en cinco factores principales.

## 6.1.2 Configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas (AEC)

### 6.1.2.1 Configuración tradicional (AEC).

**Figura 5**

*Configuración tradicional (AEC)*



Nota: Adaptado de Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends, por Ursua, A. et al. (2012). Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 100 (2), 410-426. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2156750>

Se compone de dos electrodos (cátodo y ánodo), una membrana de intercambio aniónico entre los electrodos y un circuito eléctrico (contactos eléctricos) que conectan entre sí los electrodos.

Ventajas:

- Configuración simple y ampliamente utilizada.
- Flexibilidad en el diseño y optimización.
- Facilidad de mantenimiento.
- Mayor versatilidad.

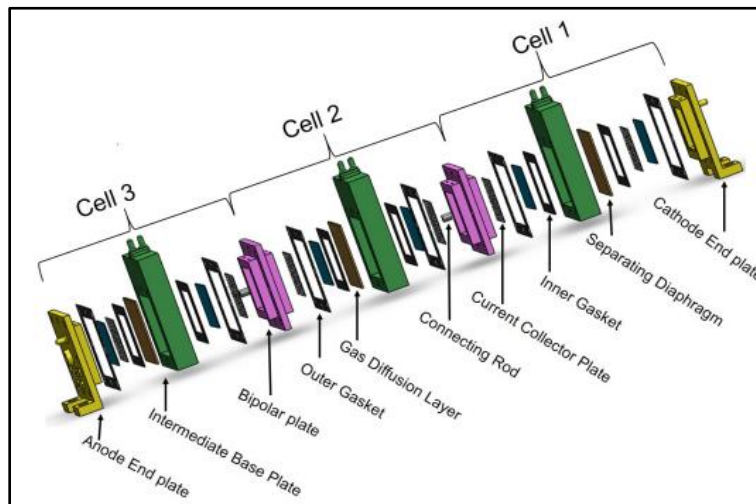
Desventajas:

- Mayor resistencia eléctrica.
- Posible pérdida de voltaje.

### 6.1.2.2 Configuración bipolar.

**Figura 6**

*Configuración bipolar (AEC)*



Nota: Adaptado de Design of an Alkaline Electrolysis Stack. University of Agder por De Silva, Y. S. (2017).

Las celdas bipolares tienen el mismo grupo de componentes que la celda electrolítica alcalina (AEC) a diferencia de que las celdas bipolares se agrupan en varias celdas, formando un “stack de celdas”. Su utilidad consiste en que un lado de la placa actúe como placa anódica y justo el otro lado de la placa sirve como placa catódica para la siguiente celda, de modo que permita la agrupación de varias celdas en forma de “stack”. (Li, X., Sabir, I. 2005) (Kahraman, H., Orhan, M. F. 2017)

Ventajas:

- Menor resistencia eléctrica.
- Menor pérdida de voltaje.
- Simplificación del diseño.

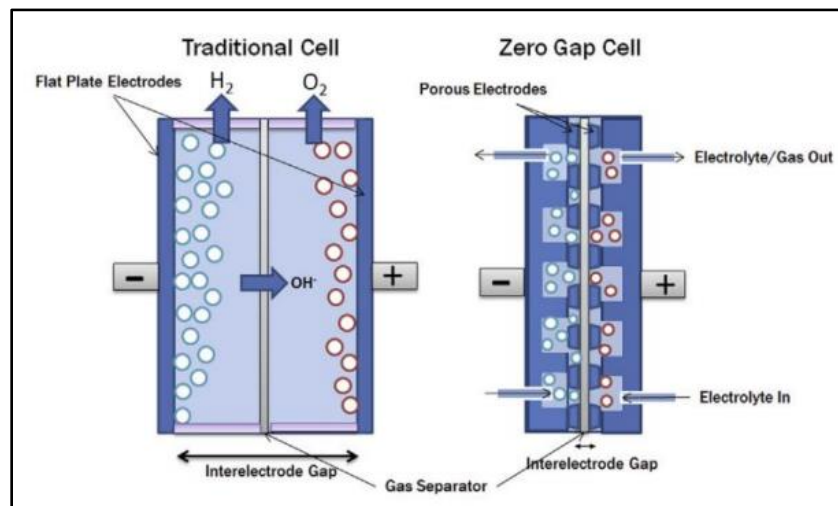
Desventajas:

- Menor flexibilidad de diseño y componentes.
- Limitaciones de materiales.
- Necesidad de optimización.

### 6.1.2.3 Configuración Zero Gap.

**Figura 7**

*Configuración Zero Gap*

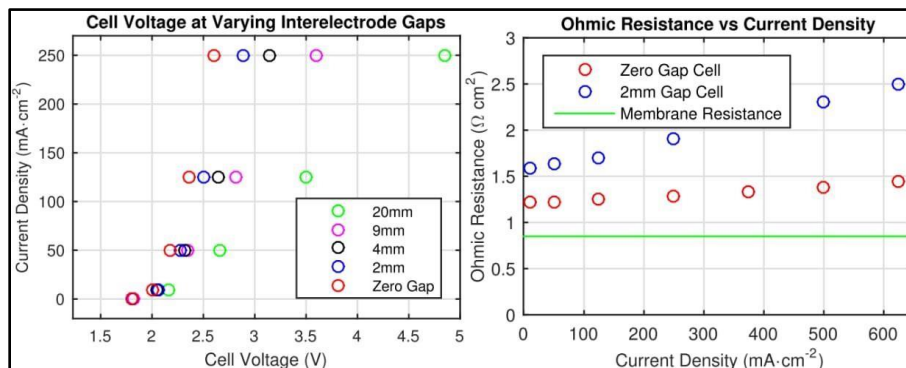


Nota: Minimising the ohmic resistance of an alkaline electrolysis cell through effective cell design por Phillips, R., Edwards, A., Rome, B., Jones, D. R., & Dunnill, C. W. (2017). International Journal of Hydrogen Energy, 42 (38), 23986–23994. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.184>

En la Figura 7. Se describe la configuración de celda tradicional AEC vs la configuración “Zero Gap” la cual establece que la reducción del espaciamento entre electrodos reduce significativamente la pérdida de voltaje y densidad de corriente. (Strauss, M. F. 2021)

**Figura 8**

*Cell voltage at varying interelectrode gaps and Ohmic resistance vs current density*



Nota: Adaptado de Minimising the ohmic resistance of an alkaline electrolysis cell through effective cell design. Phillips, R., Edwards, A., Rome, B., Jones, D. R., & Dunnill, C. W. (2017).. International Journal of Hydrogen Energy, 42(38), 23986–23994. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.184>

En la Figura 8. La gráfica “Ohmic Resistance vs Current Density” presenta la resistencia óhmica con respecto a la densidad de corriente donde se mantiene constante la resistencia óhmica de la membrana utilizada y se comparan dos configuraciones de electrodos; *Zero Gap Cell* y *2 mm Gap Cell*. La configuración *Zero Gap* es la configuración con menor resistencia óhmica, esto conlleva a obtener una mayor densidad de corriente con una menor pérdida de voltaje.

Por otro lado, se comparan las dos configuraciones con mejor desempeño en la gráfica “Cell Voltage at Varying Interelectrode Gaps”, siendo objeto de comparación; *Zero Gap*, *2 mm*, *4 mm*, *9 mm* y *20 mm*. Se observa que a diferencia de las demás configuraciones, la configuración *Zero Gap* requiere un menor voltaje a una densidad de corriente alta, esto se relaciona directamente con los costos energéticos requeridos, a mayor voltaje, mayor costo energético y por tanto económico.

Ventajas:

- Reduce aún más la resistencia eléctrica.

- Reduce la pérdida de voltaje.
- Aumenta la eficiencia.

Desventajas:

- Requiere diseño cuidadoso y preciso.
- Fabricación compleja.
- Mantenimiento complejo.

#### **6.1.2.4 Estudio comparativo 2.** (Configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas AEC).

Se realiza una segunda matriz de comparación donde se cuantificaron las ventajas y desventajas principales de las tres distintas configuraciones de celdas; configuración tradicional, configuración bipolar y configuración Zero Gap. (Ver Tabla 2). La cuantificación se realizó en una escala de 1-5 puntos donde (1) es un atributo poco favorable y (5) representa un atributo muy favorable. Se realiza un “Peso, %” que representa el valor cualitativo de cada factor. Para obtener una calificación general de todos los factores, se realizó una operación de multiplicación entre el “Peso (%)” (en porcentaje) y los puntos obtenidos en cada factor para cada tipo de celda.

La calificación tiene un rango de 0.0-5.0, donde 0.0 representa una calificación general poco favorable y 5.0 representa una calificación muy favorable. Al finalizar el estudio comparativo se corrobora que la configuración tradicional de la celda electrolítica (AEC), en comparación con las otras configuraciones, esta es quien reúne más puntos en función de los factores más representativos para este estudio.

Por tanto, dentro de la matriz de comparación se elige como mejor concursante la configuración de celda electrolítica alcalina tradicional, principalmente por sus costos; inicial, de fabricación y mantenimiento, además la relación que existe entre costo-beneficio por su

capacidad de producción. Esta configuración ofrece una manufactura excelente por la facilidad de construcción de la celda, lo cual permite optimizarla fácilmente y realizar mantenimientos periódicos sin afectar el ensamblaje ni la calidad de los componentes como los electrodos o la membrana.

**Tabla 2**

*Matriz de comparación (configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas AEC)*

		<b>Configuración tradicional</b>		<b>Configuración bipolar</b>		<b>Configuración Zero Gap</b>	
<b>Factores</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Concepto</b>	<b>Puntuación</b>
<b>Costo inicial</b>	20	<b>5</b>	1.0	<b>3</b>	0.6	<b>4</b>	0.8
<b>Eficiencia</b>	20	<b>3</b>	0.6	<b>4</b>	0.8	<b>5</b>	1.0
<b>Capacidad de producción</b>	30	<b>4</b>	1.2	<b>4</b>	1.2	<b>4</b>	1.2
<b>Operatividad</b>	15	<b>4</b>	0.6	<b>4</b>	0.6	<b>4</b>	0.6
<b>Manufactura</b>	15	<b>5</b>	0.75	<b>3</b>	0.45	<b>2</b>	0.3
<b>Total</b>	100		<b>4.15</b>		<b>3.65</b>		<b>3.9</b>

Nota. Esta tabla muestra la matriz de comparación de las tres configuraciones de celdas electrolíticas alcalinas (AEC) en cinco factores principales; los mismos factores utilizados en el Estudio de comparativo 1.

## 6.2 Fase 2: Diseño de boceto CAD

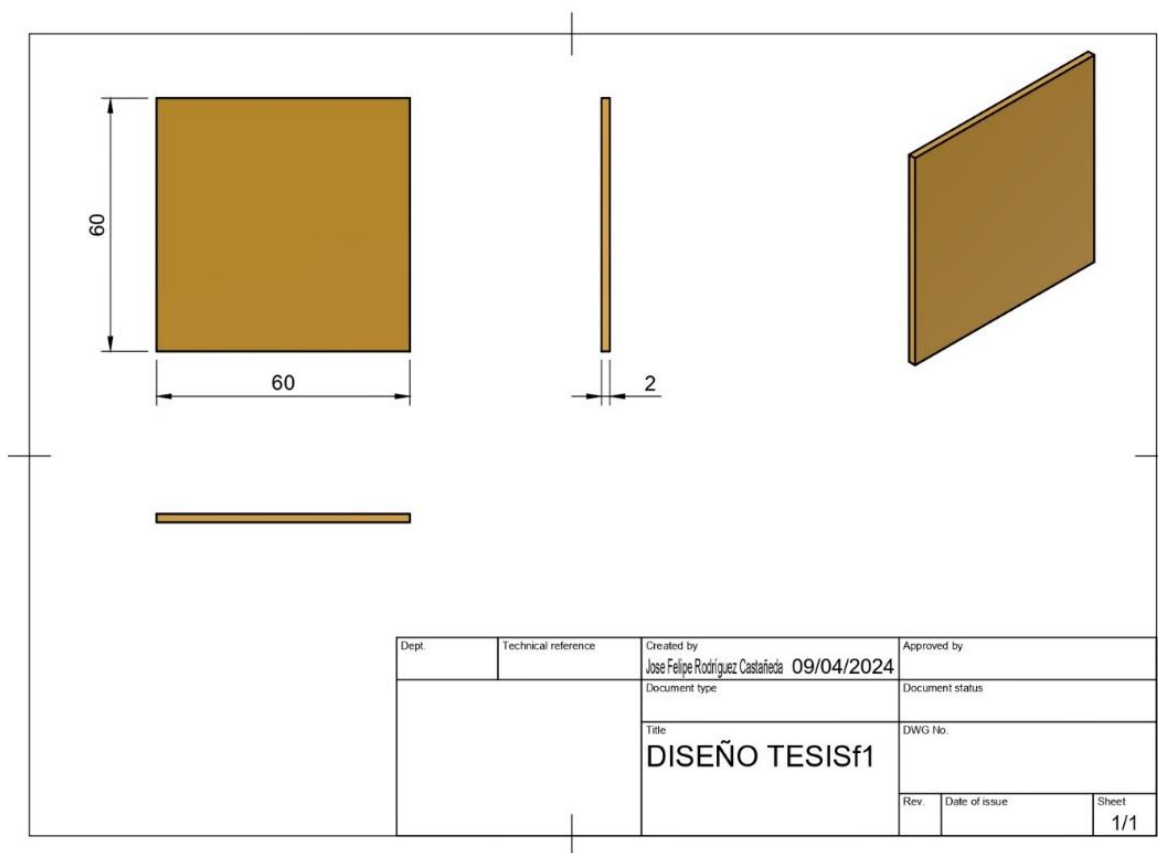
En esta sección se presentan los planos de cada componente de la celda elegida y diseñada. Todas las medidas presentadas en cada uno de los planos están representadas en milímetros (mm).

### 6.2.1 Electrodo

Debido a la configuración de la celda y la disposición de componentes elegida, se realiza un único plano para ambos electrodos, debido a que ambos electrodos son de idénticas dimensiones. Ver Figura 9.

**Figura 9**

*Plano del electrodo*

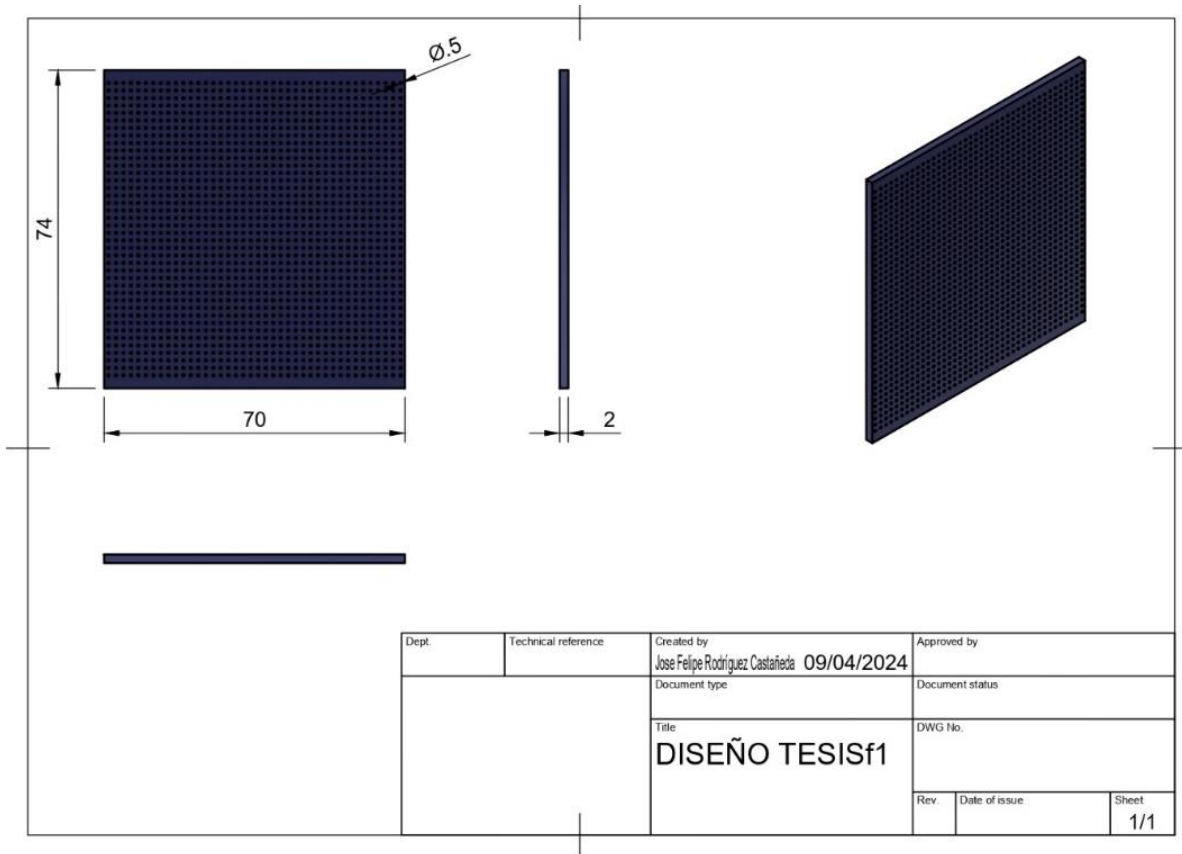


**6.2.2 Membrana**

En caso se utiliza la membrana de intercambio aniónico que se representa en la Figura 10.

**Figura 10**

*Membrana*

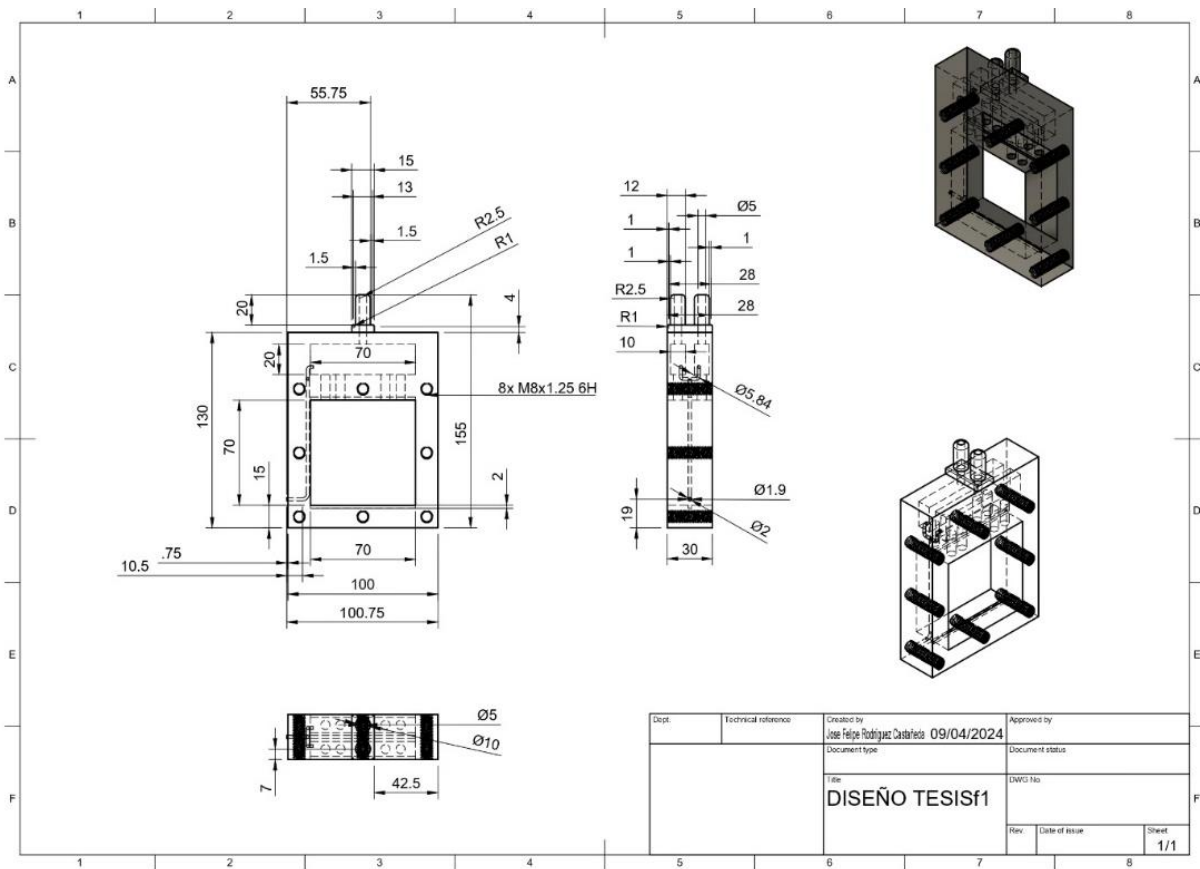


6.2.3 Carcasa base

En la Figura 11. se presenta el plano de la carcasa base con entrada de agua para el llenado de la celda y en la parte superior dos cámaras independientes (cada una para cada gas; hidrógeno y oxígeno) para la acumulación y evacuación de los gases producidos de la electrólisis.

Figura 11

Plano Carcasa Base

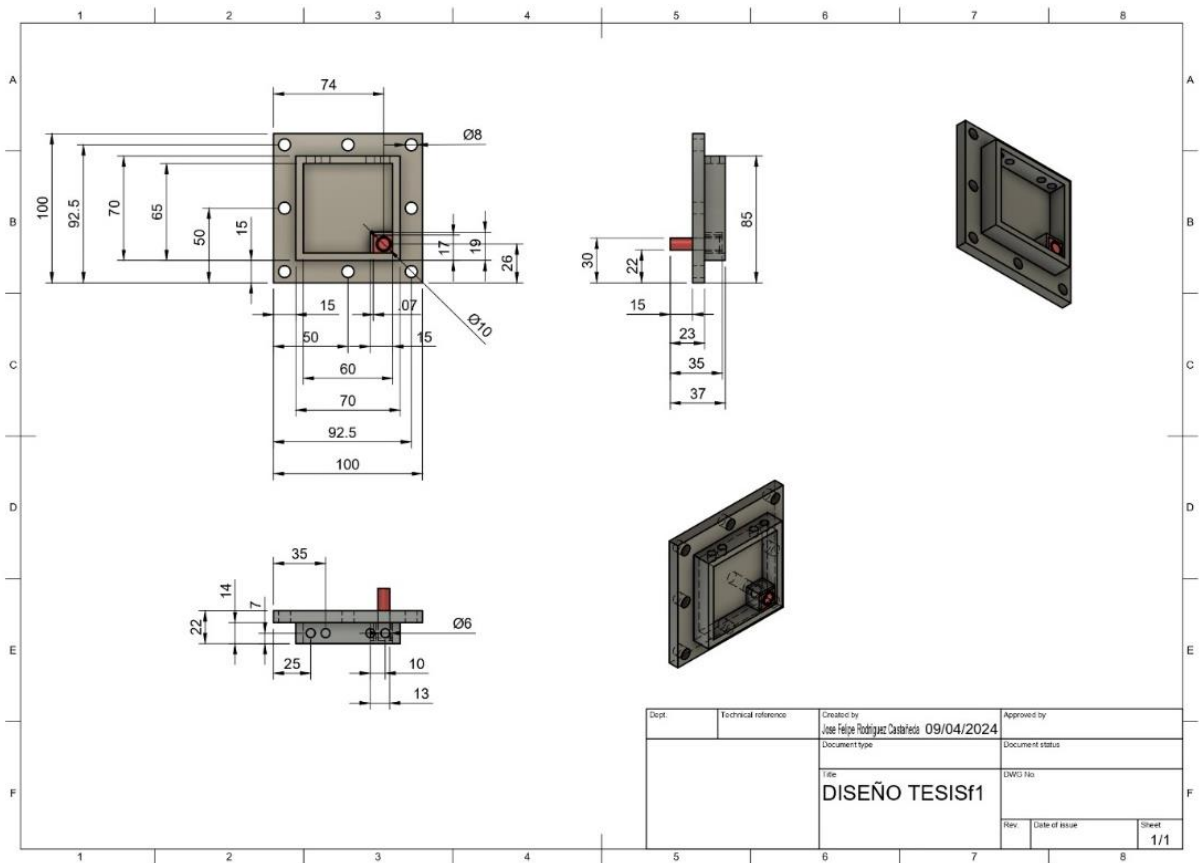


**6.2.4 Base portaelectrodo y contacto eléctrico**

En la Figura 12. se presenta el plano de la base portaelectrodo y contacto eléctrico, donde el sólido coloreado de rojo representa el contacto eléctrico en la posición correspondiente, el sólido coloreado en gris representa la base portaelectrodo. Se realiza un solo plano de base portaelectrodos debido a que se posicionan en espejo en el ensamblaje de la celda, es decir, se usa el mismo plano para la base portaelectrodo del ánodo y del cátodo. Asimismo, para los contactos eléctricos.

**Figura 12**

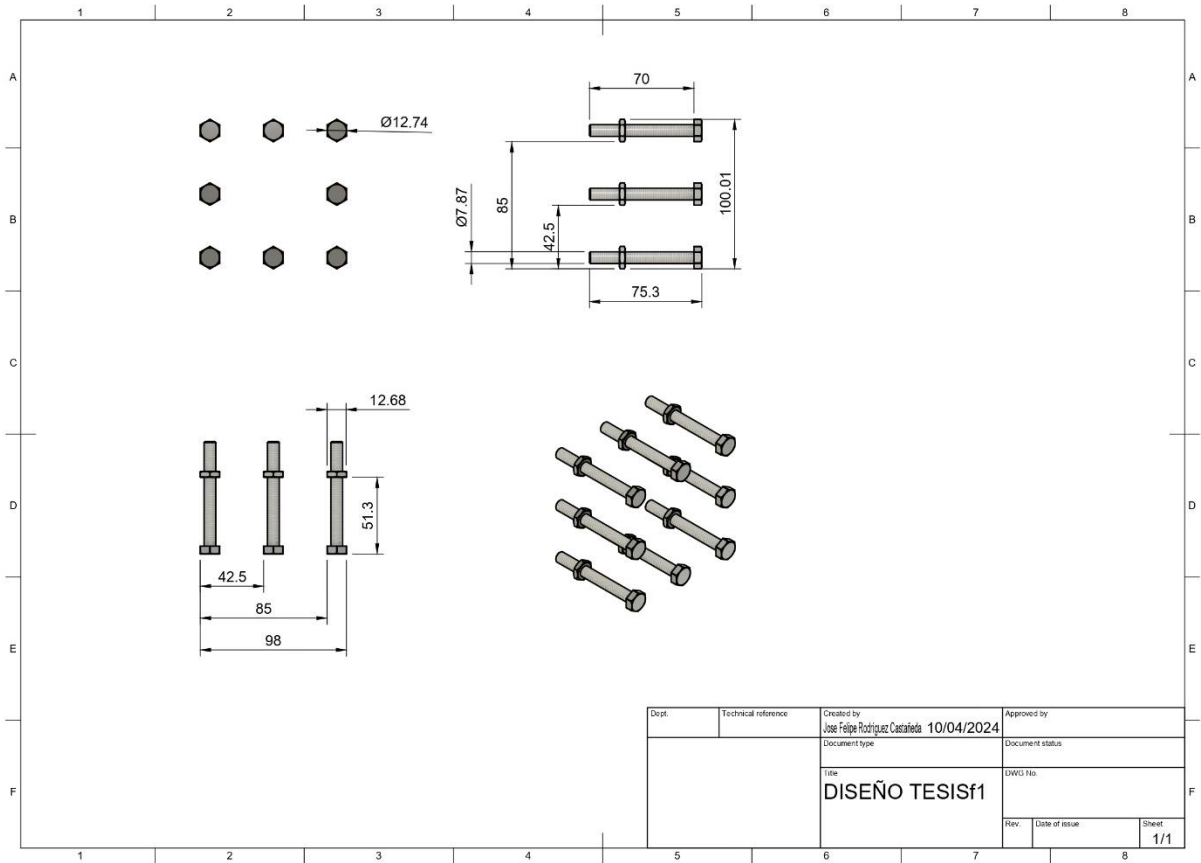
*Plano Base portaelectrodo y contacto eléctrico*



6.2.5 Tornillos y tuercas

Figura 13

Plano y posición de tornillos y tuercas

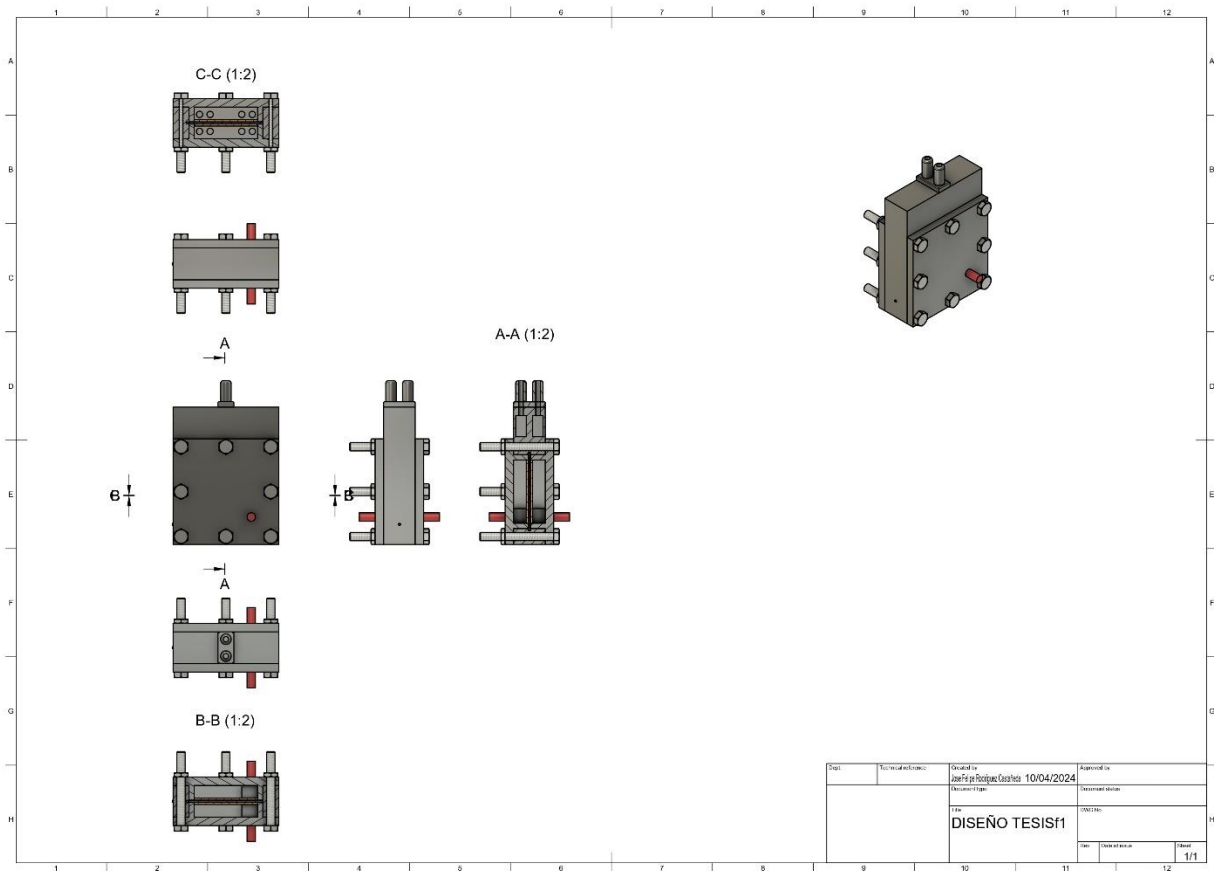


**6.2.6 Plano General**

En la Figura 14. Se presenta el esquema del plano general de la celda electrolítica alcalina AEC seleccionada y diseñada.

**Figura 14**

*Plano general de la celda ensamblada*



## 6.3 Fase 3: Selección de materiales y procesos de fabricación

### 6.3.1 Electrodo

Al momento de elegir un material para los electrodos en una celda electrolítica alcalina, se deben considerar 6 características fundamentales: (Wieckowski, A. 2009)

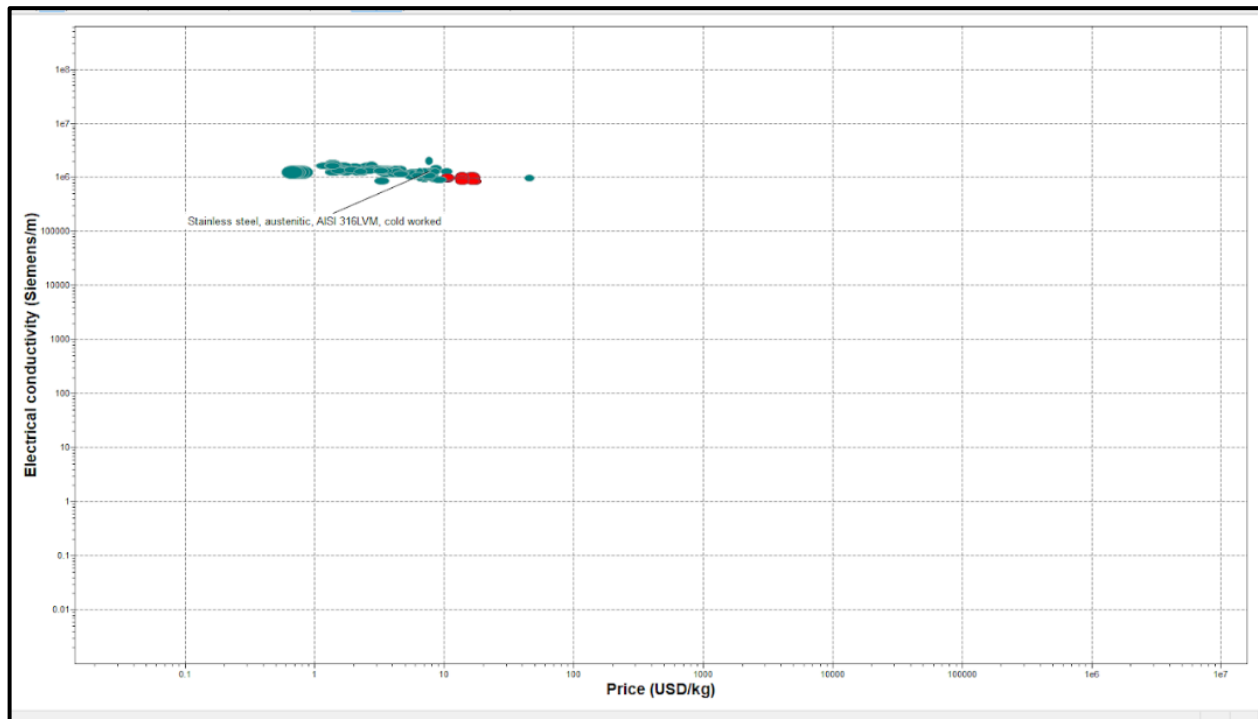
1. **Actividad catalítica:** Tener una alta actividad catalítica esto se traduce en que el material debe facilitar la reacción de oxidación en el ánodo y la reacción de reducción en el cátodo de manera eficiente y sin requerir energías de activación excesivamente altas.
2. **Estabilidad química y electroquímica:** Ser químicamente estable en las condiciones de operación de la celda AEC; resistente a la corrosión y a la degradación electroquímica durante la electrólisis del agua. La estabilidad del material es crucial para garantizar una larga vida útil y un funcionamiento confiable de la celda.
3. **Conductividad eléctrica:** Tener una alta conductividad eléctrica para facilitar el flujo de corriente eléctrica dentro de la celda y minimizar las pérdidas energéticas. Los metales y algunos materiales conductores de carbono son preferibles para este uso.
4. **Disponibilidad y costo:** Los materiales abundantes y económicos pueden ayudar a reducir costos de producción.
5. **Sostenibilidad ambiental:** Tener el menor impacto ambiental con respecto a su procesamiento y disposición al final de su vida útil. Los materiales con menor huella ambiental y de carácter reciclable o reutilizable son preferibles desde el punto de vista de la sostenibilidad.

En la selección del material para los electrodos se realizó una búsqueda en el software Ansys Granta Edupack considerando las sugerencias planteadas en la bibliografía. Se realizaron 3

filtros jerárquicos; conductividad eléctrica, huella de CO<sub>2</sub> y resistencia a la corrosión (PREN) y fueron comparados en función al precio.

**Figura 15**

*Conductividad eléctrica (Siemens/m) vs precio (USD/kg)*

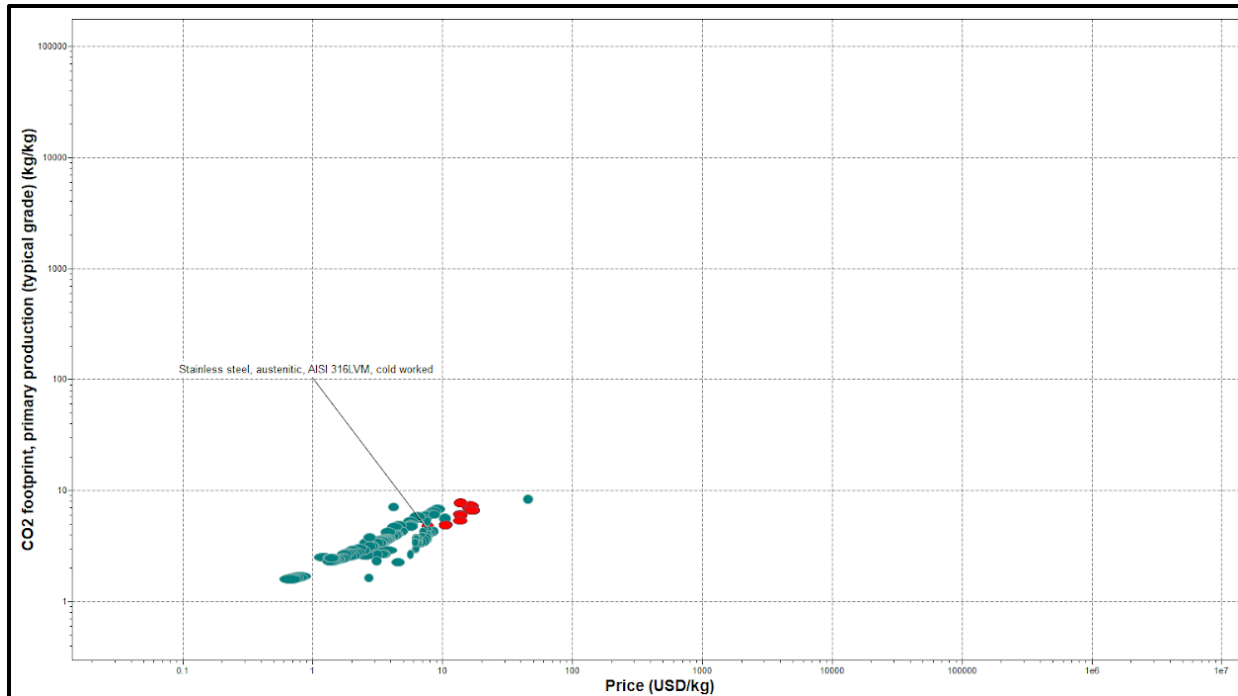


En el resultado del filtro “conductividad eléctrica vs precio” (ver Figura 15) se obtuvo un grupo de materiales que cumplían con la condición indicada, se ocultaron materiales que no fuesen metales para tener una mejor visualización en la gráfica. Dentro del resultado y siguiendo la literatura, el acero inoxidable-austenítico-AISI 316L cumple con los requerimientos del primer filtro y con el filtro base que es el precio con una estimación de costo de no más de 10 USD/kg. Además coincide como material seleccionado en la literatura.

En el segundo filtro se consulta “Huella CO<sub>2</sub>, producción primaria, grado típico” (Ver Figura 16).

**Figura 16**

*Huella de CO<sub>2</sub>, producción primaria, grado típico (kg/kg)*



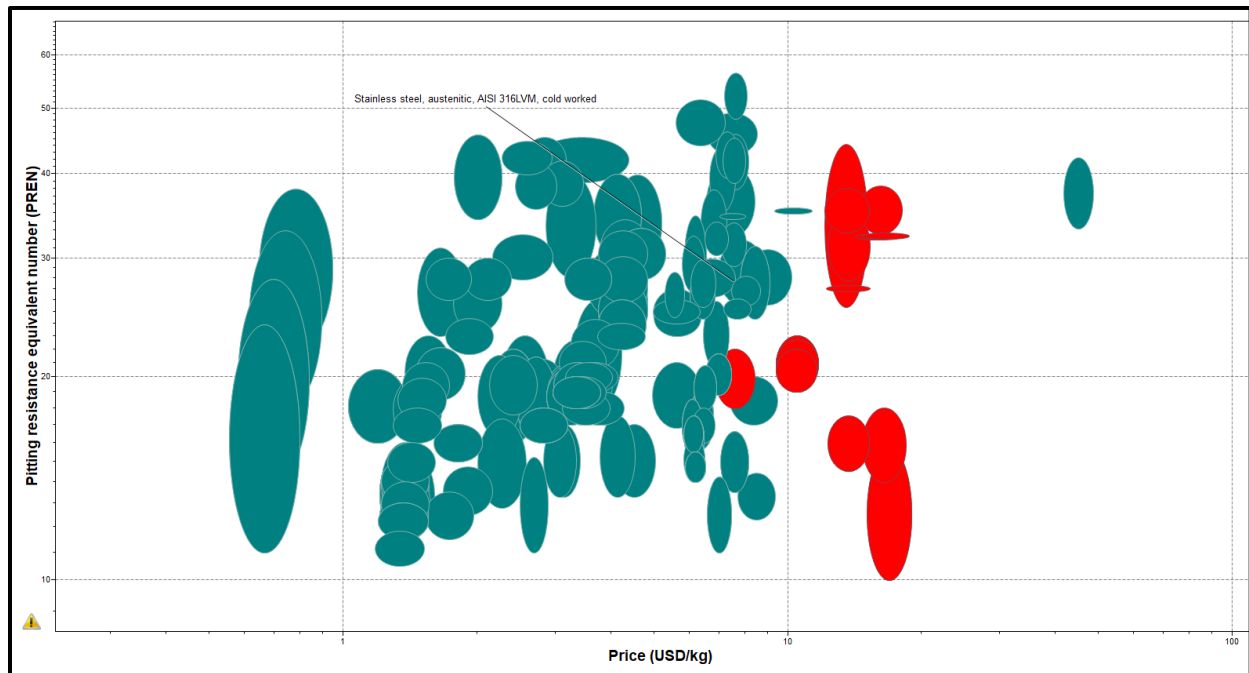
En esta segunda etapa de filtros se corrobora el cumplimiento del material con los dos filtros aplicados anteriormente y el filtro base (precio).

La última etapa tiene el tercer filtro aplicado “Resistencia a la corrosión (PREN)” (Ver Figura 17), el material presenta una buena posición en la gráfica de resultados reuniendo los cuatro filtros aplicados, propiedades y características de interés; con un rango de precio que oscila entre 7.47 – 8.65 USD/kg, temperatura máxima de servicio 750 – 952 °C y temperatura mínima de servicio -175 °C, conductividad eléctrica  $1.31 \times 10^6$  –  $1.36 \times 10^6$  (Siemens/m), pitting resistance equivalent number (PREN) 25.5 – 28.2. En la producción primaria de este material se requiere;  $0.112$  –  $0.337$  m<sup>3</sup>/kg de agua, requiere  $4.76 \times 10^7$  –  $5.58 \times 10^7$  J/kg de energía incorporada para su producción primaria en un grado habitual. Producir este material en grado primario habitual deja una huella de CO<sub>2</sub> de 3.85 – 4.56 (kg CO<sub>2</sub>/kg).

Existe gran variedad de procesos de fabricación para el acero inoxidable-austenítico-AISI 316L, no obstante, se presenta excelente comportamiento del material en: Metal cold forming, Metal hot forming, Metal press forming y Metal Deep drawing, por otro lado, el proceso Metal casting se califica como inadecuado para este material, presenta una velocidad de maquinado de 0.305 m/s y calificado como Good Weldability.

**Figura 17**

*Resistencia a la corrosión (PREN) vs precio (USD/kg)*



Investigaciones anteriores sugieren que los electrodos sean construidos de acero inoxidable, sin embargo se recomienda realizar un recubrimiento en Níquel. El proceso de recubrimiento puede darse por electrodeposición. las principales razones son: (Jones, D. J.)

1. Actúa como catalizador en las reacciones que tienen lugar en los electrodos, facilita la reacción de oxidación del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo.
2. El Níquel tiene una conductividad eléctrica relativamente alta, por esto, aumenta la conductividad eléctrica, mejorando la transferencia de electrones en los electrodos.

3. Es resistente a la corrosión, contribuye al aumento de la vida útil de los electrodos.
4. Es compatible con la membrana de intercambio de protones.

Los procesos de fabricación para los electrodos son:

- Primario: Fundido, laminado y corte.
- Secundario: Mecanizado por fresado, temple y revenido.
- Acabado: Pulido, limpieza y revestimiento con níquel.

### **6.3.2 Membrana**

Actualmente las membranas de Nafion son las más utilizadas por su alta eficiencia y excelente desempeño, por tanto se elige una membrana de Nafion. No obstante, los requerimientos que debe tener una membrana para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro del sistema son:

1. Permeabilidad selectiva: La membrana debe permitir el paso de los iones necesarios para la reacción electroquímica mientras bloquea la migración de otros componentes no deseados, como los gases producidos en la electrólisis.
2. Resistencia química: Debe ser resistente a los productos químicos presentes en el electrolito alcalino para evitar la degradación prematura.
3. Resistencia mecánica: Debe ser lo suficientemente resistente para soportar las condiciones de operación, incluyendo la presión del electrolito y cualquier manipulación durante el montaje y mantenimiento de la celda.
4. Estabilidad dimensional: La membrana debe mantener su integridad estructural y dimensiones a lo largo del tiempo para evitar fugas y garantizar un rendimiento consistente de la celda.

5. Baja resistencia eléctrica: Aunque la membrana actúa como un separador físico entre los electrodos, debe tener una resistencia eléctrica lo más baja posible para permitir el flujo eficiente de corriente eléctrica a través de la celda.
6. Porosidad controlada: La estructura porosa debe ser cuidadosamente diseñada para permitir un flujo adecuado de electrolito sin comprometer su capacidad para retener los productos gaseosos generados durante la electrólisis.
7. Costo efectivo: Debe ser fabricado con materiales y procesos que minimicen los costos de producción sin comprometer su calidad y rendimiento.

Los procesos de fabricación para la membrana de Nafion son:

- Primario: Recubrimiento por centrifugación.
- Secundario: Tratamiento térmico y corte.
- Acabado: Limpieza.

### ***6.3.3 Carcasa base y portaelectrodos***

La estructura de la carcasa base es donde se ensambla toda la celda. Se recomienda utilizar materiales aislantes al igual que los portaelectrodos; sostienen los electrodos y que permiten la conexión entre colector de energía y electrodo se recomienda utilizar los mismos materiales de la carcasa base, materiales aislantes, así evitar corto circuito en el proceso. En relación costo-beneficio, propiedades y basado en el trabajo de Yakdehige, S. K. D. S. en 2017 y los resultados del comportamiento de los “Base Plate” (carcasa base) y “Cathode and Anode Plate” (portaelectrodos) fueron favorables durante la ejecución del proceso. Se elige PVC por:

1. Excelente resistencia química.
2. Buena resistencia a la intemperie.
3. Alta resistencia a la temperatura.

4. Buena resistencia mecánica.
5. Baja absorción de agua.
6. Excelente resistencia a la llama.
7. Buenas propiedades dieléctricas.

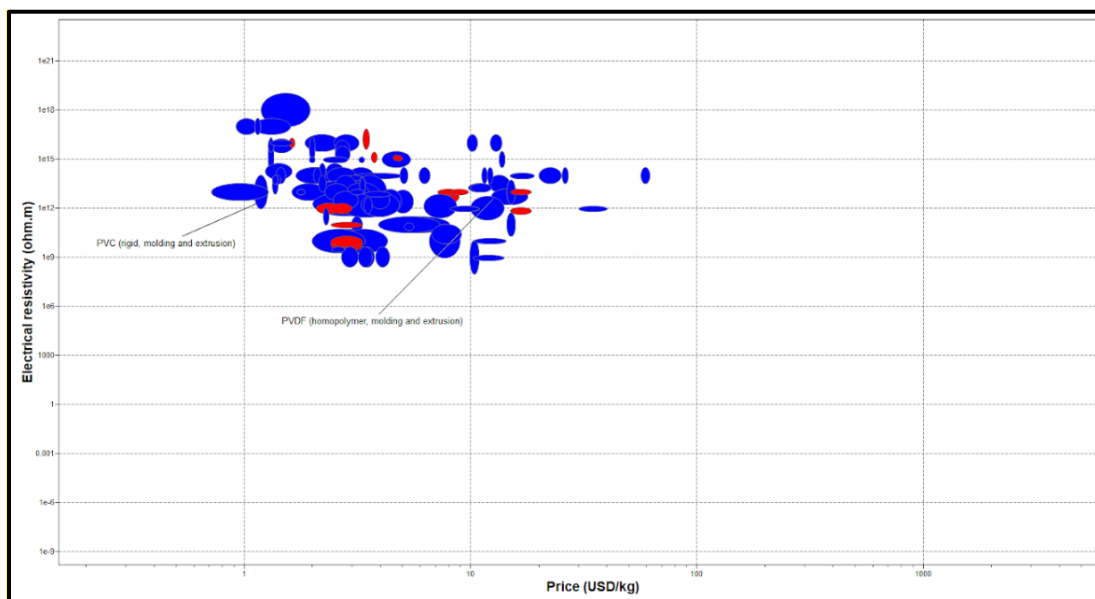
Se realizan tres filtros consecutivos; Resistividad eléctrica ( $ohm * m$ ), huella de CO<sub>2</sub>, reciclaje ( $\frac{kg}{kg}$ ) y transmisión de vapor de agua ( $\frac{kg*m}{m^2*s}$ ) y se comparan en relación con el precio (USD) como propósito de no superar 10 USD por kilogramo de material. Como resultado se obtiene que el material más adecuado es el PVC, coincidente con la bibliografía consultada. (Ver figuras 18, 19 y 20).

Los procesos de fabricación para la carcasa base y las bases portaelectrodos son:

- Primario: Extrusión.
- Secundario: Maquinado y perforado.
- Acabado: Limpieza y sellado

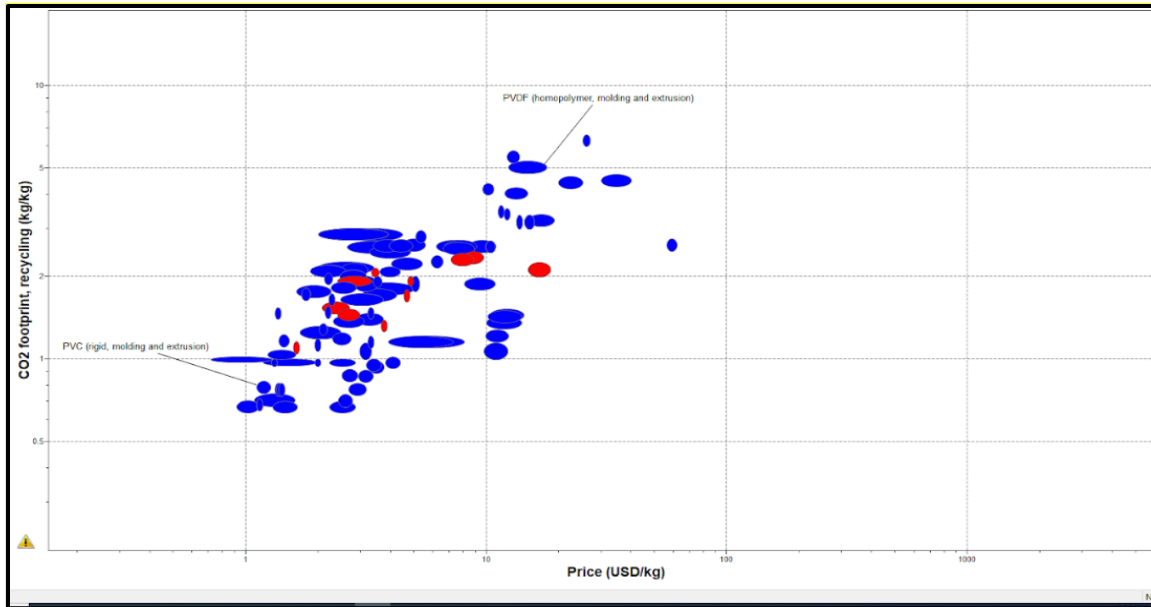
**Figura 18**

*Resistividad eléctrica vs precio*



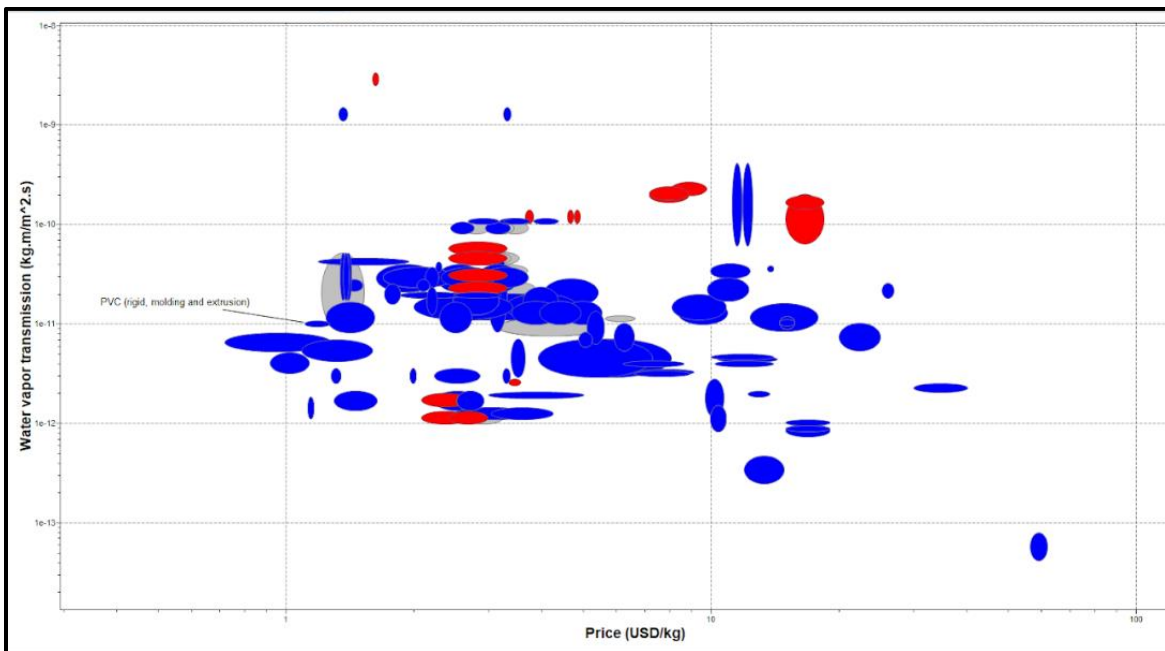
**Figura 19**

*Huella de CO2, reciclaje (kg/kg) vs precio (USD)*



**Figura 20**

*Transmisión de vapor de agua (kg.m/m^2.s) vs precio (USD)*



#### **6.3.4 Contacto eléctrico**

Se recomienda utilizar materiales con alta conductividad eléctrica para que la eficiencia energética no sea afectada. Ser resistentes a la corrosión en condiciones de operación de la celda. Ser térmicamente estables con la celda en funcionamiento sin que sufran deformaciones o pérdidas de conductividad eléctrica. Se prefieren materiales económicamente viables y disponibles. Se sugiere utilizar materiales con características similares, en este caso se recomienda dentro de la lista de materiales; acero inoxidable y cumpliendo con los requerimientos para este cumplir este rol en la celda, se elige el mismo material de los electrodos; acero inoxidable-austenítico-AISI 316L. (Reitz, W. 2007) (Balbuena, P., Cococcioni, M.)

Los procesos de fabricación para los contactos eléctricos son:

- Primario: Corte y forjado.
- Secundario: Mecanizado por fresado, temple y revenido.
- Acabado: Pulido (superficie lisa) y limpieza.

#### **6.3.5 Tornillos y tuercas**

Los requerimientos para los tornillos y tuercas no son menos importantes; se requiere de un material con alta resistencia a la corrosión y se sugiere acero inoxidable 316L o titanio; sin embargo, el costo del titanio saldría del objetivo del proyecto (no superar el costo de 10 USD por kilogramo de material a excepción de la membrana de Nafion). Debe tener buena resistencia mecánica para evitar deformaciones o roturas. Se determina que el material seleccionado para los electrodos y los contactos eléctricos también cumple con las exigencias mecánicas y de durabilidad para desempeñar este rol en la celda; Excelente resistencia a; Agua (dulce y salada), ácidos fuertes y débiles, “strong alkalis”, solventes orgánicos, excelente comportamiento en oxidación a 500 °C y no es inflamable. (Larminie, J., Dicks, A. 2003). (Ver Figuras 21 y 22.)

Los procesos de fabricación para los tornillos y tuercas son:

- Primario: Fundido, estirado en caliente y torneado.
- Secundario: Corte, temple y revenido.
- Acabado: Pulido.

**Figura 21**

*Propiedades mecánicas del acero inoxidable-austenítico-AISI 316L*

<b>Mechanical properties</b>			
Young's modulus	①	1.95e11 - 2.05e11	Pa
Specific stiffness	①	2.42e7 - 2.55e7	N.m/kg
Yield strength (elastic limit)	①	2.2e8 - 3e8	Pa
Tensile strength	①	5.25e8 - 6e8	Pa
Tensile strength with temperature	①	5.6e8 - 5.6e8	Pa
<small>Parámetros: Temperature = 23°C</small>			

**Figura 22**

*Durabilidad y resistencia a la corrosión del acero inoxidable-austenítico-AISI 316L*

<b>Durability</b>		
Water (fresh)	①	Excellent
Water (salt)	①	Excellent
Weak acids	①	Excellent
Strong acids	①	Excellent
Weak alkalis	①	Excellent
Strong alkalis	①	Excellent
Organic solvents	①	Excellent
Oxidation at 500C	①	Excellent
UV radiation (sunlight)	①	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	①	Acceptable
<small>Notes Aluminum bronze is the most suitable mating material to minimize galling.</small>		
Flammability	①	Non-flammable
<b>Corrosion resistance of metals</b>		
Pitting resistance equivalent number (PREN)	①	25.5 - 28.2
Pitting and crevice corrosion resistance	①	Medium (20-30)
Stress corrosion cracking	①	Not susceptible
<small>Notes Rated in chloride; May be susceptible in halide, ammonia, nitrogen, acidic, caustic, carbonate environments</small>		

## Conclusiones

- El diseño seleccionado (Celda electrolítica AEC) basado en un diseño de Yakdehige, S. K. D. S. en 2017 fue el diseño con mejores cualidades y características de la bibliografía.
- El conjunto de materiales considerados y seleccionados fueron los mejores candidatos en relación costo-beneficio.
- Se concluye que la celda electrolítica alcalina AEC en su configuración tradicional (diseño elegido) es el modelo más factible en cuanto a relación costo-beneficio, considerando su capacidad de producción, costos de fabricación y mantenimiento y su gran versatilidad para optimización de esta sin perder su eficiencia y rendimiento.

Después de completar el estudio de investigación, y tras haber abordado los objetivos planteados así como respondido a la pregunta de investigación, se concluye que mediante una minuciosa revisión bibliográfica, un análisis detallado de los datos relevantes y una actitud favorable efectivamente es posible y factible la selección y diseño de un prototipo de celda destinada a la electrólisis alcalina del agua, utilizando electrocatalizadores alternativos.

## Recomendaciones

Se sugiere la prosecución de este estudio con el propósito de examinar el desempeño de la celda ensamblada. Analizar el comportamiento de los materiales, componentes y ensamblaje utilizando software de ingeniería asistida por computadora (CAE, por sus siglas en inglés), que permiten simular el rendimiento de piezas, componentes y dispositivos basados en principios físicos. Este enfoque posibilita mejorar los diseños de producción futuros y/o solventar problemas relacionados con el diseño, rendimiento y compatibilidad.

## Referencias Bibliográficas

- Albornoz, M., Rivera, M., Wheeler, P., & Ramírez, R. (2023). High pulsed voltage alkaline electrolysis for water splitting. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(8), 3820.  
<https://doi.org/10.3390/s23083820>
- Angeles-Olvera, Z., Crespo-Yapur, A., Rodríguez, O., Cholula-Díaz, J., Martínez, L., & Videa, M. (2022). Nickel-based electrocatalysts for water electrolysis. *Energies*, 15(5), 1609.  
<https://doi.org/10.3390/en15051609>
- Arsad, S. R., Ker, P. J., Hannan, M. A., Tang, S. G. H., Norhasyima, Chau, C. F., & Mahlia, T. M. I. (2023). Patent landscape review of hydrogen production methods: Assessing technological updates and innovations. *International Journal of Hydrogen Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.085>
- Ayers, K. (2019). The potential of proton exchange membrane–based electrolysis technology. *Current Opinion in Electrochemistry*, 18, 9–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.08.008>
- Bakker, M. M., & Vermaas, D. A. (2019). Gas bubble removal in alkaline water electrolysis with utilization of pressure swings. *Electrochimica Acta*, 319, 148–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.06.049>
- Balbuena, P., Cococcioni, M. (s/f). *Materials for Current Collectors in Polymer Electrolyte Fuel Cells"*
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes (Basel, Switzerland)*, 8(2), 248. <https://doi.org/10.3390/pr8020248>

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>

Castiblanco, & Cárdenas, D. J. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299–311.

<https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>

Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., Braatz, R. D., Bazant, M. Z., Eikerling, M., Staffell, I., Balcombe, P., Shao-Horn, Y., & Schäfer, H. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51(11), 4583–4762.

<https://doi.org/10.1039/d0cs01079k>

Colli, A. N., Girault, H. H., & Battistel, A. (2019). Non-precious electrodes for practical alkaline water electrolysis. *Materials*, 12(8), 1336. <https://doi.org/10.3390/ma12081336>

David, M., Ocampo-Martínez, C., & Sánchez-Peña, R. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: A review. *Journal of Energy Storage*, 23, 392–403.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>

De Groot, M. T., & Vreman, A. W. (2021). Ohmic resistance in zero gap alkaline electrolysis with a Zirfon diaphragm. *Electrochimica Acta*, 369(137684), 137684.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137684>

Dey, R. S., Purkait, T., Kamboj, N., & Das, M. (2019). *Carbonaceous materials and future energy: Clean and renewable energy sources*. CRC Press.

El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20(101426), 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>

El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20(101426), 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>

*Energy Transition Colombia 2050*. (2022, noviembre 15). CREE. <https://creenergia.org/energy-transition-colombia-2050/>

Faqeeh, A. H., & Symes, M. D. (2023). A standard electrolyzer test cell design for evaluating catalysts and cell components for anion exchange membrane water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 444(142030), 142030. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142030>

García-Navarro, J. C., Schulze, M., & Friedrich, K. A. (2019). Measuring and modeling mass transport losses in proton exchange membrane water electrolyzers using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources*, 431, 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.05.027>

González-Pabón, M. J., Figueredo, F., Martínez-Casillas, D. C., & Cortón, E. (2019). Characterization of a new composite membrane for point of need paper-based micro-scale microbial fuel cell analytical devices. *PloS One*, 14(9), e0222538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222538>

Hall, D. E. (1981). Electrodes for alkaline water electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 128(4), 740–746. <https://doi.org/10.1149/1.2127498>

- Hassan, N. S., Jalil, A. A., Rajendran, S., Khusnun, N. F., Bahari, M. B., Johari, A., Kamaruddin, M. J., & Ismail, M. (2023). Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.068>
- Hauch, A., Küngas, R., Blennow, P., Hansen, A. B., Hansen, J. B., Mathiesen, B. V., & Mogensen, M. B. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science (New York, N.Y.)*, 370(6513).  
<https://doi.org/10.1126/science.aba6118>
- Haverkort, J. W., & Rajaei, H. (2021). Voltage losses in zero-gap alkaline water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 497(229864), 229864.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229864>
- Hernández-Gómez, Á., Ramirez, V., & Guilbert, D. (2020). Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(29), 14625–14639.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.195>
- Hernández-Gómez, Á., Ramirez, V., Guilbert, D., & Saldivar, B. (2021). Cell voltage static-dynamic modeling of a PEM electrolyzer based on adaptive parameters: Development and experimental validation. *Renewable Energy*, 163, 1508–1522.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.106>

- Hu, C., Zhang, L., & Gong, J. (2019). Recent progress made in the mechanism comprehension and design of electrocatalysts for alkaline water splitting. *Energy & Environmental Science*, 12(9), 2620–2645. <https://doi.org/10.1039/c9ee01202h>
- Hu, K., Fang, J., Ai, X., Huang, D., Zhong, Z., Yang, X., & Wang, L. (2022). Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. *Applied Energy*, 312(118788), 118788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118788>
- J. Y. Huot, M. L. Trudeau, R. Schulz. (1991). *Low Hydrogen Overpotential Nanocrystalline Ni-Mo Cathodes for Alkaline Water Electrolysis*. The Electrochemical Society. 138 1316.
- Jones, D. J., Ohayre, R., Parthasarathy, R. K., & Kulkarni, A. R. (s/f). *Electrocatalysis of hydrogen oxidation and proton reduction in proton exchange membrane fuel cells using nickel-based catalysts*.
- Kahraman, H., Orhan, M. F. (2017). Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling. *Energy Conversion and Management*, 133, 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.053>
- Koj, M., Gimpel, T., Schade, W., & Turek, T. (2019). Laser structured nickel-iron electrodes for oxygen evolution in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(25), 12671–12684. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.030>
- Koj, M., Qian, J., & Turek, T. (2019). Novel alkaline water electrolysis with nickel-iron gas diffusion electrode for oxygen evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(57), 29862–29875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.122>

- Koj, M., Qian, J., & Turek, T. (2019). Novel alkaline water electrolysis with nickel-iron gas diffusion electrode for oxygen evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(57), 29862–29875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.122>
- Kraglund, M. R., Carmo, M., Schiller, G., Ansar, S. A., Aili, D., Christensen, E., & Jensen, J. O. (2019). Ion-solvating membranes as a new approach towards high rate alkaline electrolyzers. *Energy & Environmental Science*, 12(11), 3313–3318. <https://doi.org/10.1039/c9ee00832b>
- Kricheldorf, H. R. (1991). *Handbook of polymer synthesis* (Vol. 24). CRC press.
- Krishnan, S., Corona, B., Kramer, G. J., Junginger, M., & Koning, V. (2024). Prospective LCA of alkaline and PEM electrolyser systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55, 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.192>
- Lamy, C., & Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of Power Sources*, 447(227350), 227350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227350>
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained*. Wiley.
- Le Bideau, D., Mandin, P., Benbouzid, M., Kim, M., & Sellier, M. (2019). Review of necessary thermophysical properties and their sensitivities with temperature and electrolyte mass fractions for alkaline water electrolysis multiphysics modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(10), 4553–4569. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.222>

- LeRoy, R. L., Janjua, M. B. I., Renaud, R., & Leuenberger, U. (1979). Analysis of time-variation effects in water electrolyzers. *Journal of the Electrochemical Society*, *126*(10), 1674–1682. <https://doi.org/10.1149/1.2128775>
- Li, D., Motz, A. R., Bae, C., Fujimoto, C., Yang, G., Zhang, F.-Y., Ayers, K. E., & Kim, Y. S. (2021). Durability of anion exchange membrane water electrolyzers. *Energy & Environmental Science*, *14*(6), 3393–3419. <https://doi.org/10.1039/d0ee04086j>
- Li, H., et al. (2020). Ammonia as a renewable energy transportation media: Recent advances and future prospects. *Energy & Environmental Science*, *13*(2), 365-401.
- Li, L., Laan, P. C. M., Yan, X., Cao, X., Mekkering, M. J., Zhao, K., Ke, L., Jiang, X., Wu, X., Li, L., Xue, L., Wang, Z., Rothenberg, G., & Yan, N. (2023). High-rate alkaline water electrolysis at industrially relevant conditions enabled by superaerophobic electrode assembly. *Advanced Science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)*, *10*(4). <https://doi.org/10.1002/advs.202206180>
- Li, X., Sabir, I. (2005). Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, *30*(4), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.019>
- Li, Y., Yang, G., Yu, S., Kang, Z., Mo, J., Han, B., Talley, D. A., & Zhang, F.-Y. (2019). In-situ investigation and modeling of electrochemical reactions with simultaneous oxygen and hydrogen microbubble evolutions in water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(52), 28283–28293. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.044>

Lopata, J. S., Kang, S.-G., Cho, H.-S., Kim, C.-H., Weidner, J. W., & Shimpalee, S. (2021).

Investigating influence of geometry and operating conditions on local current, concentration, and crossover in alkaline water electrolysis using computational fluid dynamics. *Electrochimica Acta*, 390(138802), 138802.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138802>

López-Fernández, E., Sacedón, C. G., Gil-Rostra, J., Yubero, F., González-Elipé, A. R., & de

Lucas-Consuegra, A. (2021). Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(21), 6326.

<https://doi.org/10.3390/molecules26216326>

Matienzo, D. J. D., Kutlusoy, T., Divanis, S., Bari, C., & Instuli, E. (2020). Benchmarking

perovskite electrocatalysts' OER activity as candidate materials for industrial alkaline water electrolysis. *Catalysts (Basel, Switzerland)*, 10(12), 1387.

<https://doi.org/10.3390/catal10121387>

Muñoz Fernández, & Beleño Mendoza, W. A. (n.d.). Análisis del potencial del uso de hidrógeno

verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. Universidad Industrial de Santander.

Park, S.J., Ko, D.H. (Eds.). (s/f). *Nafion membranes for PEM fuel cells: Thermal and structural stability*.

Phillips, R., & Dunnill, C. (2019). *Zero gap cell design for alkaline electrolysis*. Unpublished.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26663.29606>

Phillips, R., Edwards, A., Rome, B., Jones, D. R., & Dunnill, C. W. (2017). Minimising the ohmic resistance of an alkaline electrolysis cell through effective cell design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 23986–23994.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.184>

Pozuelo, I. M. P. (2020). *Producción de hidrógeno a alta temperatura*. Biblus.us.es.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93255/fichero/TFG-3255+P%C3%89REZ+POZUELO%2C+ISABEL+MAR%C3%8DA.pdf>

Prades. (2006). *Hidrógeno hoy una alternativa energética y ambiental* (1a ed.). Cathedra Jurídica.

Reitz, W. (2007). *handbook of fuel cells: Fundamentals, technology, and applications*, (volume 2) W. vielstich, A. lamm, and H. a. gasteiger (editors): A review of: “John Wiley and sons, ltd., 111 river st., Hoboken, NJ 07030, 2003, vol. 2, electrocatalysis, 780+ pages, ISBN 0-471-49926-9.” *Materials and Manufacturing Processes*, 22(6), 789–789.

<https://doi.org/10.1080/10426910701416336>

Rifkin, J. (2003). The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth. *Refocus*, 4(3), 12. [https://doi.org/10.1016/s1471-](https://doi.org/10.1016/s1471-0846(03)80112-9)

[0846\(03\)80112-9](https://doi.org/10.1016/s1471-0846(03)80112-9)

Rodríguez, Palmas, Sánchez-Molina, Amores, Mais, & Campana. (2019). Simple and precise approach for determination of ohmic contribution of diaphragms in Alkaline Water Electrolysis. *Membranes*, 9(10), 129. <https://doi.org/10.3390/membranes9100129>

Salzano, F., Skaperdas, G., Mezzina, A. (1985). Water vapor electrolysis at high temperature:

Systems considerations and benefits. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(12), 801–809. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(85\)90168-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(85)90168-5)

Santoro, C., Lavacchi, A., Mustarelli, P., Di Noto, V., Elbaz, L., Dekel, D. R., & Jaouen, F.

(2022). What is next in anion-exchange membrane water electrolyzers? Bottlenecks, benefits, and future. *ChemSusChem*, 15(8). <https://doi.org/10.1002/cssc.202200027>

Simari, C., Caprì, A., Ur Rehman, M. H., Enotiadis, A., Gatto, I., Baglio, V., & Nicotera, I.

(2023). Composite anion exchange membranes based on polysulfone and silica nanoscale ionic materials for water electrolyzers. *Electrochimica Acta*, 462(142788), 142788. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142788>

Soto, O. E., (2020). Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrocatalizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada, Tesis de grado. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería eléctrica.

Strauss, M. F. (2021). *Comparison of cell and stack concepts for the alkaline water electrolysis*

*and their influence on the voltage efficiency and current density.* Unpublished.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15321.44646>

Strauss, M. F. (2021). *Comparison of cell and stack concepts for the alkaline water electrolysis*

*and their influence on the voltage efficiency and current density.* Unpublished.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15321.44646>

Timmers, J., Design of a lab-scale” zero-gap” water electrolyser. Jul 2022

Ursua, A, et al. (2010). Hydrogen production with alkaline electrolyzers: Electrochemical modelling, electric power supplies and integration with renewable energies. Universidad de Navarra, Pamplona, Spain.

Ursua, A., Gandia, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 100(2), 410–426. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2156750>

Vaughan, A. S., Gawel, D. T. (s/f). Polyvinylidene Fluoride (PVDF): A Review of Processing and Applications. (s/f).

Villagra, A., & Millet, P. (2019). An analysis of PEM water electrolysis cells operating at elevated current densities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9708–9717. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.179>

Wang, J., Gao, Y., Kong, H., Kim, J., Choi, S., Ciucci, F., Hao, Y., Yang, S., Shao, Z., & Lim, J. (2020). Non-precious-metal catalysts for alkaline water electrolysis: *operando* characterizations, theoretical calculations, and recent advances. *Chemical Society Reviews*, 49(24), 9154–9196. <https://doi.org/10.1039/d0cs00575d>

Wang, Y., Du, Y., Ni, M., Zhan, R., Du, Q., & Jiao, K. (2020). Three-dimensional modeling of flow field optimization for co-electrolysis solid oxide electrolysis cell. *Applied Thermal Engineering*, 172(114959), 114959. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114959>

Wieckowski, A. (2009). *Fuel cell catalysis: a surface science approach*. John Wiley & Sons.

Xu, D., Stevens, M. B., Cosby, M. R., Oener, S. Z., Smith, A. M., Enman, L. J., Ayers, K. E.,

Capuano, C. B., Renner, J. N., Danilovic, N., Li, Y., Wang, H., Zhang, Q., & Boettcher,

S. W. (2019). Earth-abundant oxygen electrocatalysts for alkaline anion-exchange-

membrane water electrolysis: Effects of catalyst conductivity and comparison with

performance in three-electrode cells. *ACS Catalysis*, 9(1), 7–15.

<https://doi.org/10.1021/acscatal.8b04001>

Yakdehige, S. K. D. S. (2017). *Design of an alkaline electrolysis stack*. Universitetet i Agder ;

University of Agder.

Yuan Zhu., Stephen J. Hamrock., Andrew M. Herring. (s/f). *Recent Progress in Proton Exchange*

*Membrane Fuel Cells Based on Nafion® and Related Polymers"*

Zhao, P., Wang, J., He, W., Sun, L., & Li, Y. (2023). Alkaline zero gap bipolar water electrolyzer

for hydrogen production with independent fluid path. *Energy Reports*, 9, 352–360.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.135>

Zhou, H., Dai, J., Chen, X., Hu, B., Wei, H., & Cai, H. H. (2023). Understanding innovation of

new energy industry: Observing development trend and evolution of hydrogen fuel cell

based on patent mining. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.032>