



**Universidad César Vallejo**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
MECÁNICA ELÉCTRICA**

Diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde  
en la localidad de Puerto Malabrigo

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTORES:**

Diaz Calderon, Sebastian Alberto ([orcid.org/ 0000-0003-2436-2594](https://orcid.org/0000-0003-2436-2594))

Del Aguila Lopez, Victor Denis ([orcid.org/0000-0002-5584-9453](https://orcid.org/0000-0002-5584-9453))

**ASESOR:**

Dr. Inciso Vasquez, Jorge Antonio ([orcid.org/0000-00018798-1283](https://orcid.org/0000-00018798-1283))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, Transmisión y Distribución.

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático.

TRUJILLO — PERÚ  
2024

## DEDICATORIA

Sebastián Alberto Díaz Calderón

Quiero expresar mi profundo agradecimiento y dedicar este proyecto a mis padres, a mis abuelos y a mi familia por el amor y constante soporte en todo paso que he tomado. Su dedicación y sacrificio han sido los cimientos de mi éxito. También, deseo manifestar mi gratitud a mis profesores y compañeros de clase, quienes han compartido su conocimiento, amistad y motivación constante. Sin ellos, no habría podido alcanzar mis logros.

Víctor Denis Del Águila López

Quiero manifestar mi agradecimiento a quienes fueron parte en mi desarrollo y me han acompañado durante este viaje universitario. Su apoyo constante y sus palabras de aliento han sido fundamentales para alcanzar mis metas. No encuentro las palabras suficientes para expresar cuán agradecido estoy por tenerlos en mi vida.

## AGRADECIMIENTO

Deseamos manifestar nuestra más profunda gratitud a nuestros docentes y familiares por su enorme apoyo y dedicación. Su impacto positivo en nuestras vidas ha sido crucial para nuestro desarrollo personal y académico. Agradecemos eternamente todas las enseñanzas y valores que nos han inculcado, los cuales han sido esenciales para convertirnos en las personas que somos hoy.



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, INCISO VASQUEZ JORGE ANTONIO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en la localidad de Puerto Malabrigo", cuyos autores son DEL AGUILA LOPEZ VICTOR DENIS, DIAZ CALDERON SEBASTIAN ALBERTO, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 11%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 18 de Junio del 2024

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
INCISO VASQUEZ JORGE ANTONIO <b>DNI:</b> 26695389 <b>ORCID:</b> 0000-0001-8798-1283	Firmado electrónicamente por: JINCISO el 19-06- 2024 10:30:43

Código documento Trilce: TRI - 0764643





**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

### **Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, DEL AGUILA LOPEZ VICTOR DENIS, DIAZ CALDERON SEBASTIAN ALBERTO estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en la localidad de Puerto Malabrigo", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
SEBASTIAN ALBERTO DIAZ CALDERON <b>DNI:</b> 74095673 <b>ORCID:</b> 0000-0003-2436-2594	Firmado electrónicamente por: SDIAZCAL el 18-06-2024 20:30:46
VICTOR DENIS DEL AGUILA LOPEZ <b>DNI:</b> 71260935 <b>ORCID:</b> 0000-0002-5584-9453	Firmado electrónicamente por: VAGUILALOB el 18-06-2024 18:58:31

Código documento Trilce: TRI - 0764644



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR.....	iv
DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE LOS AUTORES .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
INDICE DE TABLAS .....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Realidad Problemática .....	2
1.2 Objetivo General .....	4
1.3 Objetivos Específicos.....	4
II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes Internacionales.....	5
2.2 Antecedentes Nacionales .....	6
2.3 Energía Eólica.....	7
2.4 Hidrógeno Verde.....	9
2.5 La Electrólisis y sus Fundamentos.....	11
2.6 Descomposición del Agua.....	15
2.7 Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones.....	15
2.7.2 Producción de Hidrógeno .....	24
2.7.3 Eficiencia .....	24
2.8 Componentes de un Electrolizador PEM .....	25
2.9 Almacenamiento Del Hidrógeno .....	28
III. METODOLOGÍA .....	30
3.1 Tipo y Diseño de Investigación .....	30
3.1.1 Tipo de Investigación.....	30
3.1.2 Diseño de Investigación .....	30
3.2 Variables y Operacionalización.....	31
3.3 Población, Muestra y Muestreo.....	31

3.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	31
3.5	Procedimientos .....	32
3.6	Aspectos Éticos.....	32
IV.	RESULTADOS.....	33
4.1	Análisis Comparativo de Tecnologías de Electrólisis .....	33
4.2	Cálculo de Voltaje Reversible .....	34
4.3	Cálculo de Sobrevoltaje Óhmico .....	35
4.4	Cálculo de Sobrevoltaje de Activación .....	39
4.5	Cálculo de Sobrevoltaje de Difusión .....	41
4.6	Voltaje de Celda.....	43
4.7	Producción de Hidrógeno.....	44
4.8	Eficiencia del Electrolizador .....	45
4.9	Velocidad de Flujo en el Ánodo .....	47
4.10	Distribución de Presión .....	48
4.11	Potencial Eléctrico.....	49
4.12	Fracción de Masa.....	50
V.	DISCUSIÓN .....	52
VI.	CONCLUSIONES .....	56
VII.	RECOMENDACIONES .....	57
VIII.	REFERENCIAS.....	58
IX.	ANEXOS .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa de combustibles (SÁNCHEZ, 2019). .....	10
Tabla 2 Comparativa de tecnologías de obtención de hidrógeno (PINSKY, y otros, 2024).....	15
Tabla 3 tabla comparativa de tecnologías de electrólisis.....	33
Tabla 4 Tabla resultados voltaje óhmico.....	39
Tabla 5 Valores sobrevoltaje de activación.....	41
Tabla 6 condiciones de operación .....	47
Tabla 7 comparativa de resultados .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1(Izquierda) Influencia de la temperatura con respecto a la ecuación 3 a 1 atm; (Derecha) dependencia de voltaje termoneutro y reversible con la temperatura a 1 atm (SÁNCHEZ, 2019). .....	12
Figura 2 reacciones y partes de un electrolizador PEM (Carrillo, 2023) .....	16
Figura 3 Esquema de un sistema electrolizador PEM diseñado para la producción de hidrógeno (Houcheng, y otros, 2012).....	17
Figura 4 Ilustra el proceso de la tecnología PEMEC VS PEMFC (LAMY, 2016)	18
Figura 5 Conductividad del Nafion® 117 con respecto a la temperatura mediciones experimentales (AVRAMOV, y otros, 2016).....	26
Figura 6 Ecuación Nernst para calculo voltaje reversible .....	35
Figura 7 Curva $\lambda_{mem}$ con respecto a "a".....	36
Figura 8 Conductividad de la membrana a diferentes valores de lambda .....	36
Figura 9 Sobrepotencial óhmico .....	37
Figura 10 Valores $i_0$ con respecto a la temperatura .....	39
Figura 11 Curva de sobrevoltaje de activación en el ánodo a diferentes densidades de corriente.....	40
Figura 12 Curva de sobrevoltaje de activación en el cátodo a diferentes densidades de corriente.....	41
Figura 13 Concentración de especies con respecto a la temperatura a diferentes presiones de operación.....	42
Figura 14 Sobrevoltaje de difusión en el ánodo con respecto a la temperatura .	43
<i>Figura 15 Sobrevoltaje de difusión en el ánodo con respecto a la temperatura .</i>	43
Figura 16 Flujo másico de hidrógeno con respecto a la temperatura aplicando la ecuación 19: .....	45
Figura 17 Velocidad de flujo en el ánodo.....	48
Figura 18 Distribución de presión .....	49

Figura 19 Potencial Eléctrico Electrolizador.....	49
Figura 20 Potencial Eléctrico en membrana .....	50
Figura 21 Fracción de masa $H_2$ plano xz en el canal de flujo del cátodo.....	50
Figura 22 Fracción de masa $H_2$ en canal de flujo plano xy cátodo .....	51

## RESUMEN

La combustión de combustibles fósiles tales como el carbón, el petróleo y el gas natural produce gases de efecto invernadero, entre ellos el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). En 2015, la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera alcanzó 400 ppm (partes por millón), aumentando a 413.2 ppm en 2020, lo que representa un incremento del 3.3 % en cinco años. Este aumento en la concentración de  $CO_2$  la cual presenta principalmente cambios climáticos. La generación de hidrógeno se presenta como una opción viable para abordar este problema global, especialmente a través de medios sostenibles como la energía eólica, solar y geotérmica. Este estudio se centra en el diseño de un electrolizador PEM (Membrana de Electrolito Polimérico) para la producción de hidrógeno verde en Puerto Malabrigo, Perú, buscando evaluar su eficiencia y viabilidad operativa. Se utilizó un método cuasiexperimental, modelado geométrico y simulación en ANSYS 2024 R1 para analizar el comportamiento del electrolizador en términos de voltaje, densidad de corriente y producción de hidrógeno. Los resultados obtenidos proporcionan una base para futuras optimizaciones y aplicaciones a mayor escala.

**Palabras clave:** Hidrógeno Verde, diseñar, electrolizador.

## ABSTRACT

The combustion of fossil fuels such as coal, oil, and natural gas generates greenhouse gases, including carbon dioxide ( $CO_2$ ). In 2015, atmospheric  $CO_2$  concentration reached 400 ppm (parts per million), increasing to 413.2 ppm by 2020, a 3.3 % rise in five years. This increase in  $CO_2$  concentration is a significant driver of climate change. Hydrogen generation is a promising option to tackle this global issue, particularly through sustainable means like wind, solar, and geothermal energy. This study focuses on the design of a PEM (Proton Exchange Membrane) electrolyzer for green hydrogen production in Puerto Malabrigo, Peru, aiming to evaluate its efficiency and operational feasibility. A quasi-experimental design, geometric modeling, and simulation in ANSYS 2024 R1 were employed to analyze the electrolyzer's performance in terms of voltage, current density, and hydrogen production. The results provide a foundation for future optimizations and large-scale applications.

**Keywords:** Green Hydrogen, Design, Electrolyzer.

## I. INTRODUCCIÓN

La combustión de productos fósiles, tales como el petróleo y el carbón, así como también el gas natural, produce gases los cuales contribuyen con el efecto invernadero, que incluye el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). En el año 2015, la concentración de  $CO_2$  la cual se encontró en la atmósfera alcanzó un registro de 400 ppm (partes por millón) y para 2020 se registró un aumento a 413.2 ppm, un aumento alrededor de 3.3 % en 5 años. Este aumento en la concentración de  $CO_2$  constituye una de las principales razones del cambio climático (OMM, 2021).

La generación de hidrógeno se destaca siendo una opción en un contexto global donde hay una creciente en necesidad de enfrentar el cambio. La obtención de hidrógeno a partir de medios de energía sostenible con la cual busca hallar el equilibrio con nuestro entorno y prevenir escasez que puede colocar en riesgo la humanidad Para satisfacer la demanda, los sistemas eléctricos tradicionales dependen de la generación continua de energía. No obstante, la aparición de energías renovables no convencionales (ERNC), tales como eólica, solar y geotérmica, ha generado una mayor demanda de almacenamiento de energía. Esto se debe a que las ERNC tienen un comportamiento aleatorio, lo que significa que la generación depende de variables como la velocidad del viento, radiación solar o la temperatura del subsuelo (SALCEDO CORTÉZ, 2020).

Aunque existen alternativas como el hidrógeno, la mayoría de los sistemas para almacenar el tipo de energía en ERNC se enfocan en el uso de baterías electroquímicas debido a su abundancia y limpieza, así como a su versatilidad como combustible para vehículos y otros equipos, este gas se destaca como una de las mejores opciones para el almacenamiento de energía (SALCEDO CORTÉZ, 2020).

Las energías se pueden clasificar en los siguientes grupos (NÄHRING, 2021):

- Energía renovable:

Energía limpia: Eólica, hidráulica o hidroeléctrica, solar fotovoltaica, solar térmica, geotérmica mareomotriz, ola motriz

Energía no limpia: Biomasa / Biogás, Bioetanol / biodiésel

- Energía no renovable

Energía limpia: Gas natural

Energía no limpia: Petróleo, carbón, energía nuclear

Puerto Malabrigo, ubicado en el distrito de Razuri, provincia de Ascope (INEI, 2018), se basa en su capacidad eólica y en la facilidad de acceso al recurso hídrico para la electrólisis (H2 Perú, 2021), este proyecto de investigación abordó el beneficio de un electrolizador en la localidad. Como una solución sostenible para la generación de hidrógeno verde, esta investigación examinará los aspectos técnicos y económicos del diseño del electrolizador, adaptándolo a las condiciones específicas de Malabrigo. Se investigaron las ventajas económicas y ambientales de esta tecnología en el área, considerando su contribución a la disminución de carbono en la matriz energética de Perú.

### 1.1 Realidad Problemática

Millones de personas en América Latina están no tienen acceso a la electricidad. En 2022, aproximadamente el 17 % de la población regional carecía de acceso a la electricidad, según datos de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). La falta de electricidad impacta negativamente en el crecimiento económico y social de la zona, ya que las personas sin electricidad poseen dificultades para acceder a servicios indispensables, así como la educación, salud y la comunicación (CEPAL, 2023).

En el Perú, alrededor del 4 % de la población, no cuenta con acceso a la electricidad, lo que dificulta el acceso a servicios tales como la educación, salud y comunicación. Esta situación impacta negativamente en el desarrollo y la calidad de vida, limitando oportunidades y exacerbando desigualdades sociales. (INEI, 2019)

Puerto Malabrigo es una ciudad pesquera que está ubicada en el norte del

Perú. Esta ciudad se divide en 4,831 personas que viven en la ciudad dentro del Distrito de Razuri (INEI, 2018).

El hidrógeno, una fuente abundante, limpia y versátil, no produce emisiones contaminantes y puede utilizarse para producir electricidad, impulsar vehículos y alimentar una variedad de equipos. La generación de hidrógeno en Puerto Malabrigo permitiría garantizar el suministro de electricidad, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación ambiental.

La producción de hidrógeno en Puerto Malabrigo requirió la propuesta de una implementación de un electrolizador, la cual es un dispositivo que aprovecha la electricidad para lograr descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, esta iniciativa representaría una solución innovadora y sostenible.

El proyecto buscó responder la pregunta fundamental de cómo el diseño de un electrolizador de hidrógeno en Puerto Malabrigo puede contribuir al crecimiento sostenible de la zona. La respuesta a esta pregunta no solo reducirá nuestra dependencia de los combustibles fósiles, sino que también promoverá un desarrollo más sostenible tanto en la ciudad como en la Región.

En relación con la problemática abordada, se ha formulado la hipótesis de la siguiente manera: "El diseño de un electrolizador específico para Puerto Malabrigo podría proporcionar electricidad a las empresas pesqueras locales, reduciendo así su dependencia de combustibles fósiles".

## 1.2 Objetivo General

- Diseñar un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en la ciudad de Malabrigo, Perú, utilizando la energía generada por una planta eólica.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Comparar las tecnologías de electrólisis más utilizadas en la actualidad.
- Dimensionar y determinar las especificaciones técnicas del electrolizador.
- Modelar y simular el comportamiento del electrolizador bajo condiciones de operación.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes Internacionales

Definidos los objetivos del proyecto, ha sido de necesidad revisar trabajos previos relacionados con el desarrollo de la investigación:

El artículo científico “Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater” se describe que la producción de hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles para generar energía. Se describe el uso de electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) que requieren caracterizar la alta calidad y agua desmineralizada en plataformas petroleras del Mar, donde evaluaron diferentes fuentes de energía para alimentar el proceso, como la red eléctrica, paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas. El resultado indica que la red eléctrica es la opción más rentable con un costo de producción de hidrógeno de alrededor de 5 dólares por kg. Incluso considerando el futuro impuesto al  $CO_2$  en Noruega, la red eléctrica sigue siendo la opción más económica aproximadamente 7.7 dólares por kg de  $H_2$  (DOKHANI, y otros, 2023).

En “Design Strategy of Corrosion-Resistant Electrodes for Seawater Electrolysis.” El diseño de electrodos resistentes a la corrosión es crucial para el funcionamiento eficiente de los electrolizadores en zonas costeras, donde se utiliza agua de mar como electrolito. Estudios recientes se han centrado en la síntesis de Análogos de Azul de Prusia basados en Co e Híbridos de Microesferas Huecas con Doble Dopaje como electrocatalizadores bifuncionales de alto rendimiento para la evolución de oxígeno y la ruptura total del agua. Estos materiales están diseñados para soportar el duro entorno oxidativo de la electrólisis de agua de mar, lo cual es esencial para la durabilidad y longevidad del electrolizador. Por ejemplo, los sitios catalíticos de rutenio atómico sobre hidróxidos dobles laminares defectuosos de níquel-hierro han mostrado ser prometedores para la ruptura total del agua, lo que subraya la importancia de la ingeniería de materiales a nivel atómico. Además, se

ha explorado el uso de espumas de níquel electroquímicamente activas como materiales de soporte para electrocatalizadores nanoscópicos de platino para mejorar el rendimiento electrocatalítico (Zhao, y otros, 2023).

En el artículo “Design and Scale-Up of Zero-Gap AEM Water Electrolysers for Hydrogen Production” desarrollo de materiales y estrategias avanzadas para la separación del agua de mar es un área clave de investigación para el diseño de electrolizadores en zonas costeras. Se han propuesto estrategias innovadoras en el diseño de catalizadores basados en metales de transición para la electrólisis de agua/agua de mar alcalina a alta densidad de corriente. Estas estrategias incluyen el uso de marcos organometálicos y sus derivados como electrocatalizadores bifuncionales, así como el diseño de electrocatalizadores para reacciones de conversión de energía que involucran oxígeno e hidrógeno. Otro ejemplo de los avances en este campo es el uso de catalizadores de bajo contenido de Pt ajustados a MXene (Materiales altamente conductores con una superficie hidrofílica) hueco multinivel para la evolución del hidrógeno en todo el rango de pH y agua de mar. Además, se ha reconocido la importancia de las contribuciones entrópicas a la catálisis electroquímica de la oxidación del agua, lo que puede influir en el diseño de sistemas de electrólisis más eficientes (Loh, y otros, 2023).

## 2.2 Antecedentes Nacionales

- La producción de hidrógeno utilizando aerogeneradores de la marca SIEMENS Gamesa, particularmente el modelo SG 2.1-114. Estos aerogeneradores tienen una potencia nominal de 2.1 MW y un diámetro de rotor de 114 m, y están diseñados para ubicaciones con vientos bajos y medios. Se incluye una curva de potencia, y las alturas de torre van desde los 68 hasta los 153 metros. El análisis indica que la energía requerida para producir de hidrógeno a través de electrólisis del agua es. de 39 kWh por kilogramo de agua. a pesar de que, tras la práctica, un sistema PEM en el mercado posee una eficacia del 55 % al 75 %. Se

seleccionó una eficiencia del 75 % para este estudio porque es el porcentaje más común de electrolizadores PEM disponibles en el mercado (CARAVANTES SAMAMÉ, y otros, 2023).

- La organización  $H_2$  Perú, la Asociación Peruana del Hidrógeno, se fundó en marzo de 2021 con el objetivo de lograr impulsar el desarrollo de hidrógeno verde en el país. ENGIE Impact realizó la primera investigación en Perú con el objetivo de examinar la capacidad del mercado del hidrógeno en tonos verde y azul. Se identificaron y seleccionaron los territorios con mayor potencial para su producción y consumo en el país a través del análisis de cadena del valor del hidrógeno. Perú tiene una postura estratégica privilegiada a nivel global para el crecimiento económico mediante el uso de hidrógeno a bajo costo, con las regiones tanto como el norte y sur del país consideradas como centros de producción potenciales debido a la abundancia de recursos eólicos en ambos lados del país específicamente en la región norte con un potencial eólico de 5 MWh/m<sup>2</sup>-año (H2 Perú, 2021).
- Las energías renovables fuera de la red experimentaron un crecimiento notable en 2022, particularmente en regiones fuera de Eurasia, América del Norte y Europa. Su capacidad total aumentó en 1237 MW, alcanzando un total de 12.4 GW, un 11 % más que en 2021. La energía solar fuera de la red fue la principal protagonista, con un aumento de 478 MW hasta llegar a 5.1 GW. La capacidad hidroeléctrica aislada se mantuvo estable, mientras que el resto del crecimiento provino de la expansión de diversas tecnologías de bioenergía. Este auge resalta el potencial de las energías renovables fuera de la red para proporcionar acceso a energía limpia y confiable a comunidades que no están conectadas a la red eléctrica tradicional. A medida que esta tecnología progresa y los costos se reduje, se espera que las energías renovables fuera de la red desempeñen un papel cada vez mucho más importante en la transición hacia un futuro energético sostenible (IRENA, 2023).

### 2.3 Energía Eólica

La energía eólica se define como la energía obtenida a partir del viento, un recurso natural inagotable y limpio. Este proceso de captura y transformación se lleva a cabo mediante aerogeneradores, imponentes estructuras que convierten la energía cinética del viento en electricidad, el principio fundamental del funcionamiento de un aerogenerador se basa en la transferencia de energía cinética del viento a las palas, las cuales rotan alrededor de un eje horizontal. Este movimiento rotatorio se transmite a un generador eléctrico ubicado en la góndola del aerogenerador, donde se logra producir la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. La fórmula que describe la potencia teórica capturada por un aerogenerador se observa en la ecuación 1 (SAINT-DRENAN, y otros, 2020):

$$P = \frac{1}{2} \rho A_{rotor} v^3 C_p \quad (1)$$

Dónde:

$P$ : Potencia del sistema.

$\rho$ : Densidad del aire .

$A$ : Área barrida por las palas del rotor.

$v$ : Velocidad de flujo.

$C_p$ : Coeficiente de potencia.

Un aerogenerador relaciona la velocidad del flujo de viento interceptado por el mismo. Se necesita una curva de potencia en diferentes etapas de la vida útil de un parque eólico. Antes de su introducción en el mercado, se debe evaluar la curva de potencia de una turbina de nuevo diseño para validar actuación. Los desarrolladores de proyectos utilizan curvas de potencia junto con información del viento para evaluar el impacto económico, la viabilidad del desarrollo de un parque eólico durante el funcionamiento el cual la eficiencia aerodinámica de una turbina puede evolucionar con el tiempo debido al desgaste de los componentes de la turbina, la acumulación de suciedad en las palas de la turbina eólica y

muchos otros efectos. Por lo tanto, la evaluación de la curva de potencia durante la vida útil de un parque eólico es útil para monitorear el estado de salud de las turbinas y degradación debido al envejecimiento. Las curvas de potencia también son utilizadas para estimar la producción de energía agregada de los parques eólicos y su integración en el sistema eléctrico nacional, sistemas y mercados eléctricos. (SAINT-DRENAN, y otros, 2020).

La selección de Puerto Malabrigo se debe a la favorable producción de energía eólica en la zona, esta ciudad posee una cercanía a la central eólica Cupisnique, este parque eólico posee una capacidad de 80 MW contando los cuales se distribuyen entre sus 45 aerogeneradores los cuales pertenecen a la filial Energía Eólica S.A. (Asociación Peruana de Energías Renovables, 2022).

#### 2.4 Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde, producido a partir de fuentes de energía renovable, se ha vuelto crucial en lo que es la lucha contra el cambio climático y la descarbonización en sectores como el transporte, la industria y la generación de energía. La electrólisis del agua, un procedimiento que logra utilizar electricidad para dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno, es esencial para producir hidrógeno verde. Innovaciones como la electrólisis sin membrana prometen incrementar la eficiencia y reducir las emisiones de carbono de manera significativa. En este contexto, los electrolizadores son dispositivos fundamentales y representan un avance tecnológico clave. Además, la capacidad de estos dispositivos para operar con fuentes de electricidad intermitentes, como la solar y la eólica, los hace aún más vitales para integrar energías renovables en la red (FURFARI, y otros, 2021).

El hidrógeno en alta pureza posee una densidad energética superior en unidad de masa comparado con otros combustibles químicos, con un valor de 33.33 kWh/kg. Sin embargo, debido a sus bajas densidades a

presiones atmosféricas, su capacidad de almacenamiento volumétrico de energía es limitada. A una presión de 150 bar, esta capacidad aumenta a 0.449 kWh/l, en contraste con los 8.8 kWh/l de la gasolina. No obstante, para que el hidrógeno sea viable como vector energético, es necesario desarrollar sistemas de almacenamiento que aumenten significativamente este valor. Además, en sus aplicaciones finales, consideraciones de costos, eficiencia y seguridad, estas son determinantes en la elección de las tecnologías más adecuadas. Las metodologías principales de almacenamiento de hidrógeno incluyen la compresión y la licuefacción. (CHICA NUÑEZ, y otros, 2020).

Combustible	LHV (MJ/kg)	HHV (MJ/kg)	RI(%)	TA (°C)	EMI (MJ)	TLL (°C)
Metano	50.0	55.5	5.0 - 15.0	540 - 630	0.30	1914
Propano	45.6	50.3	2.1 - 9.5	450	0.30	1925
Metanol	18.0	22.7	6.7 - 36.0	460	0.14	1870
Hidrógeno	119.9	141.6	4.0 - 75.0	585	0.017	2207
Gasolina	43.4	46.5	1.3 - 7.1	260 - 460	0.29	2307
Diesel	42.5	45.7	0.6 - 5.5	180 - 320	-	2327

Tabla 1 Comparativa de combustibles (SÁNCHEZ, 2019).

Dónde:

LHV: Poder calorífico inferior (siglas en inglés).

HHV: Poder calorífico superior (siglas en inglés).

RI: Rango de inflamabilidad.

TA: Temperatura de autoignición.

TLL: Temperatura de llama.

EMI: Energía mínima de ignición.

En la tabla 1 se destaca varias ventajas del hidrógeno en comparación con otros combustibles, entre la cual se destaca un mayor poder calorífico inferior 119.9 considerablemente superior al resto de combustibles

(SÁNCHEZ, 2019).

Cuando se trabaja con hidrógeno en estado gaseoso y se busca comprimirlo a presiones elevadas. Calcular con precisión el trabajo requerido para la compresión del hidrógeno implica conocer una ecuación de estado y una ecuación de calor adecuadas, información que no siempre está fácilmente disponible. Como resultado, muchos investigadores consideran que la compresión de hidrógeno es isoentrópica y reversible, y no existe intercambio de calor con respecto al compresor y el ambiente en el transcurso de la fase. A pesar de estas simplificaciones, es importante tener en cuenta que tratar al hidrógeno como un gas ideal con altas presiones puede llevar a errores importantes (SILVA, 2021).

## 2.5 La Electrólisis y sus Fundamentos

### 2.5.1 Electrólisis del Agua

La electrólisis es un proceso termodinámico no espontáneo ( $0 < \Delta G$ ) lo cual nos indica que se necesita externamente un aporte de energía al sistema, el cual se puede calcular por medio de la ecuación del cambio de energía libre de Gibbs (ecuación 2) (SÁNCHEZ, 2019):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

Dónde:

$\Delta G$  = Variación de energía libre de Gibbs.

$\Delta H$  = Variación de entalpía.

$\Delta S$  = Variación de entropía.

$T$  = Temperatura.

Si  $\Delta G < 0$ , la reacción se considera espontánea y liberará energía útil. Si  $\Delta G > 0$ , la reacción es no espontánea y requerirá un aporte de energía externa para llevarse a cabo. Si  $\Delta G = 0$ , la reacción se encuentra en equilibrio (SÁNCHEZ, 2019).

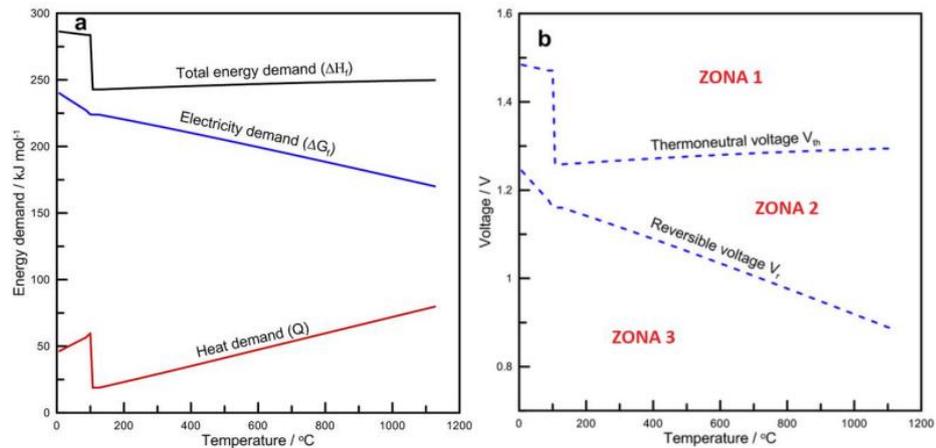


Figura 1(Izquierda) Influencia de la temperatura con respecto a la ecuación 3 a 1 atm; (Derecha) dependencia de voltaje termoneutro y reversible con la temperatura a 1 atm (SÁNCHEZ, 2019).

## 2.5.2 Tipos de Electrólisis

La electrólisis es una fase fundamental para la elaboración de hidrógeno verde, descomponiendo el agua en hidrógeno y oxígeno mediante el empleo de un electrolizador y una corriente continua, de las cuales se destacan:

- **Electrólisis Alcalina (AE)**: Es una tecnología establecida para la producción de hidrógeno. Utiliza una solución de NaOH o KOH como electrolito y opera a temperaturas de 70 a 90°C y presiones de hasta 3 MPa. Los electrodos, generalmente de níquel, generan hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. Este método es eficaz y económico para la producción a gran escala, aunque enfrenta desafíos cuando se combina con fuentes de energía renovable debido a la fluctuación en la disponibilidad de energía y la exigencia de evitar la contaminación cruzada de gases (BRAUNS, y otros, 2020).
- **Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC)**: La electrólisis de óxido sólido utiliza electrolitos cerámicos conductores de oxígeno a altas temperaturas (700-1000°C). En los SOEC, los electrodos están fabricados con materiales como níquel-ceria para el cátodo y lantano-estroncio-manganeso (LSM)

para el ánodo. Este proceso es altamente eficiente porque parte de la energía requerida proviene del calor. Los SOEC también permiten la co-electrólisis de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> para producir hidrógeno y monóxido de carbono, útil para la síntesis de combustibles. Sin embargo, los desafíos incluyen la degradación de los materiales de los electrodos, lo que afecta su durabilidad y eficiencia a largo plazo (ZHENG, y otros, 2021).

- **Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM):** Es una tecnología que convierte agua en hidrógeno y oxígeno usando una membrana especial y electricidad. Este proceso es eficiente y produce hidrógeno de alta pureza. Los electrolizadores PEM incluyen una membrana conductora de protones y electrodos recubiertos con catalizadores como platino e iridio. Funcionan a bajas temperaturas, generalmente entre 60 y 80 °C, y pueden generar hidrógeno a alta presión, lo que es útil para aplicaciones industriales y energéticas. Sin embargo, el uso de catalizadores de metales preciosos aumenta significativamente los costos en comparación con otros métodos de electrólisis, como los sistemas alcalinos (LIM, y otros, 2023).

Tanto la electrólisis PEM como la electrólisis alcalina, son de las tecnologías más usadas en el mercado existen varios medios de obtención de hidrógeno de las cuales se expresan en la tabla 2:

Tecnología	Sub-método de Producción	Materia Prima	Rango de Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	Madurez
	SMR	Hidrocarburos	700-1000	74-85	Comercial
	POX	Hidrocarburos	800-1000	60-75	Comercial
	ATR	Hidrocarburos	700-1000	60-75	A corto plazo
	Pirolisis	Hidrocarburos	1000-1400	51	A corto

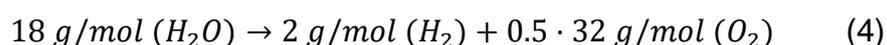
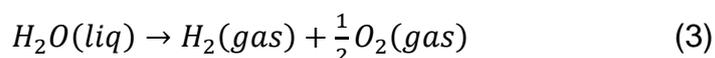
<b>Basado en Combustibles Fósiles</b>					plazo
	Reformado por Plasma	Hidrocarburos	900-1300	9-85	A corto plazo
	Reformado en fase acuosa	Carbohidratos	220-270	35-55	A corto plazo
	Reformado de Amoníaco	Amoníaco	800-900	28.3	A corto plazo
	SMR	Hidrocarburos	700-1000	74-85	A corto plazo
	POX	Hidrocarburos	800-1000	60-75	A corto plazo
<b>Basado en fuentes Renovables</b>	Gasificación de Biomasa	Biomasa	800-1000	35-50	Comercial
	Fotólisis	Agua + Luz Solar	Ambiente	0.5	A largo plazo
	Fermentación Oscura	Biomasa	Ambiente	60-80	A largo plazo
	Fotofermentación	Biomasa + Luz Solar	Ambiente	1.9	A largo plazo
	MEC	Biomasa + Electricidad	Ambiente	78	
	Electrólisis Alcalina	Agua + Electricidad	40-90	62-82	Comercial
	Electrólisis PEM	Agua +	20-100	67-82	Comercial

		Electricidad			
	SOEC	Agua + Electricidad + Calor	700-1000	<110	A medio plazo
	Termoquímico	Agua + Calor	500-1000+	20-45	A medio plazo
	División del Agua	Agua + Luz Solar	Ambiente	12.4	A medio plazo

*Tabla 2 Comparativa de tecnologías de obtención de hidrógeno (PINSKY, y otros, 2024).*

## 2.6 Descomposición del Agua

La ecuación básica de la electrólisis para su descomposición de la molécula de agua (ecuación 3), podemos calcular el balance de masas (ecuación 4), (SILVA, 2021):



Muchos investigadores han demostrado detalladamente el mecanismo operativo de un sistema electrolizador PEM para la producción de hidrógeno donde la reacción general de división del agua es que el  $H_2O$  más la electricidad y el calor se convierten en  $H_2$  y  $O_2$  es decir,  $H_2O + \text{calor} + \text{electricidad} \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2 + \text{energía requerida para la producción de hidrógeno electrolítico}$  (SILVA, 2021).

## 2.7 Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones

Los primeros modelos experimentales que emplearon la electrólisis del agua con membrana de intercambio de protones (PEM, siglas en inglés para Proton Exchange Membrane) surgieron a inicios de la década de



*Figura 3 Esquema de un sistema electrolizador PEM diseñado para la producción de hidrógeno (Houcheng, y otros, 2012).*

Los sistemas de electrólisis como se observan en la figura 3 PEM suelen estar constituidos por un electrolizador PEM, un separador, una bomba y dos intercambiadores de calor. Para llevar a cabo las reacciones de división del agua, donde se suministran agua pura, electricidad y, si es necesario, calor al electrolizador PEM. El hidrógeno ( $H_2$ ) generado se extrae por el cátodo, mientras que el oxígeno ( $O_2$ ) y el agua residual ( $H_2O$ ) se liberan por el ánodo. El calor presente en los productos de salida puede ser recuperado mediante el uso del primer intercambiador de calor. Tras pasar por este intercambiador, el hidrógeno se enfría a las condiciones estándar (298,15 K y 101325 Pa), se comprime y se almacena como combustible. La mezcla de oxígeno y agua fluye hacia el separador, donde el oxígeno se enfría y puede ser utilizado como subproducto; el agua caliente es recirculada hacia la corriente de suministro de agua en condiciones de referencia y se bombea de nuevo al primer intercambiador de calor para el siguiente ciclo de producción de hidrógeno. Debido a las diferentes propiedades termodinámicas de los reactivos y productos, y a la ineficiencia del primer intercambiador de calor, la alimentación de agua debe ser calentada adicionalmente a través del segundo intercambiador de calor antes de alcanzar la temperatura requerida por el electrolizador PEM. Este modelo es más general y razonable que los modelos convencionales, ya que abarca los principales procesos de uso de energía en la producción de hidrógeno y permite la utilización eficiente del calor residual generado en el electrolizador. (Houcheng, y otros, 2012).

Como contraparte de la electrólisis PEM tenemos lo que se conoce como celdas de combustible con electrolito de membrana (PEMFC, siglas en inglés), la cual posee el funcionamiento inverso de lo que es un PEMEC, donde se ingresa  $H_2$  y  $O_2$  reaccionando estos entre si y la fusión de estos componentes en agua por medio de la membrana nos brinda electricidad, la cual posee diversas aplicaciones en la industria hoy en día, de la cual

podemos observar en la figura 4 con sus respectivas reacciones:

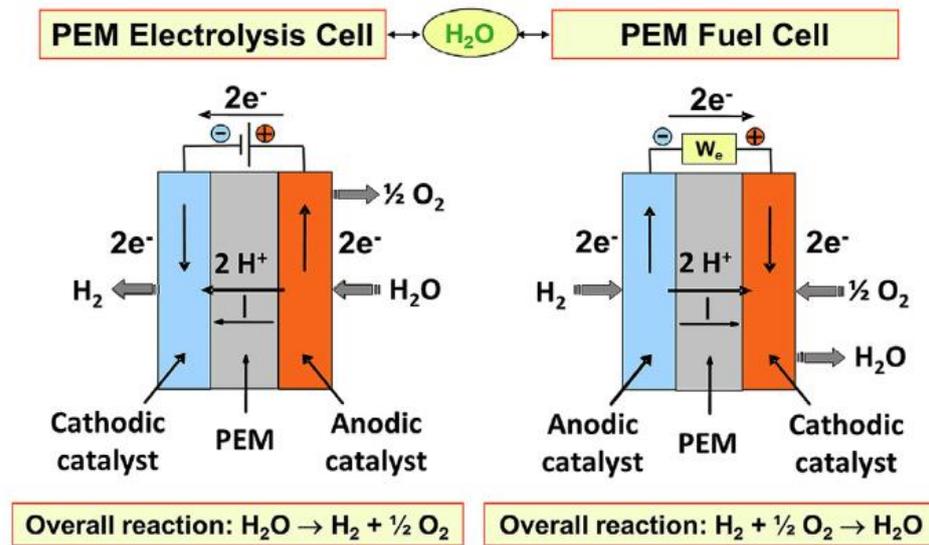
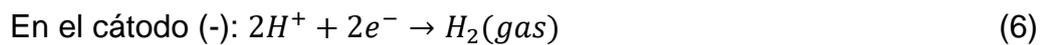
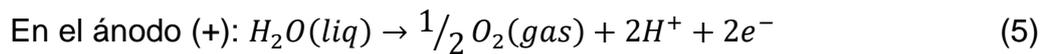


Figura 4 Ilustra el proceso de la tecnología PEMEC VS PEMFC (LAMY, 2016)

Obtenemos las reacciones en el electrolizador PEM:

Donde las reacciones que ocurren en un electrolizador PEM en el ánodo y el cátodo se presentan a continuación:



Fuente: (BESSARABOV, y otros, 2018).

Mientras que la ecuación 3 es la reacción global que surge de la combinación de las dos semirreacciones electroquímicas halladas en el ánodo (ecuación 5) y cátodo (ecuación 6), en un entorno ácido, requiere una fuente de energía eléctrica de corriente continua (CC) para su ocurrencia. Se establece una conexión de una fuente de alimentación eléctrica de corriente continua a los electrodos, y la descomposición del agua se inicia cuando se emplea un voltaje de corriente continua que excede el potencial termodinámico reversible. (Falcão, y otros, 2020).

### 2.7.1 Voltajes y Sobrevoltajes de Operación

### 2.7.1.1 Voltaje Reversible

El agua puede ser alimentada tanto al lado del ánodo como del cátodo en un electrolizador; sin embargo, la mayoría de los electrolizadores PEM utilizan una alimentación de agua en el ánodo, ya que el agua se consume en este lado. En condiciones reversibles, donde no hay pérdidas, la desigualdad de potencial entre los electrodos del ánodo y del cátodo se conoce como el potencial de celda reversible, que está relacionado con el trabajo eléctrico mínimo necesario para descomponer el agua cuando se proporciona la energía térmica adecuada, para hallar el voltaje requerido por una celda del electrolizador tipo PEM requerimos el voltaje reversible el cual se denomina el voltaje mínimo requerido para fraccionar el agua en moléculas de oxígeno e hidrógeno, el cual se puede calcular a partir de la ecuación de energía libre de Gibbs, el cual relacionamos con el trabajo eléctrico necesario utilizando constante de Faraday en la ecuación 7 (BESSARABOV, y otros, 2018):

$$E_{rev}^{\circ} = \frac{\Delta G^{\circ}}{zF} = 1.229 \text{ V} \quad (7)$$

Dónde:

$E_{rev}^{\circ}$ : Voltaje reversible a condiciones estándar.

$\Delta G^{\circ}$ : Delta de Gibbs a condiciones estándar ( $237.2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ ).

$z$ : Numero de electrones de intercambio.

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

De la ecuación 7 se identificó el voltaje requerido para realizar la separación de la molécula de agua el cual nos indica que se requiere 1.229 V, conocido también como voltaje reversible, esto a condiciones estándar de 25 °C y a presión atmosférica, para calcular el voltaje requerido en condiciones que no son estándar se utiliza la ecuación de Nernst (ecuación 8), la cual aplicándola logramos obtener el voltaje reversible, esta ecuación relaciona el voltaje electroquímico la cual aplicada a la electrólisis en un medio donde se requiere ingreso de

corriente externa para que la reacción tenga efecto obtenemos que el voltaje reversible se encuentra por medio de la ecuación 9 (MAREFATJOUIKILEVAEE, et al., 2023):

$$E = E^0 - \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln K \quad (8)$$

$$E_{rev} = E_{rev}^0 + \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln K \quad (9)$$

Dónde:

$E_{rev}$ : Voltaje reversible.

$E_{rev}^0$ : Voltaje reversible a condiciones estándar.

$R$ : Constante universal de los gases (8.314 J/mol·K).

$T$ : Temperatura en grados Kelvin.

$z$ : Numero de electrones de intercambio.

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

$K$ : Cociente de reacción  $\left[ \frac{p_{H_2}}{p_{ref}} \right] \left[ \frac{p_{O_2}}{p_{ref}} \right]^{\frac{1}{2}}$ .

$p_{H_2}$ : Presión  $H_2$  (bar).

$p_{O_2}$ : Presión  $O_2$  (bar).

$p_{ref}$ : Presión de referencia (bar).

### 2.7.1.2 Voltaje Termoneutro

Si la fase se encuentra en condiciones adiabáticas, la variación de entalpía de la reacción ( $\Delta H$ ) requiere ser otorgada por medio de la corriente eléctrica brindándonos como resultado la ecuación 10 (SÁNCHEZ, 2019):

$$E_{tn} = \frac{\Delta H}{zF} \Rightarrow E_{tn}^{\circ} = \frac{\Delta H^{\circ}}{zF} = 1.48 V \quad (10)$$

Dónde:

$E_{tn}$ : Voltaje termoneutro.

$E_{tn}^\circ$ : Voltaje termoneutro a condiciones estándar.

$\Delta H$  = Variación de entalpía.

$\Delta H^\circ$  = Variación de entalpía a condiciones estándar ( $286.43 \frac{kJ}{mol}$ ).

$z$ : Numero de electrones de intercambio.

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

### 2.7.1.3 Sobrevoltaje Óhmico

El sobrevoltaje óhmico está asociado con la resistencia de los materiales al flujo de protones, y la cantidad de pérdidas óhmicas está determinada por las propiedades de estos materiales. Las técnicas y procesos de fabricación juegan un papel crucial en la disminución de este sobrepotencial. Se puede utilizar la ley de Ohm en la ecuación 11 (LEFRANC, 2021):

$$\eta_{ohm} = R_{el}i \Rightarrow \eta_{ohm} = \frac{\delta_m}{\sigma_m} i_{cell} \quad (11)$$

Dónde:

$\eta_{ohm}$ : Sobrevoltaje óhmico (V).

$i$ : Densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>).

$R_{el}$ : Resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).

$\delta_m$ : Espesor de la membrana (cm).

$\sigma_m$ : Conductividad del material (S/cm).

$i_{cell}$ : Densidad de corriente de la celda (A/cm<sup>2</sup>).

### 2.7.1.4 Sobrevoltaje de Activación

El sobrevoltaje de activación ( $\eta_{act}$ ) se requiere para las pérdidas dadas en los electrodos para activar e iniciar las reacciones electroquímicas en la celda para la cual se utiliza la ecuación de Butler-Volmer descrita en

función a la densidad de corriente, la cual está expresada en las ecuaciones 12 y 13 (MA, et al., 2021):

$$\eta_{act}^A = \left(\frac{RT}{zF}\right) \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_{0,OER}}\right) \quad (12)$$

$$\eta_{act}^C = \left(\frac{RT}{zF}\right) \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_{0,HER}}\right) \quad (13)$$

Dónde:

$\eta_{act}^A$ : Sobrevoltaje de activación ánodo.

$\eta_{act}^C$ : Sobrevoltaje de activación cátodo.

$R$ : Constante de los gases ideales.

$T$ : Temperatura del sistema en Kelvin (K).

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

$z$ : Numero de electrones de intercambio.

$i$ : Densidad de corriente actual (mA/cm<sup>2</sup>).

$i_0$ : Densidad de corriente de intercambio, que es una medida de la actividad electroquímica la cual se expresa con las ecuaciones 14 y 15 (MA, et al., 2021).

$$i_{0,OER} = 2.83792 \times 10^{-7} \exp \left( -\frac{28920.95}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{303.15} \right) \right) \quad (14)$$

$$i_{0,HER} = 2.15 \times 10^{-2} \exp \left( -\frac{17000}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{303.15} \right) \right) \quad (15)$$

#### 2.7.1.5 Sobrevoltaje de Difusión

La contribución al proceso de difusión se origina debido a las diferencias en la actividad del agua a través de la membrana. El movimiento difusivo del agua, desde el ánodo hacia el electrodo catódico, se halla utilizando las ecuaciones respectivas para cada situación dependiendo el ánodo (ecuación 16) o el cátodo (ecuación 17) (MA, y otros, 2021), (LEFRANC, 2021):

$$\eta_{diff}^A = \left| \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^0} \right) \right| \quad (16)$$

$$\eta_{diff}^C = \left| \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^0} \right) \right| \quad (17)$$

Dónde:

$\eta_{diff}^A$ : Sobrevoltaje de difusión ánodo.

$\eta_{diff}^C$ : Sobrevoltaje de difusión cátodo.

$R$ : Constante de los gases ideales.

$T$ : Temperatura en grados Kelvin.

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

$z$ : Numero de electrones de intercambio

$C_{O_2}$ : Concentración de  $O_2$ .

$C_{H_2}$ : Concentración de  $H_2$ .

$C_{O_2}^0$ : Concentración inicial de  $O_2$ .

$C_{H_2}^0$ : Concentración inicial de  $H_2$ .

- Los valores de  $C_{O_2}$  y  $C_{H_2}$  se hallan utilizando la ecuación 18:

$$C_{esp} = p_{esp}(RT)^{-1} \quad (18)$$

$C_{esp}$ : Concentración de especies.

$p_{esp}$ : Presión a la que se encuentra sometida las especies.

$R$ : Constante de los gases ideales.

$T$ : Temperatura en grados Kelvin.

#### 2.7.1.6 Voltaje Total

El voltaje total requerido de un electrolizador se considera la suma del voltaje reversible y los sobrevoltajes requeridos para que la reacción de división de las moléculas de agua de inicio, para hallar este voltaje se utiliza la ecuación 19 (HERNÁNDEZ-GÓMEZ, y otros, 2020):

$$E_{cell} = E_{rev} + \eta_{ohm} + \eta_{act}^A + \eta_{act}^C + \eta_{diff}^A + \eta_{diff}^C \quad (19)$$

Dónde

$E_{cell}$ : Voltaje de celda.

$E_{rev}$ : Voltaje reversible.

$\eta_{ohm}$ : Sobrevoltaje óhmico.

$\eta_{diff}^A$ : Sobrevoltaje de difusión ánodo.

$\eta_{diff}^A$ : Sobrevoltaje de difusión ánodo.

$\eta_{diff}^C$ : Sobrevoltaje de difusión cátodo.

### 2.7.2 Producción de hidrógeno

El flujo molar de  $H_2$  se encuentra relacionada directamente proporcional a la intensidad de corriente, el hidrógeno obtenido se calcula con la ecuación 20 (SÁNCHEZ, 2019):

$$\dot{N}_{H_2} = \left(\frac{M}{zF}\right) I \quad (20)$$

Dónde:

$\dot{N}_{H_2}$ : flujo másico de  $H_2$  generado en el electrolizador (g/s).

$M$ : Masa molar del hidrógeno.

$z$ : Numero de electrones de intercambio.

$F$ : Constante de Faraday (96485 C/mol).

$I$ : Intensidad de corriente en Amperios.

### 2.7.3 Eficiencia

Esta se puede definir como la fracción entre la potencia producida en forma de hidrógeno  $P_{H_2}$  (ecuación 22) y la potencia eléctrica  $P_{elec}$  (ecuación 23) la cual se expresa en la ecuación 21, (CAPARRÓS MANCERA, y otros, 2020):

$$\eta = \frac{P_{H_2}}{P_{elec}} 100\% \quad (21)$$

$$P_{H_2} = \dot{N}_{H_2} H V_{H_2} \quad (22)$$

$$P_{elec} = IE_{cell} \quad (23)$$

Dónde:

$\eta$ : Eficiencia

$P_{H_2}$ : Potencia obtenida del  $H_2$

$P_{elec}$ : Potencia eléctrica

$HV_{H_2}$ : Poder calorífico del  $H_2$ (LHV,HHV)

$\dot{N}_{H_2}$ : flujo másico de  $H_2$  generado en el electrolizador (kg/s).

$E_{cell}$ : Voltaje de celda.

$I$ : Intensidad de corriente en Amperios.

## 2.8 Componentes de un Electrolizador PEM

### 2.8.1 Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

La membrana de intercambio protónico (PEM) es fundamental en los electrolizadores PEM, simplificando el paso de protones del ánodo al cátodo mientras aísla eléctricamente ambos electrodos. Esto asegura que la reacción de producción de hidrógeno y oxígeno ocurran de manera separada. Las PEM están comúnmente fabricadas con materiales de ácido sulfónico perfluorado, como Nafion®, reconocido por su conductividad y durabilidad bajo condiciones operativas (Liu, y otros, 2023) se han realizado estudios experimentales con el Nafion® 117 el cual nos permite conocer la conductividad específica de este material con la ecuación 24 (MA, y otros, 2021).

$$\sigma_{mem} = (5.139\lambda_{mem} - 3.26) \exp\left(1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (24)$$

Dónde:

$\sigma_{mem}$ : Conductividad de la membrana.

$\lambda_{mem}$ : Contenido de agua en la membrana.

$R$ : Constante de los gases ideales.

$T$ : Temperatura en grados Kelvin.

- El contenido de agua en la membrana se estima con las ecuaciones 25 y 26 (LEFRANC, 2021):

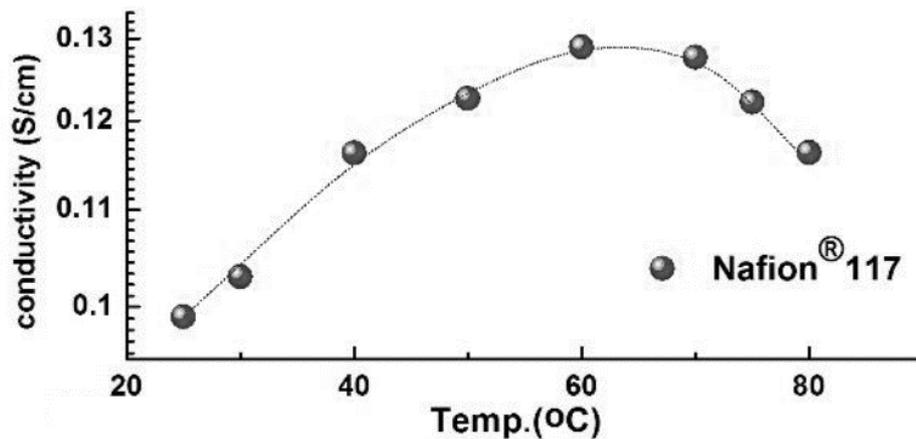
$$\lambda_{mem} = 0,043 + 17,81a - 39,85a^2 + 36a^3 \quad \text{donde } 0 < a \leq 1 \quad (25)$$

$$\lambda_{mem} = 14 + 1,4(a - 1) \quad \text{donde } 1 < a \leq 3 \quad (26)$$

Dónde:

$a$ : Actividad del agua.

La figura 5 nos indica la conductividad con respecto a la temperatura obtenida de manera experimental indicándonos el comportamiento del material Nafion® 117 (AVRAMOV, y otros, 2016).



*Figura 5 Conductividad del Nafion® 117 con respecto a la temperatura mediciones experimentales (AVRAMOV, y otros, 2016)*

De la figura anterior la cual describe la evolución de la conductividad de la membrana con respecto a la temperatura observamos que la conductividad del Nafion® posee un incremento con respecto a la temperatura hasta los 60 °C los cuales a partir de este punto la conductividad comienza a descender y obtenemos los valores expresados en la siguiente

## 2.8.2 Capas de Difusión de Gases (GDL)

En los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM), las capas de difusión de gas (GDL, siglas en inglés) son componentes esenciales que facilitan el transporte de reactivos y productos entre el electrolito y los electrodos. Estas capas ayudan a distribuir uniformemente los gases reactivos sobre la superficie del catalizador y a evacuar eficientemente los productos gaseosos. Además, las GDL también actúan como conductores eléctricos y térmicos, proporcionando soporte estructural al sistema. Los materiales comúnmente utilizados para fabricar las GDL incluyen fibras de carbono y papeles de carbono, que son impregnados con PTFE (politetrafluoroetileno) para aumentar su hidrofobicidad y así evitar la inundación de los poros con agua. Las GDL pueden también incorporar capas micro porosas (MPL) que mejoran el contacto eléctrico entre la capa de difusión de gas y el catalizador, y optimizan la gestión del agua al facilitar su transporte dentro y fuera de la capa. (AHMED, y otros, 2022).

### 2.8.3 Catalizadores

Los catalizadores son parte fundamental de los electrolizadores PEM, hoy en día se utilizan catalizadores de óxidos de iridio ( $\text{IrO}_2$ ) y rutenio ( $\text{RuO}_2$ ) en la reacción de evolución de oxígeno (OER) debido a su alta actividad y estabilidad en ambientes ácidos, a pesar de su alto costo. Para la reacción de evolución de hidrógeno (HER), se emplea catalizadores basados en platino (Pt) soportados en carbono para maximizar su superficie activa y mejorar la eficiencia. Se adoptan nuevas técnicas avanzadas de síntesis, como la deposición electroquímica y el uso de nanomateriales con estructuras de núcleo-corteza, para optimizar la dispersión y reducir la cantidad de catalizadores necesarios, disminuyendo así los costos. Esto mejora la integración de estos catalizadores con las capas de difusión de gas (GDL) para asegurar un mejor contacto eléctrico y una eficiente gestión del agua (AHMED, et al., 2022).

### 2.8.4 Placas Bipolares

Las placas bipolares son elementos fundamentales en los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) y cumplen varias funciones cruciales. Estas placas se encargan de distribuir uniformemente los gases y líquidos dentro de las celdas, facilitar el flujo de corriente eléctrica entre ellas y proporcionar soporte mecánico a toda la estructura del electrolizador. Generalmente, se fabrican con materiales conductores como grafito o metales recubiertos, que deben ser resistentes a la corrosión en el ambiente ácido de la celda. Además, las placas bipolares ayudan en la gestión térmica del sistema, manteniendo una temperatura constante y adecuada para el funcionamiento del electrolizador. La eficiencia y la durabilidad de un electrolizador PEM dependen en gran medida de las características y la calidad de fabricación de estas placas. (AHMED, et al., 2022).

## 2.9 Almacenamiento Del Hidrógeno

- En cuanto al almacenamiento de hidrógeno, el método más idóneo es el sistema sólido-gas reversible utilizando hidruros metálicos, que se caracterizan por su capacidad volumétrica y son especialmente relevantes en aplicaciones estacionarias. Investigaciones recientes, como las llevadas a cabo en el proyecto COSY de Europa y los grupos Nano Mat Micro del Instituto de Ciencias de Materiales de Sevilla, han señalado la eficacia de utilizar hidruros metálicos ligeros (como el  $MgH_2$ ) y complejos (como el  $LiBH_4$ ) junto con el concepto de "composites de hidruro reactivo". Estos sistemas de reversión han sido desarrollados con contribuciones importantes de estos grupos, que han comprendido el papel de los aditivos catalíticos en la mejora de la cinética de carga y descarga, aspecto crucial en el desarrollo de tanques de almacenamiento de hidruros. Además, los grupos de control del IRI han realizado varias investigaciones sobre la modelización de los procesos de absorción y desorción en cilindros de hidruros metálicos. A partir de estos modelos, se trabaja actualmente en el diseño de estimaciones de las cantidades de

hidrógeno restantes en sistemas de hidruros metálicos. (CHICA NUÑEZ, y otros, 2020).

Bajo el enfoque termodinámico, la compresión real del hidrógeno se encuentra en algún lugar intermedio entre las condiciones de compresión isotérmica (a temperatura constante) e isentrópica (adiabática, sin transferencia de calor), que simbolizan los puntos inferior y superior del trabajo en el proceso de compresión. Para aplicaciones prácticas, el hidrógeno no sigue un proceso isotérmico, isentrópico o adiabático. Las predicciones basadas en los dos supuestos mencionados anteriormente se sitúan en un punto intermedio entre el trabajo real necesario para la compresión. La ruta politrópica reversible utiliza la termodinámica para abordar este proceso de manera más precisa. La refrigeración del gas durante el proceso de compresión es un método efectivo para disminuir el trabajo necesario en la compresión de hidrógeno. Esto es debido a que la refrigeración mejora la eficiencia del compresor al reducir el volumen del hidrógeno de manera natural. Como resultado, la compresión en varias etapas funciona mejor que comprimir el gas en una etapa porque un intercooler puede enfriar el gas entre etapas. Después de cada etapa de compresión, el gas requiere regresar a la temperatura inicial para lograr un enfriamiento óptimo (SILVA, 2021).

El almacenamiento de hidrógeno es una de las áreas más avanzadas en la cadena de valor, principalmente debido a su amplio uso en las industrias químicas y petroquímicas. Sin embargo, la mayor parte del hidrógeno utilizado por estas industrias se produce de manera centralizada cerca de sus lugares de consumo y según la demanda, lo que resalta la necesidad de desarrollar tecnologías que equiparen la capacidad actual de almacenamiento con el esperado aumento futuro de la demanda. Aprovechar la infraestructura existente en lugar de crear una nueva economía o infraestructura desde cero representa un enfoque de economía circular que también contribuye al objetivo de cero emisiones (FERNANDEZ, 2023).

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tipo y Diseño de Investigación**

Se abordó la metodología utilizada en la investigación, comenzando con la explicación del tipo y diseño de esta.

##### **3.1.1 Tipo de Investigación**

Aplicada. Esta investigación buscó resolver un problema práctico y relevante en el ámbito industrial y comercial, desarrollando una tecnología viable para la producción de hidrógeno verde

##### **3.1.2 Diseño de Investigación**

Cuasiexperimental. El estudio se centrará en el diseño, simulación y análisis de un electrolizador, permitiendo la manipulación de variables y la observación de los resultados en un entorno controlado.

La elección de la investigación se enfocó en la necesidad de realizar la validación de cálculos para la futura implementación del diseño de un electrolizador. Este tipo de investigación facilita la aplicación directa de los resultados en la industria y en la sociedad.

Dentro del diseño cuasiexperimental, se incluyen elementos como la manipulación de variables y la medición de resultados en un entorno controlado. Esto garantiza que las observaciones sean confiables y reproducibles, lo que es esencial para alcanzar conclusiones válidas.

Entre las ventajas del diseño se destacó la capacidad de controlar y manipular las variables de interés, lo que proporciona una mayor precisión en la obtención de resultados. Además, permite evaluar relaciones causa-efecto y establecer patrones de comportamiento.

Sin embargo, el diseño cuasiexperimental también tiene sus desventajas, como la posible limitación en la generalización de los resultados a situaciones fuera del entorno controlado. Además, puede requerir recursos significativos en términos de tiempo y equipamiento.

### 3.2 Variables y Operacionalización

Las variables que se estudiaron son cruciales para comprender el rendimiento del electrolizador.

- Variable Independiente

El agua y energía eléctrica proveniente de planta eólica.

- Variable Dependiente

Electrolizador diseñado para funcionamiento en Puerto Malabrigo.

Operacionalización:

La operacionalización de las variables en esta investigación se centró en definir los componentes y parámetros del electrolizador según la literatura, así como los resultados esperados en términos de eficiencia y producción de hidrógeno.

### 3.3 Población, Muestra y Muestreo

La población de estudio está integrada por el electrolizador diseñado para la generación de hidrógeno, como lo es en los países de Estados Unidos, España y Chile.

La muestra para considerar consistió en el electrolizador diseñado.

Se empleó un muestreo intencional o por conveniencia del investigador, seleccionando un diseño específico basado en criterios de relevancia y viabilidad para el análisis detallado, Este método facilita una investigación exhaustiva sobre el desempeño y la eficiencia del diseño del electrolizador, ofreciendo datos importantes para validar y optimizar el modelo.

### 3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La metodología de recolección de datos empleada en la presente tesis fue análisis documental. Esta técnica, recopila datos e información de varias fuentes de información y se comparó verificando la veracidad de los datos.

### 3.5 Procedimientos

Se realizó un análisis comparativo de las fuentes de investigación teniendo en cuenta los avances tecnológicos hallados en bases de datos de calidad científica y se realizó un análisis comparativo de las tecnologías de electrólisis más relevantes hoy en día.

Se aplicó las ecuaciones descritas en la literatura halladas en las bases de datos para el modelado matemático y su posterior aplicación en el proceso de modelamiento y simulación del electrolizador.

Con la obtención de los valores de el modelado matemático se definió las condiciones de operación para la simulación de un electrolizador PEM en ANSYS 2024 R1.

### 3.6 Aspectos Éticos

El proyecto de investigación "Diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en la localidad de Puerto Malabrigo" se desarrolló con citas de fuentes indexadas, referencias bibliográficas confiables y de rigor científico, siguiendo los alineamientos de la Universidad César Vallejo con formato de bibliografías citadas en ISO 690.

La tesis "Diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en la localidad de Puerto Malabrigo" se elaboró respetando los derechos de propiedad intelectual de los autores citados.

Como aspectos éticos la presente tesis consideró el citar y/o referenciar respectivamente a las fuentes de información las cuales se utilizaron como ideas, respetando los derechos de autor.

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Análisis Comparativo de Tecnologías de Electrólisis

Tipo de Electrólisis	Alcalina	PEM	SOEC
Autores	(SÁNCHEZ, 2019); (PINSKY, y otros, 2024); (BRAUNS, y otros, 2020); (RASHID, y otros, 2015)	(HERNÁNDEZ-GÓMEZ, y otros, 2020); (PINSKY, y otros, 2024); (AHMED, y otros, 2022); (Falcão, y otros, 2020); (LIM, y otros, 2023)	(LAMY, 2016); (PINSKY, y otros, 2024); (ZHENG, y otros, 2021);
Materiales	Aluminio, platino, teflón, níquel, grafito, teflón, entre otros.	Platino, iridio, rodio y óxidos de estos materiales, titanio, nafion.	Manganita, zirconia, níquel, aleaciones de cromo y hierro, aluminio.
Impacto ambiental	Moderado, manejo de cáusticos	Bajo, eficiencia y materiales duraderos bajos contaminantes.	Moderado, producción de cerámicos.
Eficiencia %	62-82	67-82	80 - 110
Voltajes (V)	1.8 – 2.4	1.8 – 2.2	1.48
Temperaturas (°C)	40-90	20-100	700-1000

*Tabla 3 tabla comparativa de tecnologías de electrólisis*

#### - Electrólisis Alcalina (AE)

Es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales a gran escala. Es

una tecnología madura y bien establecida.

Desventajas: El manejo de electrolitos cáusticos y la necesidad de mantenimiento frecuente son desventajas significativas. Además, la eficiencia es moderada comparada con otras tecnologías.

- Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)

Ventajas: Ofrece ventajas en términos de eficiencia y pureza del hidrógeno. Es ideal para aplicaciones que requieren alta pureza y rápida respuesta, como en vehículos de celdas de combustible.

Desventajas: Los costos elevados de los materiales y la necesidad de catalizadores de metales preciosos limitan su uso a gran escala.

- Electrólisis de Óxidos Sólidos (SOEC)

Ventajas: Destaca por su alta eficiencia y su capacidad para integrarse con procesos industriales de alta temperatura, aprovechando el calor residual.

Desventajas: Los costos y la durabilidad de los materiales cerámicos son desafíos por superar. La producción de materiales cerámicos puede ser intensiva en energía.

#### 4.2 Cálculo de Voltaje Reversible

En la ecuación 8 se evaluó la ecuación con varios valores de cociente de reacción logramos visualizar en la figura 6 la curva de voltaje reversible con respecto a los valores del cociente de reacción encontrándose a diferentes temperaturas de operación:

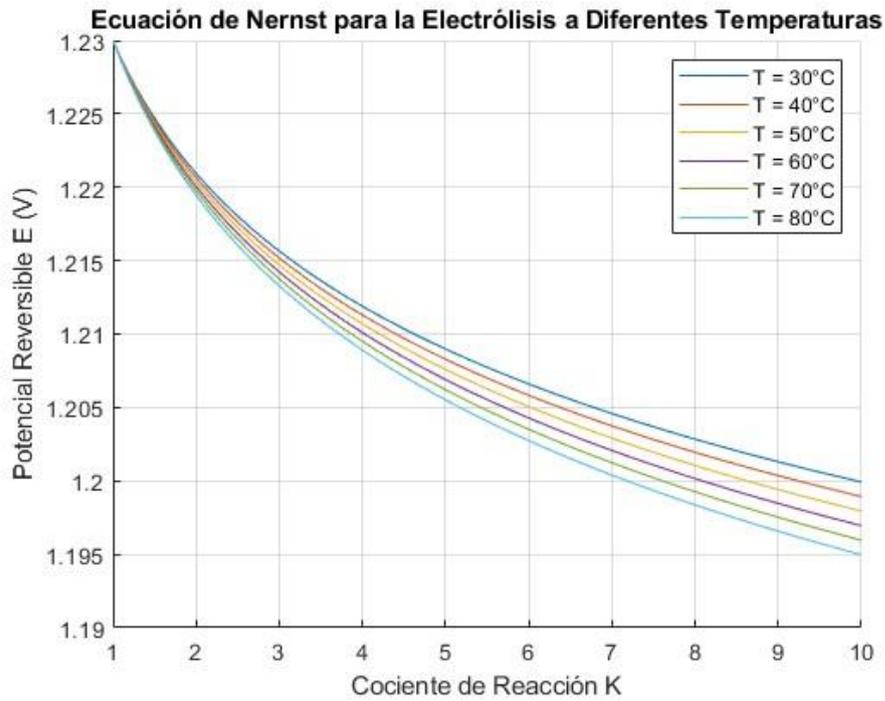


Figura 6 Ecuación Nernst para calculo voltaje reversible

#### 4.3 Cálculo de Sobrevoltaje Óhmico

Se realizó los cálculos de  $\lambda_{mem}$  con respecto a la ecuación 25 observamos en la figura 7 como  $\lambda_{mem}$  incrementa conforme incrementa  $a$ :

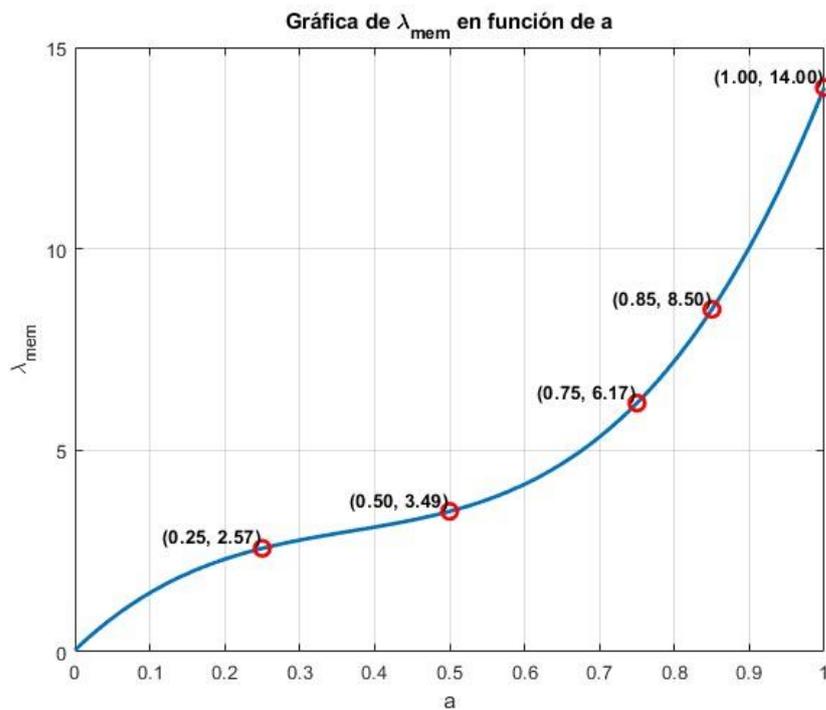


Figura 7 Curva  $\lambda_{mem}$  con respecto a "a"

Se requirió hallar la conductividad de la membrana la cual se aplicó en el cálculo del sobrevoltaje óhmico para efectos prácticos se evaluó con los resultados obtenidos en la figura 7 dependiendo la permeación de la membrana.

Donde los valores que se tomó para  $\lambda_{mem}$  en la membrana son:

$\lambda_{mem}$ : 2.57,3.49,6.17,8.5,14.

Con lo que remplazando los datos en la ecuación 24 con lo que se obtuvo la conductividad de la membrana a temperaturas de operación las cuales tienden a ser entre 60 a 90 grados centígrados por lo cual obtenemos la figura 8:

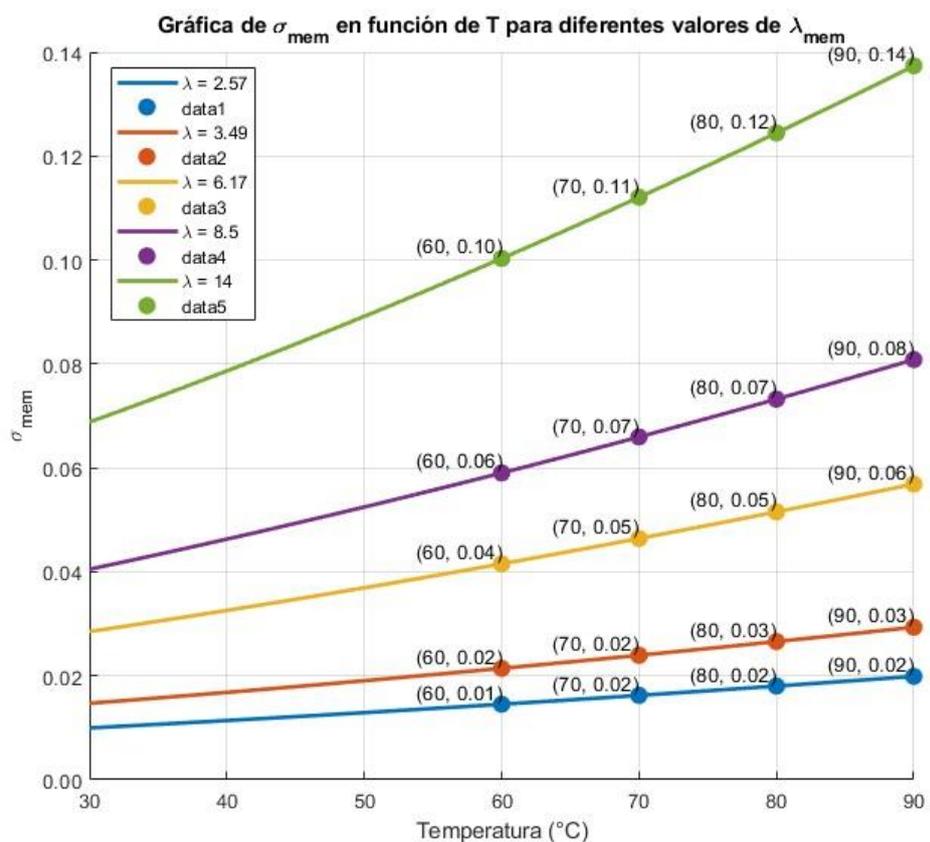


Figura 8 Conductividad de la membrana a diferentes valores de lambda

Se evaluó el sobrevoltaje óhmico a diferentes densidades de corriente y conductividad de la membrana lo que nos brinda la figura 9 :

Dónde:

$\eta_{ohm}$ : Sobrevoltaje óhmico (V).

$\delta_m$ : 0.0180 cm

$i_{cell}$ : Valores de 0 a 2.5 (A/cm<sup>2</sup>).

$\sigma_m$ : Conductividad del material

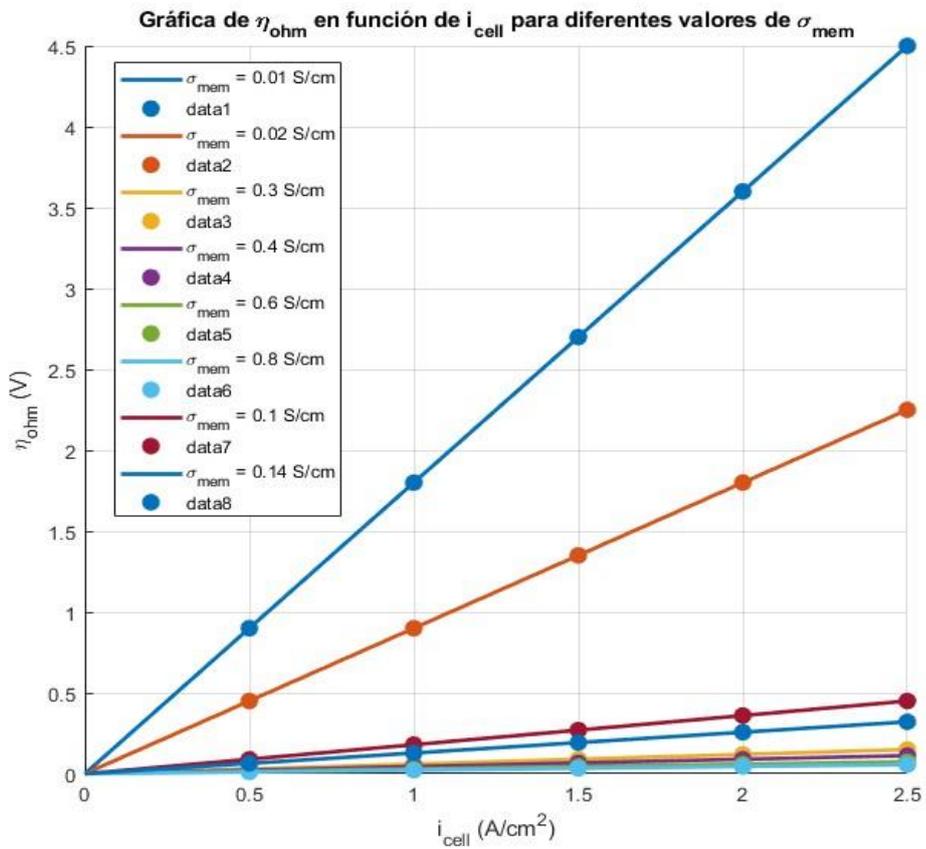


Figura 9 Sobrepotencial óhmico

Se observa en la figura 9 la relación existente entre el voltaje óhmico con respecto a la intensidad y el cómo la conductividad de la membrana afecta en al resultado de este, de la figura 9 obtenemos los siguientes valores los cuales fueron descritos en la tabla 4.

$\sigma_m$	$i_{cell}$	$\eta_{ohm}$
	0.5	0.9
	1	1.8

<b>0.01</b>	1.5	2.7
	2	3.6
	2.5	4.5
<b>0.02</b>	0.5	0.45
	1	0.9
	1.5	1.35
	2	1.8
	2.5	2.25
<b>0.3</b>	0.5	0.03
	1	0.06
	1.5	0.09
	2	0.12
	2.5	0.15
<b>0.4</b>	0.5	0.0225
	1	0.045
	1.5	0.0675
	2	0.09
	2.5	0.1125
<b>0.6</b>	0.5	0.015
	1	0.03
	1.5	0.045
	2	0.06
	2.5	0.075
<b>0.8</b>	0.5	0.0112
	1	0.0225
	1.5	0.0337
	2	0.045
	2.5	0.0562
<b>0.1</b>	0.5	0.09
	1	0.18
	1.5	0.27

	2	0.36
	2.5	0.45
<b>0.14</b>	0.5	0.0643
	1	0.1286
	1.5	0.1929
	2	0.2571
	2.5	0.3214

Tabla 4 Tabla resultados voltaje óhmico

#### 4.4 Cálculo de Sobrevoltaje de Activación

Para realizar el cálculo de el voltaje de activación se requirió los valores de  $i_{0,OER}$  e  $i_{0,HER}$  los cuales se expresan en la ecuación 14 y 15 las cuales evaluamos en la figura 10 a diferentes temperaturas para obtener sus curvas correspondientes:

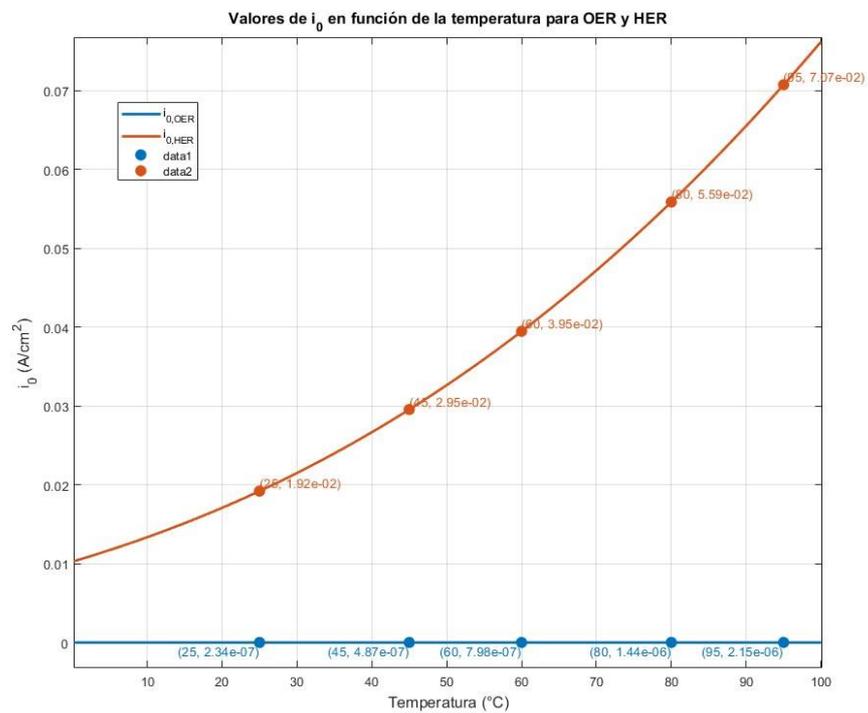
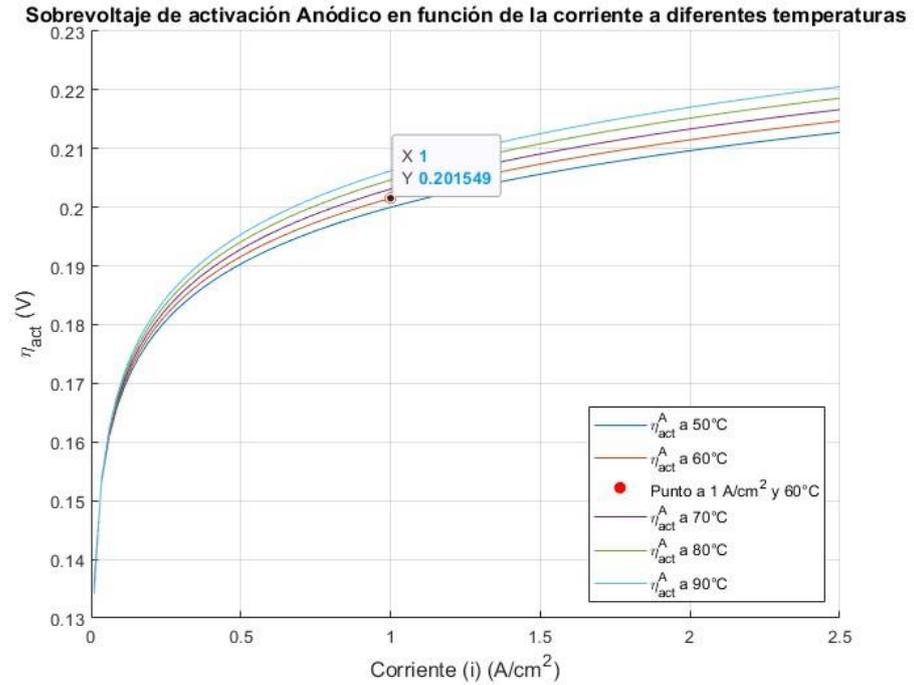


Figura 10 Valores  $i_0$  con respecto a la temperatura

Con los resultados obtenidos en la figura 10 de  $i_{0,OER}$  e  $i_{0,HER}$  aplicamos

estos valores para conocer el sobrevoltaje de activación dependiendo de la densidad de corriente aplicada en el electrolizador  $i$  el cual le corresponden valores de  $z = 4$  para el ánodo (figura 11) y  $z = 2$  para el cátodo (figura 12) donde se evalúa las figuras y se obtiene la tabla 5.



*Figura 11 Curva de sobrevoltaje de activación en el ánodo a diferentes densidades de corriente*

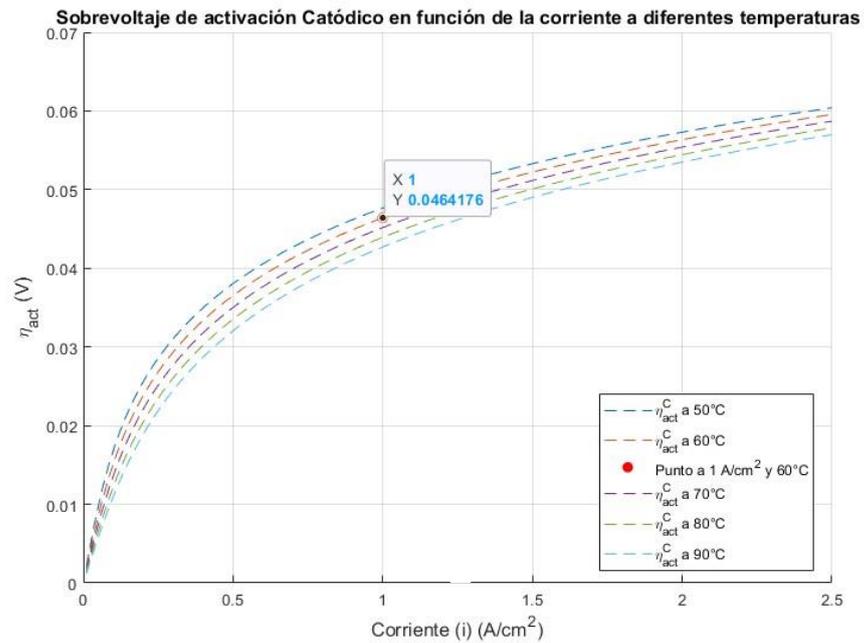


Figura 12 Curva de sobrevoltaje de activación en el cátodo a diferentes densidades de corriente.

Temperatura	Densidad de Corriente (A/cm <sup>2</sup> )	$\tilde{\eta}_{act}^A$ (V)	$\tilde{\eta}_{act}^C$ (V)
60	1	0.2015	0.0464
90	1	0.2062	0.0427

Tabla 5 Valores sobrevoltaje de activación

#### 4.5 Cálculo de Sobrevoltaje de Difusión

Para realizar el cálculo del sobrevoltaje de difusión requerimos la concentración de las especies la cual está definida por la ecuación 18 la cual actúa tanto para  $C_{O_2}$  y  $C_{H_2}$ , evaluando los diferentes parámetros de concentración y las presiones a las que se encuentran las especies obtenemos la figura 13:

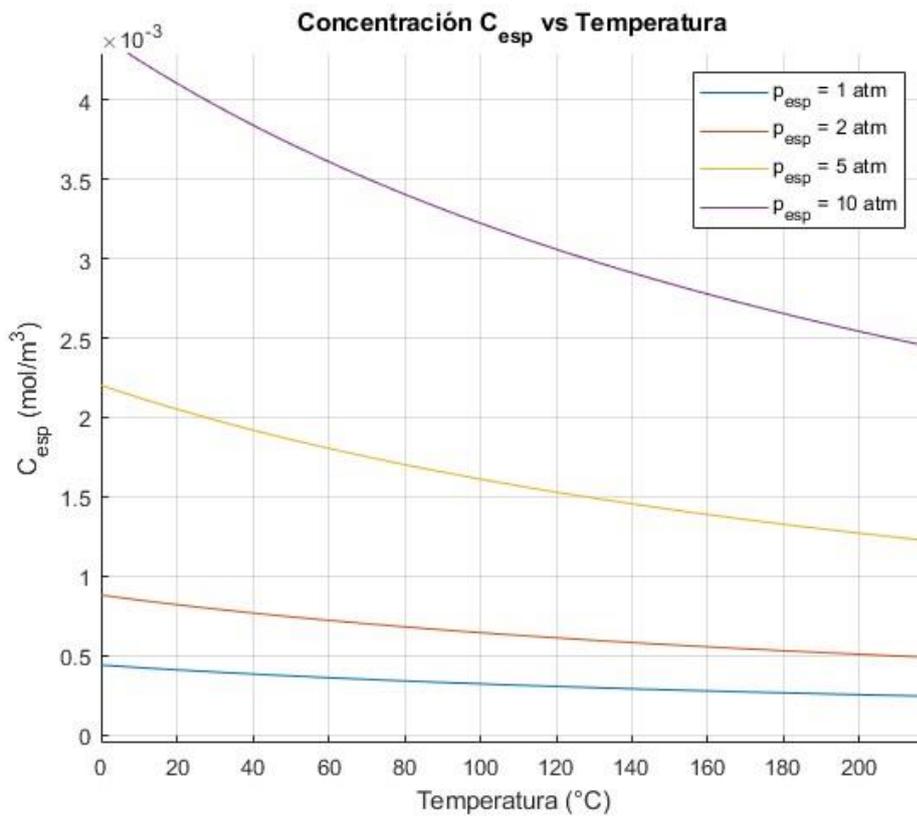


Figura 13 Concentración de especies con respecto a la temperatura a diferentes presiones de operación.

Reemplazamos los resultados de concentración de las especies obtenidas en la figura 13 para ser aplicados en las ecuaciones 16 y 17 lo que nos brinda la figura 14 y 15 respectivamente.

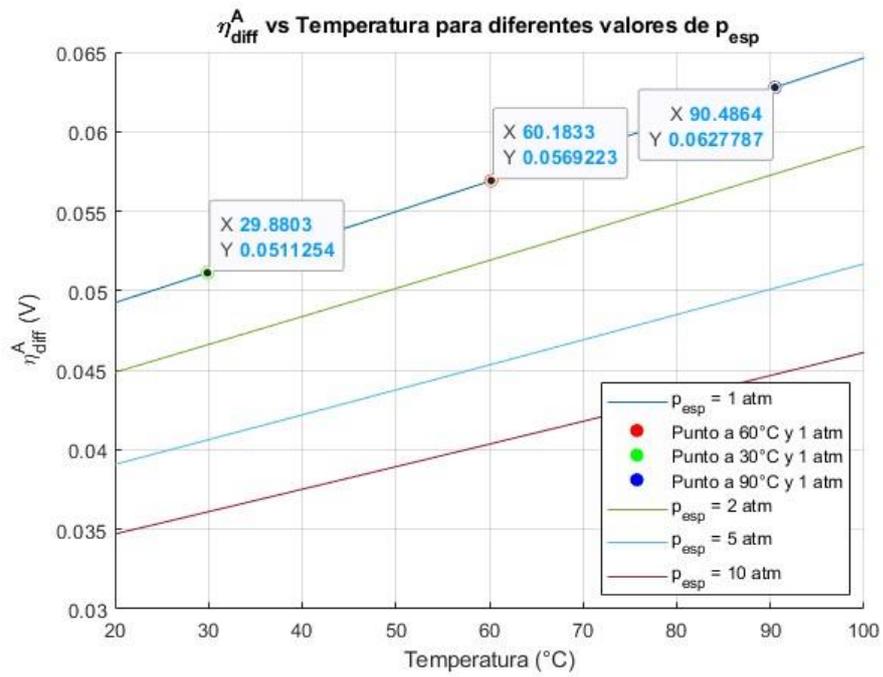


Figura 14 Sobrevoltaje de difusión en el ánodo con respecto a la temperatura

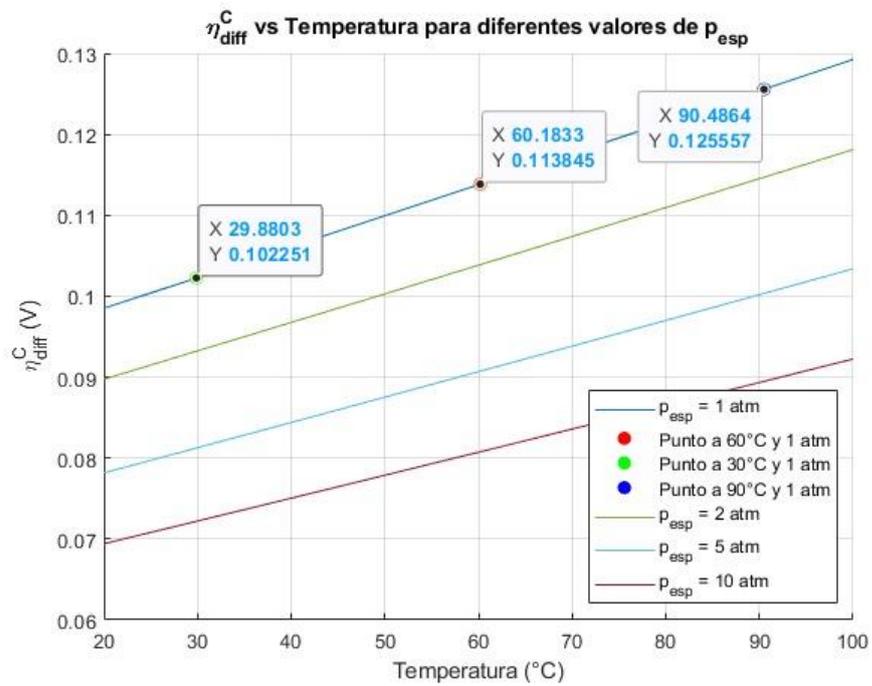


Figura 15 Sobrevoltaje de difusión en el ánodo con respecto a la temperatura

#### 4.6 Voltaje de celda

Se consideró que nuestro electrolizador tendrá una temperatura de operación de 60 y 90 grados centígrados debido a que es una temperatura considerada como el rango de temperatura de funcionamiento y que estará operando a presión atmosférica por lo que el cociente K es 0 para lo cual realizamos la suma aritmética de la ecuación 19 la cual nos indica el voltaje total requerido para generar la reacción:

$$E_{cell}^{60^{\circ}C} = 1.229 + 0.18 + 0.201549 + 0.0464176 + 0.0569223 + 0.113845$$

$$E_{cell}^{60^{\circ}C} = 1.8277 \text{ V}$$

$$E_{cell}^{90^{\circ}C} = 1.229 + 0.1286 + 0.2062 + 0.0427 + 0.0627 + 0.1255$$

$$E_{cell}^{90^{\circ}C} = 1.7947 \text{ V}$$

#### 4.7 Producción de Hidrógeno

La producción de hidrógeno se da por la ecuación número 20 la cual describe el flujo másico de hidrógeno producido y para la cual requerimos la intensidad de corriente para lo cual la figura número 16 nos indica la relación existente entre el flujo másico y la intensidad de operación del electrolizador.

$$\dot{N}_{H_2} = \left( \frac{2g/mol}{2 \times 96485C/mol} \right) I$$

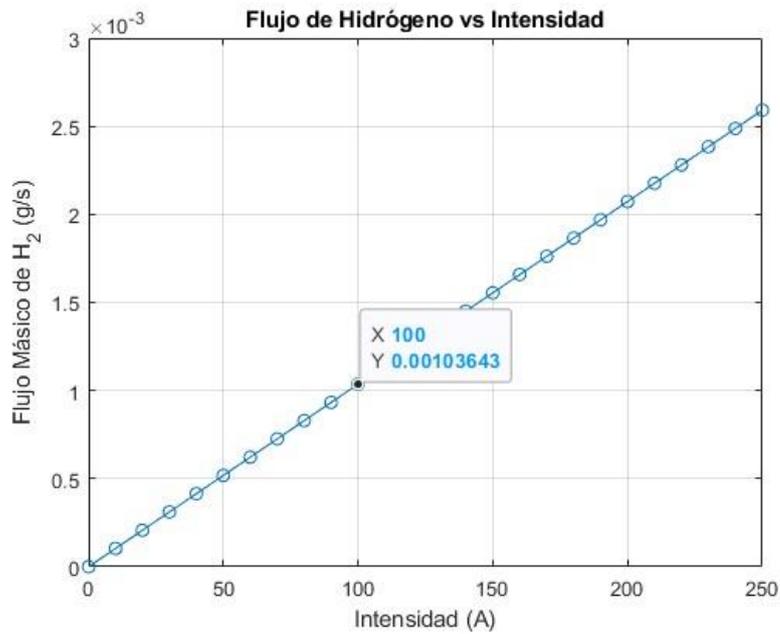


Figura 16 Flujo másico de hidrógeno con respecto a la temperatura aplicando la ecuación 19:

$$\dot{N}_{H_2} = \left( \frac{2 \text{ g/mol}}{2 (96485 \text{ C/mol})} \right) 100 \text{ A}$$

$$\dot{N}_{H_2} \approx 0.001036 \text{ g/s}$$

Para la cual se realiza un balance de masas con la ecuación 4 para obtener la cantidad de  $H_2O$  que se requiere para suplir la producción de hidrógeno sabiendo que:



Lo cual nos indica un flujo másico de 0.009324 g/s de  $H_2O$ .

#### 4.8 Eficiencia del Electrolizador

El cálculo de la eficiencia del electrolizador se puede expresar con la división del poder calorífico existente en la cantidad de hidrógeno producido y la potencia eléctrica inducida al electrolizador con la ecuación 21 y las ecuaciones 22 y 23 como desarrollo para el desarrollo de la ecuación 21.

Donde:

$$HHV: 141.6 \text{ MJ/kg} = 141.6 \text{ kJ/g}$$

$$LHV: 119.9 \text{ MJ/kg} = 119.9 \text{ kJ/g}$$

$$P_{H_2} = 0.001036 \text{ g/s } (HV_{H_2})$$

$$P_{elec, 60^\circ C} = 100 \text{ A}(1.8277 \text{ V})$$

$$P_{elec, 60^\circ C} = 182.77 \text{ W}$$

$$P_{elec, 90^\circ C} = 100 \text{ A}(1.7947 \text{ V})$$

$$P_{elec, 90^\circ C} = 179.47 \text{ W}$$

Evaluado la ecuación 22 a 60°C para HHV:

$$P_{H_2} = 0.001036 \text{ g/s } (141.6 \text{ kJ/g})$$

$$P_{H_2} = 146.8 \text{ W}$$

$$\eta_{HHV, 60^\circ C} = \frac{146.8 \text{ W}}{182.77 \text{ W}} 100$$

$$\eta_{HHV, 60^\circ C} \approx 80.34 \%$$

Evaluando la ecuación 23 a 60°C para LHV:

$$P_{H_2} = 0.001036 \text{ g/s } (119.9 \text{ kJ/g})$$

$$P_{H_2} = 124.2 \text{ W}$$

$$\eta_{LHV, 60^\circ C} = \frac{124.2 \text{ W}}{182.77 \text{ W}} 100$$

$$\eta_{LHV, 60^\circ C} \approx 67.97 \%$$

Evaluado la ecuación 22 a 90°C para HHV:

$$P_{H_2} = 0.001036 \text{ g/s } (141.6 \text{ kJ/g})$$

$$P_{H_2} = 146.8 \text{ W}$$

$$\eta_{HHV, 90^\circ C} = \frac{146.8 \text{ W}}{179.47 \text{ W}} 100$$

$$\eta_{HHV, 90^{\circ}C} \approx 81.79\%$$

Evaluando la ecuación 23 a 90°C para LHV:

$$P_{H_2} = 0.001036 \text{ g/s (119.9 kJ/g)}$$

$$P_{H_2} = 124.2 \text{ W}$$

$$\eta_{LHV, 90^{\circ}C} = \frac{124.2 \text{ W}}{179.47 \text{ W}} 100$$

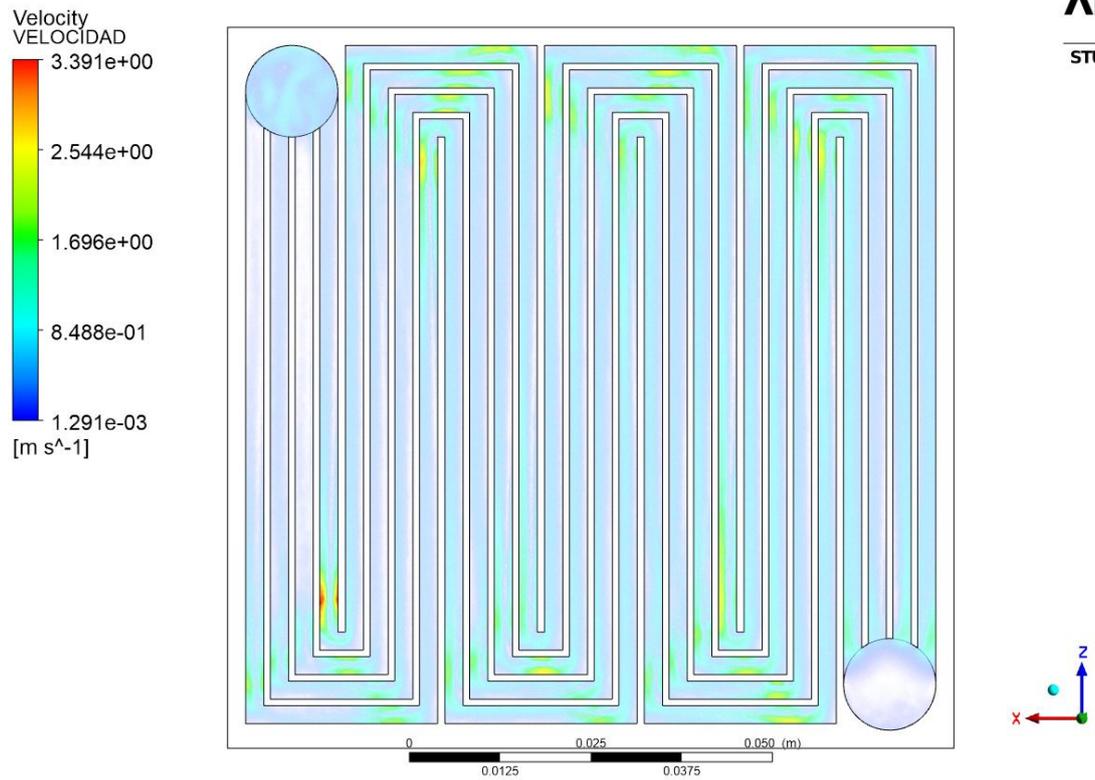
$$\eta_{LHV, 90^{\circ}C} \approx 69.2 \%$$

#### 4.9 Velocidad de Flujo en el Ánodo

Para la simulación en ANSYS 2024 R1 se utilizó los valores mostrados en la tabla número 6 los cuales fueron obtenidos por medio del modelamiento matemático, conociendo el flujo másico y los valores a utilizar en la simulación podemos observar en la figura 17:

Condiciones	Valores
Flow rate (kg/s)	9.324 e-6
Temperatura (K)	333.15
Gauge Pressure (outlet)	0.0
Voltaje (V)	1.82
Densidad de Corriente (A/m <sup>2</sup> )	10000

Tabla 6 condiciones de operación



*Figura 17 Velocidad de flujo en el ánodo*

Los valores obtenidos en la figura 17 y la escala de colores que se muestran en la figura representan la magnitud y la distribución espacial del fluido de ingreso en el electrolizador, los colores más cálidos (rojizos) indican velocidades más altas del fluido, mientras que los colores más fríos indican velocidades más bajas (azulados).

#### 4.10 Distribución de Presión

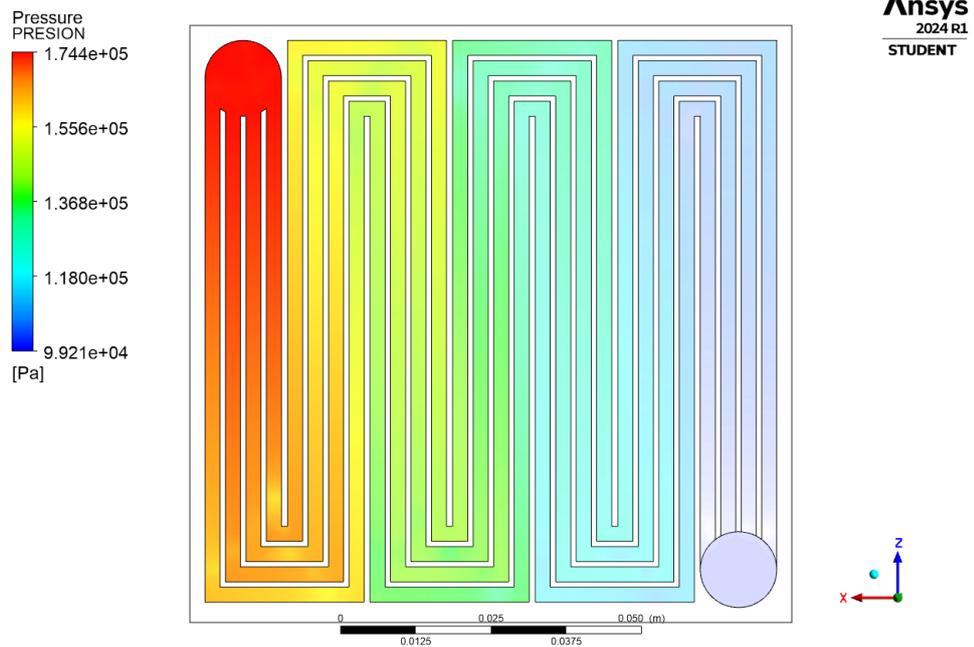


Figura 18 Distribución de presión

Tras la simulación obtenemos la figura 18 la cual nos muestra la distribución de presiones halladas en el electrolizador.

#### 4.11 Potencial Eléctrico

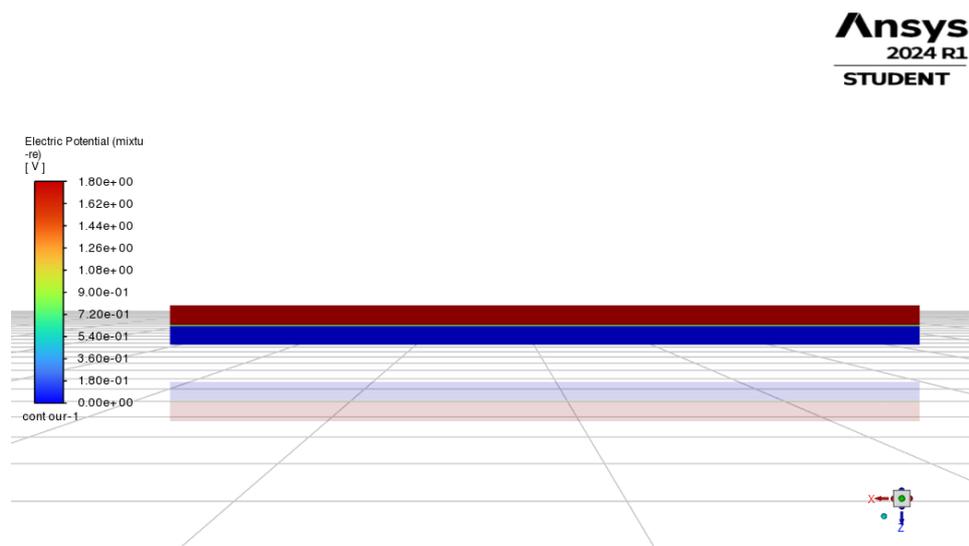


Figura 19 Potencial Eléctrico Electrolizador



Figura 20 Potencial Eléctrico en membrana

Tras la simulación se obtuvo la distribución del potencial eléctrico en el electrolizador. La alta concentración de potencial eléctrico en el ánodo nos confirma que la distribución de voltaje es consistente (figura 19), también logramos observar más a detalle como el potencial eléctrico se va disipando conforme nos vamos acercando al cátodo (figura 20).

#### 4.12 Fracción de Masa

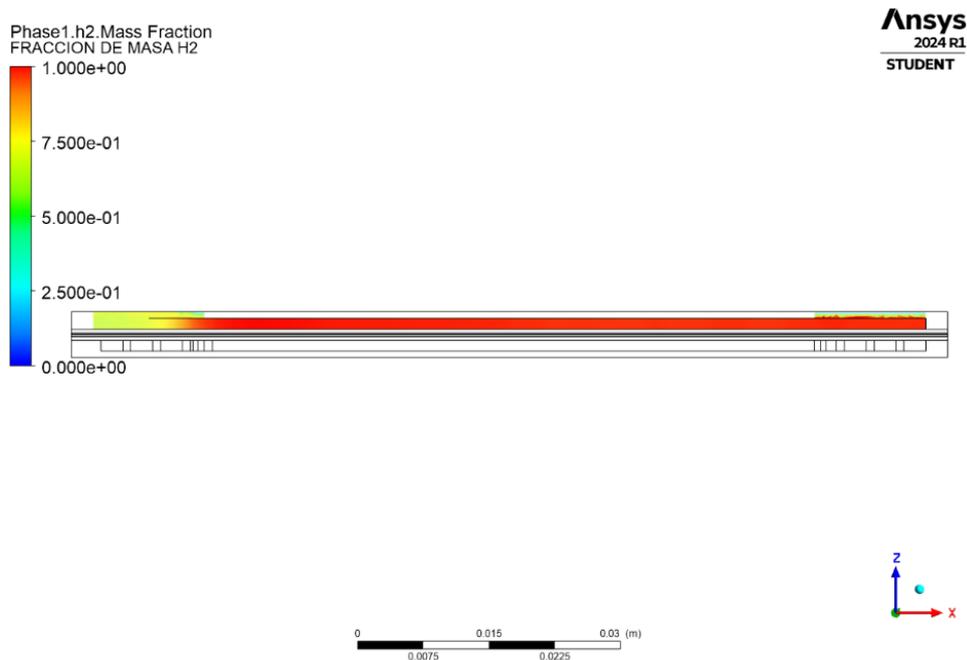
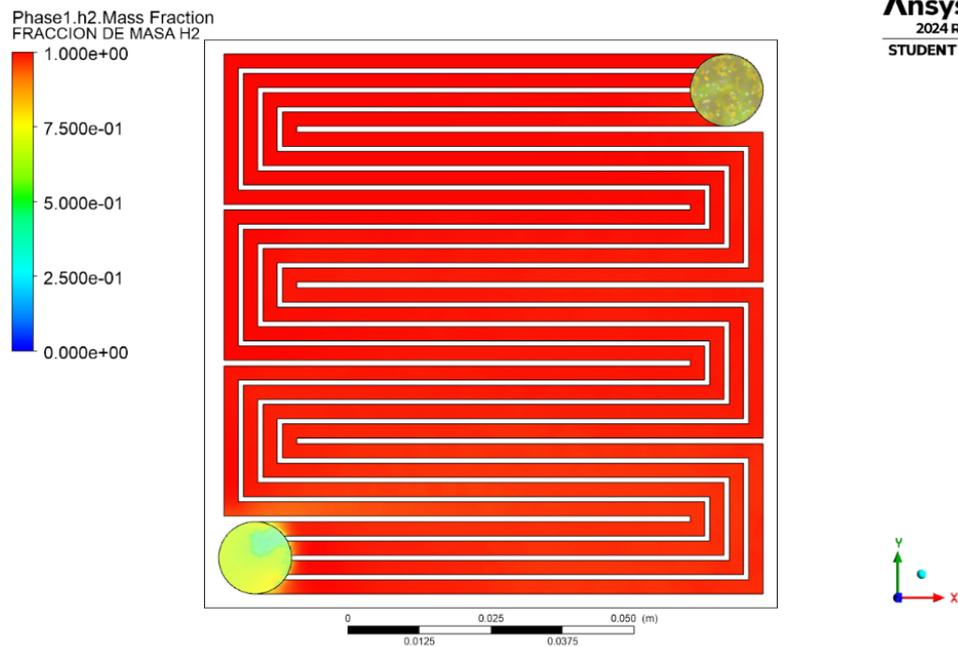


Figura 21 Fracción de masa  $H_2$  plano xz en el canal de flujo del cátodo.



*Figura 22 Fracción de masa  $H_2$  en canal de flujo plano xy cátodo*

El análisis del gráfico de fracción de masa de  $H_2$  revela la distribución de  $H_2$  en la región del cátodo, coincidiendo con el flujo de ingreso del agua y la ubicación de los electrodos. Esta distribución indica que el diseño del electrolizador facilita el transporte de las partículas de  $H_2$  hacia el cátodo a través de la membrana, promoviendo una producción de  $H_2$  en esta zona donde en la figura 21 se observa desde un ángulo lateral y la figura 22 nos muestra desde un ángulo frontal.

## V. DISCUSIÓN

El presente estudio sobre el diseño de un electrolizador para la producción de hidrógeno verde en Puerto Malabrigo ha proporcionado una serie de hallazgos y análisis que son críticos para entender y optimizar el rendimiento de esta tecnología en un contexto específico. A continuación, se detallan las principales discusiones derivadas de los resultados obtenidos.

Uno de los aspectos más relevantes observados es la relación entre la temperatura operativa del electrolizador PEM y su resistencia interna. Se encontró que la resistencia interna del electrolizador reduce a medida que la temperatura incrementa. Este fenómeno se debe a la mejora en la conductividad de la membrana a temperaturas más elevadas. La reducción de la resistencia interna con el aumento de la temperatura sugiere que operar a temperaturas moderadamente elevadas puede mejorar significativamente el rendimiento del electrolizador sin comprometer la estabilidad de los materiales. Este hallazgo es consistente con investigaciones previas.

El análisis del consumo de energía del electrolizador mostró que este aumenta con la densidad de corriente. Las mayores densidades de corriente están asociadas con incrementos en las pérdidas energéticas, tanto óhmicas como de activación. Este comportamiento es previsible según las teorías existentes y estudios anteriores que documentan un aumento en el consumo energético con la densidad de corriente. Por lo tanto, la optimización de la densidad de corriente es crucial para lograr un equilibrio entre la producción de hidrógeno y el consumo energético, asegurando un sistema eficiente y económicamente viable a largo plazo. En el contexto de Puerto Malabrigo, donde la demanda de energía puede variar, es esencial ajustar la densidad de corriente para optimizar la producción de hidrógeno según las necesidades específicas.

Los resultados también indicaron que el flujo de producción de hidrógeno

aumenta directamente con la intensidad. Esta relación positiva entre la densidad de corriente y la producción de hidrógeno es favorable para aplicaciones que requieren un ajuste rápido y flexible de la producción según la demanda energética. En una ciudad pesquera como Puerto Malabrigo, donde la demanda de energía puede fluctuar significativamente, la capacidad de incrementar rápidamente la producción de hidrógeno es una ventaja significativa. Esta flexibilidad operativa es crucial para satisfacer las necesidades energéticas variables y asegurar un suministro continuo de hidrógeno.

La distribución del potencial eléctrico dentro del electrolizador PEM fue uniforme, lo que indica una buena distribución de corriente y un funcionamiento eficiente del sistema. Una distribución uniforme del potencial no solo mejora la eficiencia, sino que también contribuye a la estabilidad operativa del electrolizador. Esto reduce el riesgo de puntos calientes y deterioro localizado de los materiales, asegurando un rendimiento óptimo y una mayor vida útil del electrolizador. La uniformidad en la distribución del potencial eléctrico es crucial para garantizar un rendimiento confiable y eficiente del sistema, los resultados obtenidos concuerdan con la teoría que la cual nos indica que los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango esperado como se puede observar en la tabla 7.

Parámetro	Resultados obtenidos a 60°C	Resultados obtenidos a 90°C	Resultados en la Literatura
Voltaje de operación (V)	1.8277	1.7953	1.8 – 2.2
Eficiencia %	68.81 - 81.33	69.2 - 81.79	62 - 82

*Tabla 7 comparativa de resultados*

La fracción de masa de hidrógeno producida fue alta, reflejando un

ingreso de eficiencia en la conversión de energía y un proceso de electrólisis eficaz. Este resultado es consistente con estudios previos que reportan que los electrolizadores PEM pueden alcanzar altas tasas de producción de hidrógeno con una alta fracción de masa. En el contexto de Puerto Malabrigo, una alta producción de hidrógeno puede ser utilizada para diversas aplicaciones energéticas, incluyendo la alimentación de equipos de pesca, sistemas de refrigeración y otras necesidades operativas. La alta fracción de masa de hidrógeno producida subraya la eficacia del diseño del electrolizador y su capacidad para satisfacer las demandas energéticas de manera eficiente.

La implementación del electrolizador diseñado en Puerto Malabrigo abonará significativamente a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en la región. El uso de energía eólica para alimentar el proceso de electrólisis asegura una fuente de energía limpia y sostenible, alineada con los objetivos globales de disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y mitigación del cambio climático. Este proyecto no solo mejora la disponibilidad de energía en la región, sino que también promueve el desarrollo económico y social, generando nuevas oportunidades económicas en sectores como la pesca y otras industrias locales.

La producción de hidrógeno verde en Puerto Malabrigo no solo mejora la disponibilidad de energía, sino que también genera nuevas oportunidades económicas y sociales. La implementación de esta tecnología puede impulsar el desarrollo de nuevas industrias y aliviar la calidad de vida de la población local. La producción de hidrógeno puede proporcionar una fuente de energía limpia y sostenible para una variedad de aplicaciones, desde la alimentación de equipos de pesca hasta el suministro de energía para sistemas de refrigeración y otros usos industriales. Además, la creación de empleos relacionados con la producción, distribución y utilización del hidrógeno puede tener un impacto positivo en la economía local.

Este proyecto representa un avance tecnológico importante en la adopción de tecnologías de energía limpia en la región. La optimización de los parámetros operativos y la selección de materiales adecuados aseguran un alto rendimiento y una mayor durabilidad del electrolizador. La adopción de tecnologías limpias y sostenibles es crucial para contraponer los desafíos del cambio climático y promover el desarrollo sostenible. La implementación exitosa de este proyecto puede servir como modelo para otras regiones y contribuir a la transición global hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

## **VI. CONCLUSIONES**

- Se realizó una revisión de las diferentes tecnologías de electrólisis, incluyendo la electrólisis alcalina, SOEC y PEM. La comparación se centró en aspectos como la eficiencia, las condiciones de funcionamiento y la adaptabilidad ambiental. Se determinó que la tecnología PEM es la más adecuada para las condiciones de Puerto Malabrigo debido a su alta eficiencia, baja demanda de mantenimiento y rápida respuesta operativa.
- Se llevaron a cabo cálculos para dimensionar el electrolizador. Se especificaron las condiciones operativas requeridas para asegurar un correcto funcionamiento y con un rendimiento eficiente del electrolizador.
- Se utilizó el software de Matlab para el modelado matemático de las ecuaciones de funcionamiento y ANSYS 2024 R1 para la simulación de el comportamiento del electrolizador. Los resultados de la simulación indicaron una distribución uniforme del potencial eléctrico, una alta fracción de masa, y adicionalmente nos brindaron la velocidad de ingreso del agua y la distribución de presión que esta presenta, estos resultados validaron el diseño propuesto y proporcionaron una base sólida para futuras implementaciones y optimizaciones.

## VII. RECOMENDACIONES

- Las recomendaciones derivadas del estudio son esenciales para maximizar la eficiencia y asegurar el éxito del proyecto de implementación del electrolizador en Puerto Malabrigo:
- Optimización de Parámetros Operativos: Es fundamental realizar pruebas experimentales para validar los resultados obtenidos en la simulación y comparar estos resultados con datos experimentales para garantizar la precisión y fiabilidad del modelo.
- Mejoras en la Infraestructura: Investigar el uso de nuevos materiales para los electrodos y la membrana que podrían ofrecer mejor rendimiento y mayor durabilidad. Materiales como el grafeno y nuevas aleaciones pueden ser de interés.
- Escalabilidad del Diseño: Evaluar la escalabilidad del diseño del electrolizador para aplicaciones comerciales o industriales. Considerar aspectos económicos y logísticos en la producción a gran escala.
- Financiación y Colaboraciones: Explorar oportunidades de financiación a través de subvenciones, fondos gubernamentales y asociaciones público-privadas para llevar adelante la investigación y el desarrollo del proyecto.
- Propiedad Intelectual: Garantizar que los beneficios del proyecto se compartan de manera equitativa y que los derechos de propiedad intelectual se protejan adecuadamente.
- Implementar estas recomendaciones permitirá mejorar la eficiencia del electrolizador y sujetar su viabilidad a largo plazo, contribuyendo de manera significativa al desarrollo sostenible de Puerto Malabrigo y su transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

## VIII. REFERENCIAS

**AHMED, Khaja Wahab, y otros. 2022.** Effect of Components and Operating Conditions on the Performance of PEM Electrolyzers: A Review. *MDPI*. [En línea] Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada, 23 de Septiembre de 2022. [Citado el: 29 de Mayo de 2024.] <https://doi.org/10.3390/electrochem3040040>.

**Asociación Peruana de Energías Renovables. 2022.** Comisión de Energía y Minas del Congreso de la República visita central eólica Cupisnique. SPR. [En línea] 02 de Septiembre de 2022. [Citado el: 17 de Julio de 2024.] <https://www.spr.pe/>.

**AVRAMOV, S.G., y otros. 2016.** *Comparative study on the proton conductivity of perfluorosulfonic and polybenzimidazole based polymer electrolyte membranes*. Sofía : Bulgarian Chemical Communications, 2016.

[https://www.researchgate.net/publication/327867252\\_Comparative\\_study\\_on\\_the\\_proton\\_conductivity\\_of\\_perfluorosulfonic\\_and\\_polybenzimidazole\\_based\\_polymer\\_electrolyte\\_membranes](https://www.researchgate.net/publication/327867252_Comparative_study_on_the_proton_conductivity_of_perfluorosulfonic_and_polybenzimidazole_based_polymer_electrolyte_membranes).

**BESSARABOV, Dmitri y Pierre, Millet. 2018.** *Pem Water Electrolysis*. Londres : s.n., 2018. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=UACqDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Pem+Water+Electrolysis&ots=NhMFXNyiEs&sig=A-5UJvgudS\\_fftNZX-IF-qCMdQY#v=onepage&q=Pem%20Water%20Electrolysis&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=UACqDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Pem+Water+Electrolysis&ots=NhMFXNyiEs&sig=A-5UJvgudS_fftNZX-IF-qCMdQY#v=onepage&q=Pem%20Water%20Electrolysis&f=false).

**BRAUNS, Jörn y TUREK, Thomas. 2020.** *Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review*. s.l. : MDPI, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8020248>.

**CANCINO SILVA, Renata Belén. 2021.** *Producción y almacenamiento hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en Chile*. Santiago, Chile : Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2021. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181631>.

**CAPARRÓS MANCERA, Julio José, y otros. 2020.** *An Optimized Balance of Plant for a Medium-Size PEM Electrolyzer: Design, Control and Physical Implementation.* s.l. : MDPI, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9050871>.

**CARAVANTES SAMAMÉ, Daniel Ángel y CARBAJAL MAURICIO, Juan Diego. 2023.** *Potencial de producción de H<sub>2</sub> verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura.* Piura : Universidad de Piura, 2023. <https://pirhua.udep.edu.pe/items/52eb8ea7-c20e-4ff1-86c7-44faffc95ad1>.

**CARRILLO, Jaime Duarte. 2023.** *Simulación de Sistemas de Generación de Hidrógeno.* Sevilla, España : s.n., 2023. <https://repositorio.uloyola.es/handle/20.500.12412/4272>.

**CEPAL. 2023.** *La energía en América Latina y el Caribe: acceso, renovabilidad y eficiencia.* Santiago : Cepal, 2023. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-cepal-11362-47924/Description>.

**CHICA NUÑEZ, Antonio y FERNANDEZ CARRETERO, Asunción. 2020.** *Tecnologías del Hidrógeno.* s.l. : Universidad de Rioja, 2020. págs. Pp 30-37. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8007616>.

**DOKHANI, Sepanta, ASSADI, Mohsen y POLLET, Bruno G. 2023.** *Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater.* 2023. págs. 9592-9608. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922055161>.

**Falcão, D.S. y Pinto A.M.F.R. 2020.** *A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners.* 2020. 0959-6526, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620312312>.

**FERNANDEZ, Adrian. 2023.** *Hidrógeno Verde y Almacenamiento Energetico: Estado del Arte.* 2023. <https://oa.upm.es/75295/>

**FURFARI, Samuel y CLERICI, Alessandro. 2021.** *Green hydrogen: the crucial performance of electrolyzers fed by variable and intermittent*

*renewable electricity*. s.l. : The European Physical Journal Plus, 2021. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01445-5>.

**H2 Perú. 2021.** *Potencial del Hidrógeno Verde*. [Documento] Perú : H2 Perú Asociación Peruana de Hidrógeno, 2021. [https://h2.pe/uploads/20210908\\_H2-Peru\\_Estudio-final.pdf](https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf)

**HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Ángel, y otros. 2020.** *Cell voltage static-dynamic modeling of a PEM electrolyzer based on adaptive*. [ARTICLE] Yucatán : Renewable Energy, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.106>.

**Houcheng, Zhang, y otros. 2012.** *Efficiency Calculation and Configuration Design of a PEM Electrolyzer System for Hydrogen Production*. 2012. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)19527-7](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)19527-7)

**INEI. 2018.** *Síntesis Metodológica N°9 Metodología y procedimientos estadísticos de estimación de la población total a nivel de provincias y distritos*. Lima : INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA, 2018.

**IRENA. 2023.** *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. [En línea] June de 2023. [Citado el: 20 de 04 de 2024.] [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA\\_World\\_energy\\_transitions\\_outlook\\_2023.pdf?rev=db3ca01ecb4a4ef8accb31d017934e97.978-92-9260-527-8](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf?rev=db3ca01ecb4a4ef8accb31d017934e97.978-92-9260-527-8).

**LAMY, Claude. 2016.** *From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.173>

**LEFRANC, Olivier. 2021.** *Développement d'un outil de conception de micro-réseaux énergétiques mixtes électricité/hydrogène : prise en compte de l'impact écologique par analyse de cycle de vie*. TOULOUSE : L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2021. <https://theses.hal.science/tel-04186359>.

**Liu, Rui-Ting, y otros. 2023.** *Recent advances in proton exchange membrane water electrolysis.* 2023.

**Loh, Adeline, y otros. 2023.** Design and Scale-Up of Zero-Gap AEM Water Electrolysers for Hydrogen Production. *MDPI*. [En línea] University of Exeter; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics; , 29 de Abril de 2023. [Citado el: 27 de Abril de 2024.] <https://doi.org/10.3390/hydrogen4020018>.

**MAREFATJOUIKILEVAEE, Haniyeh, AUGER, Francois y OLIVIER, Jean-Christophe. 2023.** *Static and Dynamic Electrical Models of Proton Exchange Membrane Electrolysers: A Comprehensive Review.* s.l. : MDPI, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16186503>.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL PERÚ. 2016.** *SBCC-05/PROSEMER-MINEM Estudio para aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del atlas eólico del Perú.* Lima : MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL PERÚ, 2016. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>

**OMM. 2021.** *Un año más, las concentraciones de gases de efecto invernadero volvieron a batir todos los récords.* Online : Organización Meteorológica Mundial, 2021. <https://wmo.int/es/media/un-ano-mas-las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-volvieron-batir-todos-los-records#:~:text=todos%20los%20r%C3%A9cords,Un%20a%C3%B1o%20m%C3%A1s%20C%20las%20concentraciones%20de%20gases%20de%20efecto%20invernadero,a%20batir%20todos%20los%20r%C3%A9cords&text=La%20abundancia%20de%20gases%20de,media%20del%20per%C3%ADodo%202011-2020>.

**PINSKY, Roxane, y otros. 2024.** *Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems.* s.l. : Progress in Nuclear Energy, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103317>.

**SAINT-DRENAN, Yves-Marie, y otros. 2020.** *A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.123>

**SALCEDO CORTÉZ, Andrea. 2020.** *Análisis de viabilidad para la integración de tecnologías Power to Gas a partir de hidrógeno, dentro de la operación de una microrred eléctrica para zonas rurales en Colombia.* Bogotá : Universidad De Los Andes, 2020. <http://hdl.handle.net/1992/51524>

**SÁNCHEZ, Mónica. 2019.** *Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2019.

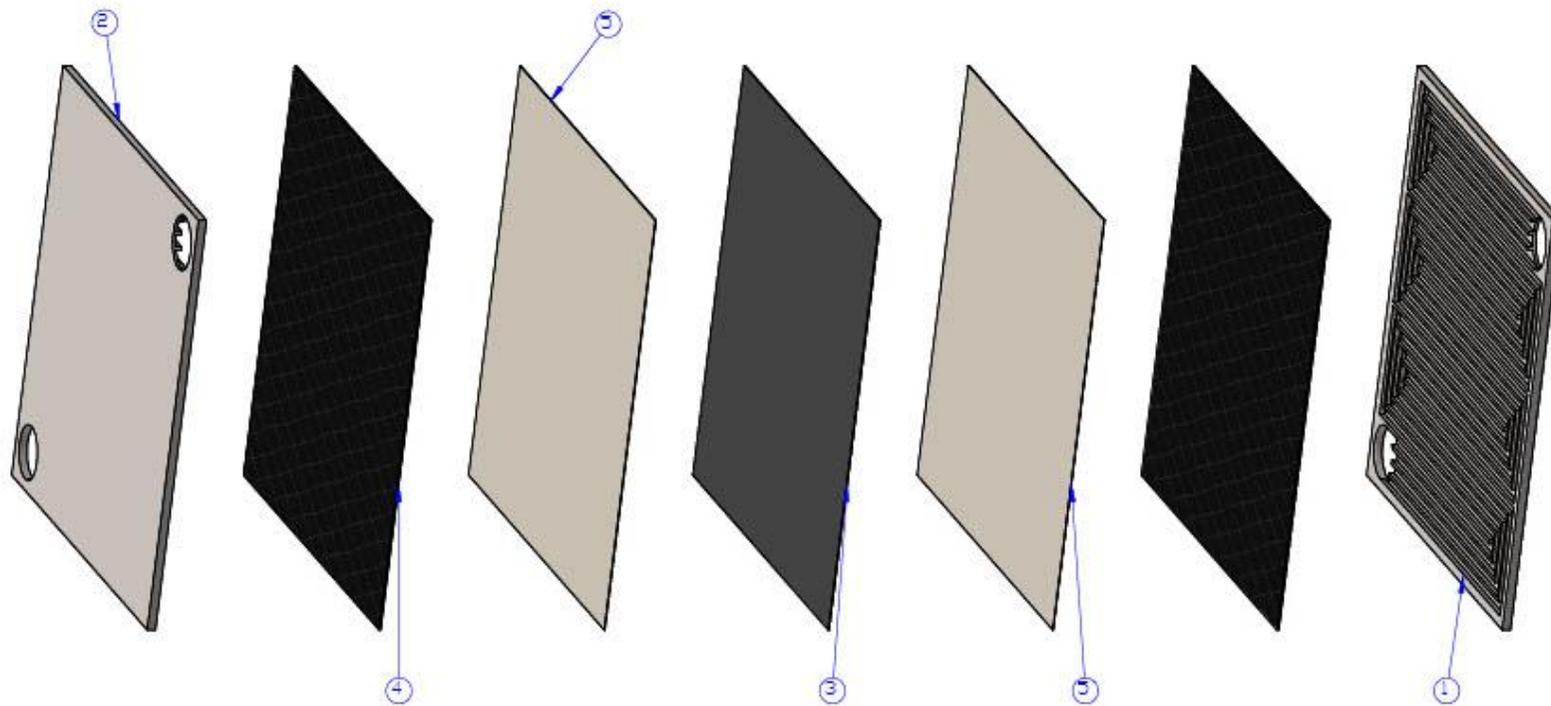
**SILVA, RENATA BELÉN CANCINO. 2021.** *PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS EN CHILE.* chile : s.n., 2021. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181631?show=full>

**Zhao, Li, y otros. 2023.** Design Strategy of Corrosion-Resistant Electrodes for Seawater Electrolysis. *MDPI*. [En línea] *Advanced Electrocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications*, 23 de Marzo de 2023. [Citado el: 27 de Abril de 2024.] <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/7/2709#metrics>.

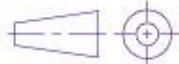
**ZHENG, Yun, CHEN, Zhongwei y ZHANG, Jiujun. 2021.** *Solid Oxide Electrolysis of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> to Produce Hydrogen and Low-Carbon Fuels.* s.l. : Electrochemical Energy Reviews, 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1007/s41918-021-00097-4>.

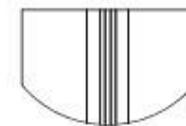
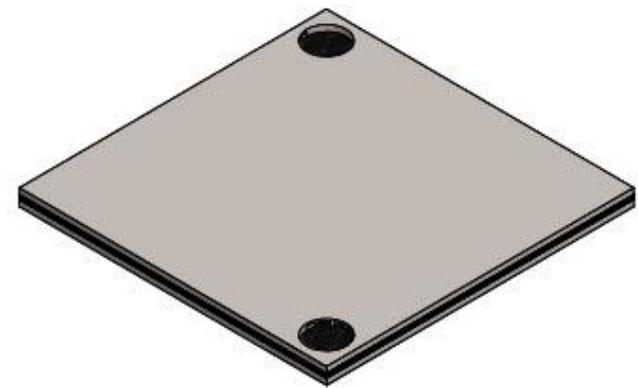
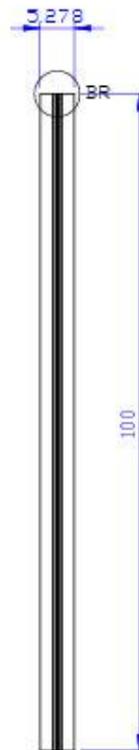
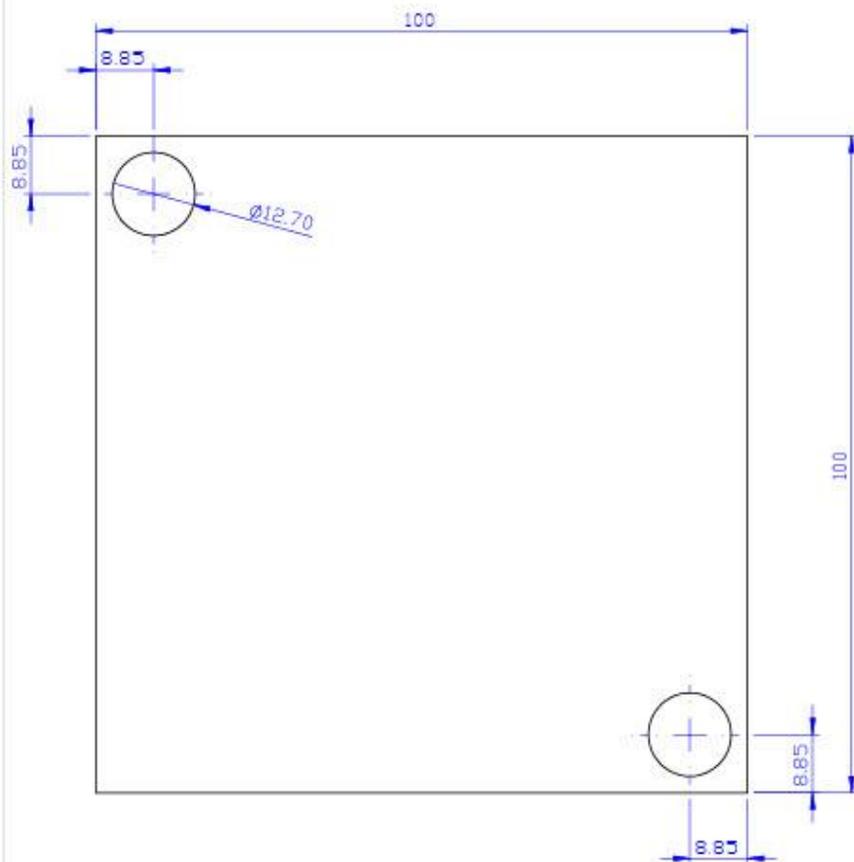
## **IX. ANEXOS**

Anexo 1 Planos propuestos para el diseño del electrolizador

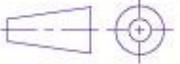


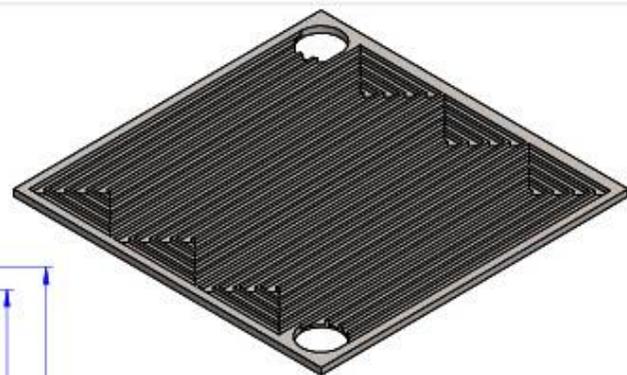
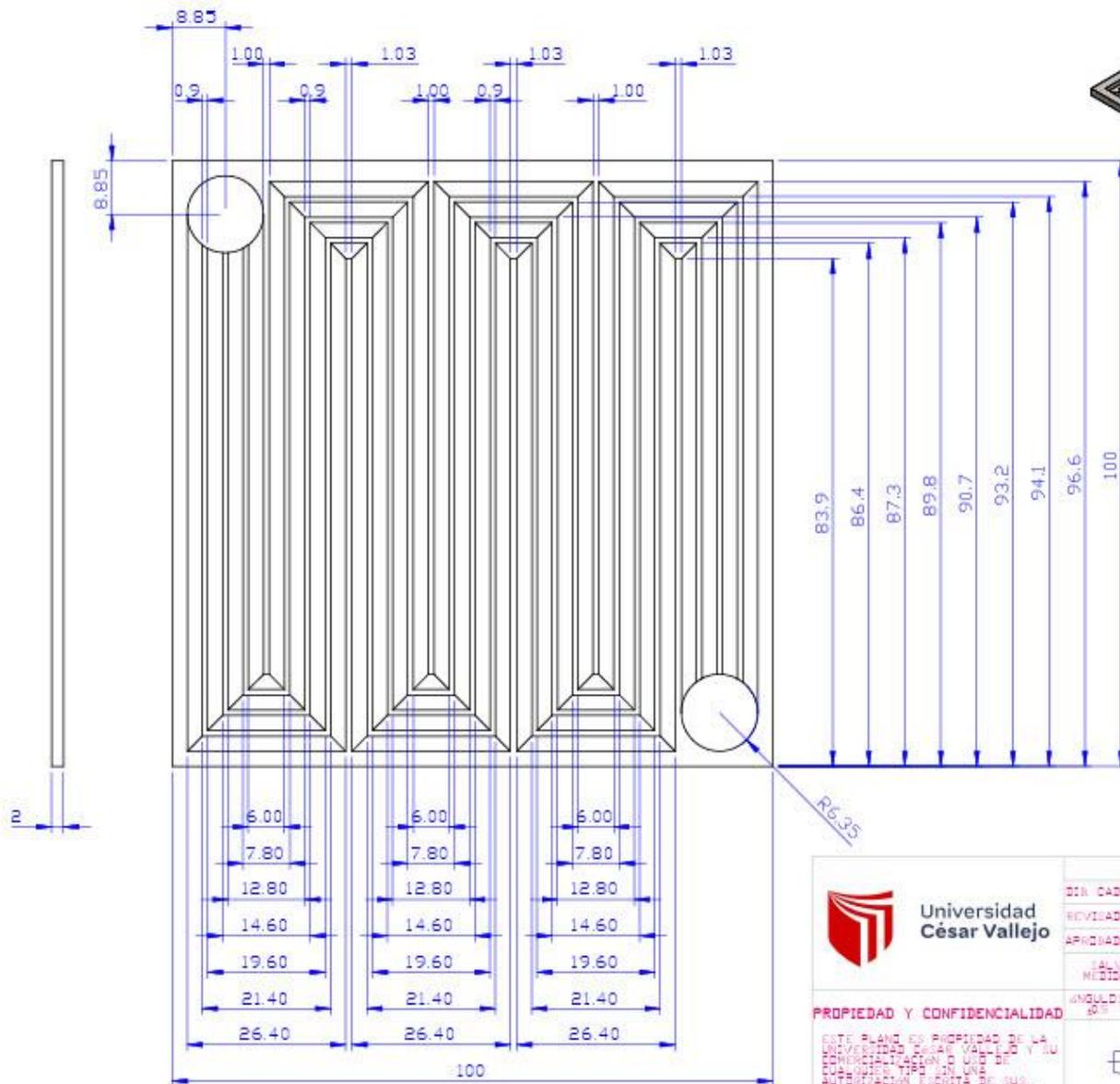
ITEM NO.	NOMBRE DE PARTE	QTY.
1	PLACA BIPOLAR ANODO	1
2	PLACA BIPOLAR CATODO	1
3	MEMBRANA	1
4	CAPA DIFUSIÓN DE GASES	2
5	CATALIZADOR ANODO/CATODO	2

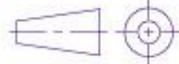
 <b>Universidad César Vallejo</b>	NOMBRE: _____ FECHA: _____	PROYECTO: <b>PEM ELECTROLIZADOR</b>	
	DIR. CAD: DEBAYTEN 0042 01/07/2024	REVISADO: _____ APROBADO: _____	DESCRIPCIÓN: <b>EXPLOSIONADO</b>
	SALVO OTRA INDICACIÓN LAS MEDIDAS ESTÁN EN MILÍMETROS		TAMAÑO: A4 NRO. DIBUJO: 1 REV.: -
	PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO Y SU COMERCIALIZACIÓN O USO DE CUALQUIER TIPO SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE SUS REPRESENTANTES ESTÁ PROHIBIDA POR LEY.	ANGULO: 30° 	ESCALA: 1:1 PESO: _____ HOJA: 2 DE 7

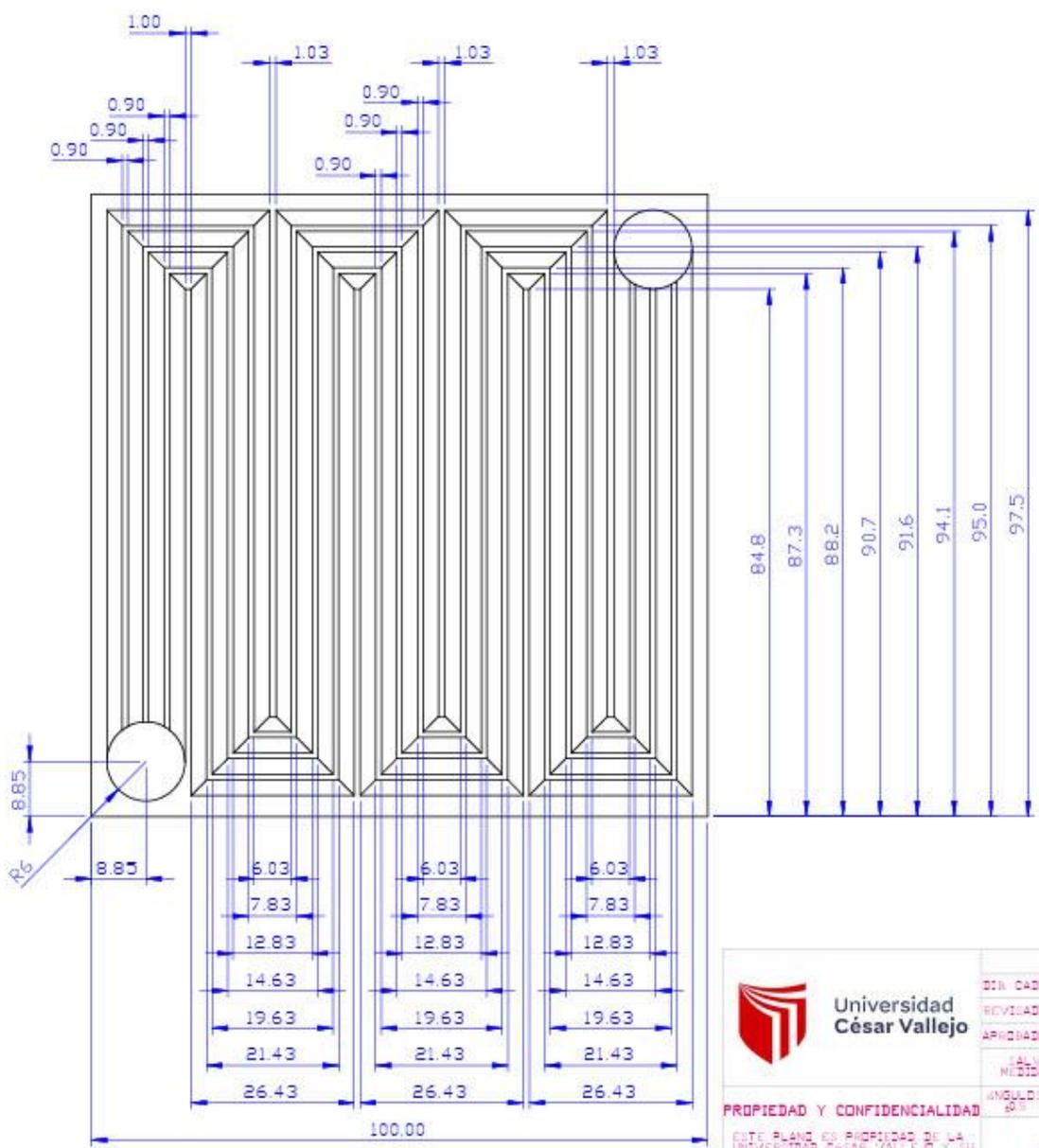


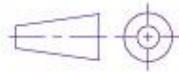
DETAIL BR  
SCALE 5 : 1

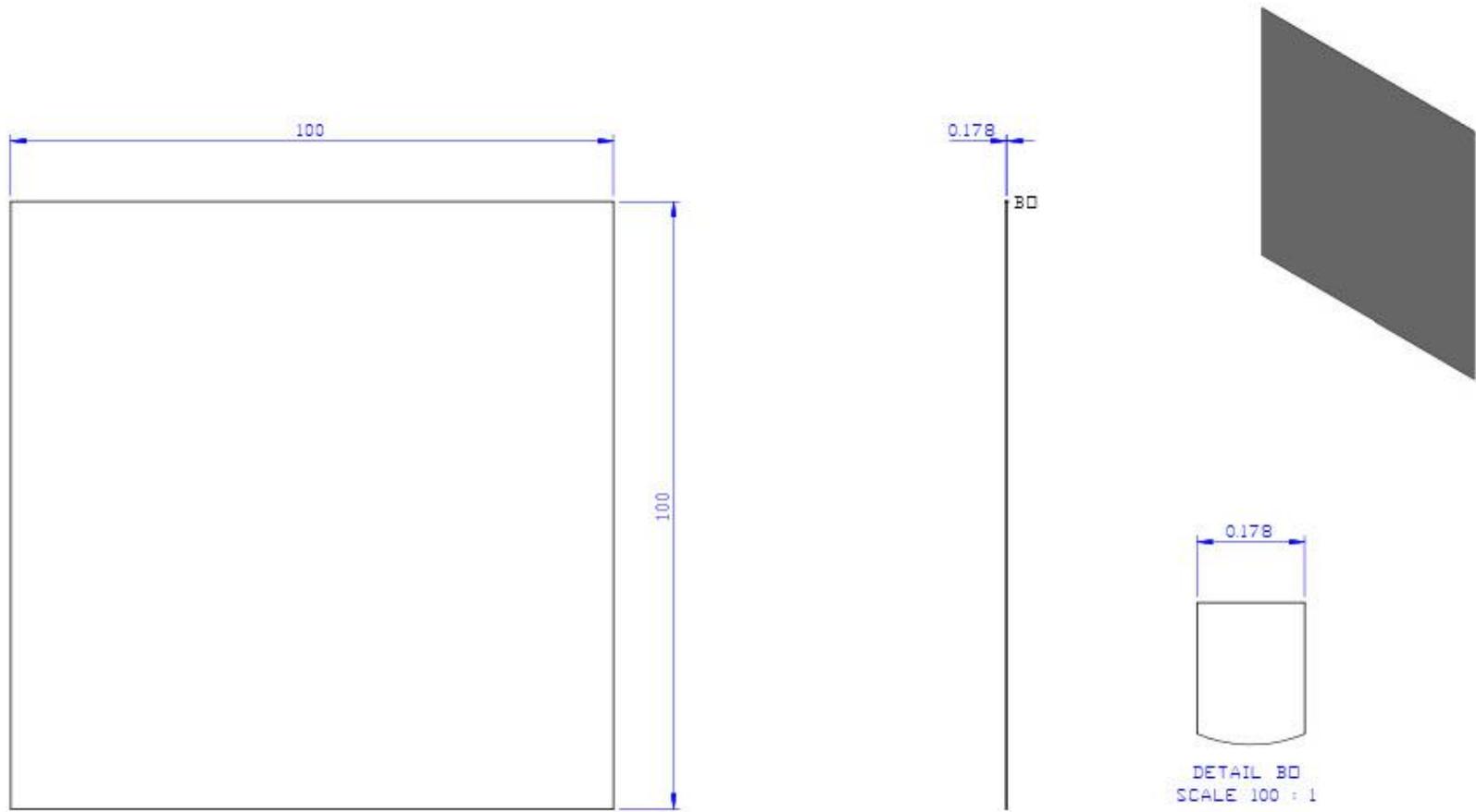
 <b>Universidad César Vallejo</b>	NOMBRE	FECHA	PROYECTO	
	DISEÑADO: DEBASTAN DIAI	01/07/2024	PEM ELECTROLIZADOR	
	REVISADO:		DISEÑADOR:	
	APROBADO:			
<b>PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD</b> ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO Y TU CONFIDENCIALIDAD. NO LO PUEDES COPIAR, REPRODUCIR, NI USAR EN NINGUNA FORMA SIN UNA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE SUS PROPIETARIOS. ESTA PENADA POR LEY.	SALVO OTRA INDICACIÓN LAS MEDIDAS ESTÁN EN MILÍMETROS		<b>ISOMÉTRICO</b>	
	ANGULO 90°	X 1:1	XX 1:2	XXX 1:5
		TAMAÑO <b>A4</b>		NO. DIBUJO <b>1</b>
PROYECCIÓN EN PRIMER ANGULO	ESCALA 1:1	PESO	REV. <b>-</b> HOJA 1 DE 7	

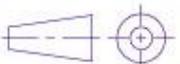


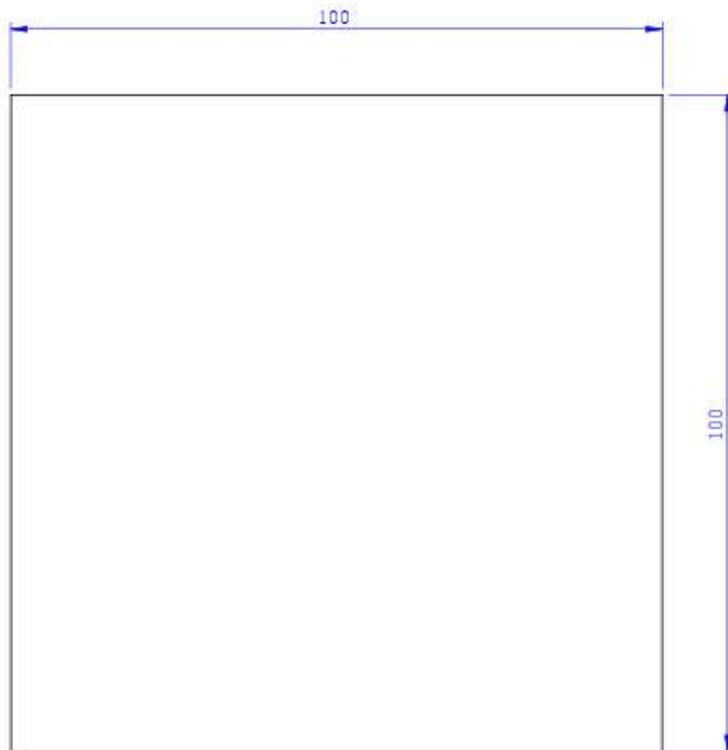
 <b>Universidad César Vallejo</b>	NOMBRE: DEPARTAMENTO DE FECHA: 01/07/2024	PROYECTO: PEM ELECTROLIZADOR
	REVISADO: APROBADO:	DISEÑADOR:
	(SALVO OTRA INDICACION LAS MEDIDAS ESTÁN EN MILÍMETROS)	
	ANÁLISIS: X 50%	X 100%
<b>PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD</b> ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO Y SU REPRODUCCIÓN SIN EL CONSENTIMIENTO DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO ESTÁ PROHIBIDA. ESTA FOLIA DE DISEÑO ES UN DOCUMENTO CONFIDENCIAL.	 PROYECCIÓN EN PRIMER ÁNGULO	TÍTULO: PLACA BIPOLAR A TAMAÑO: A4 NÚM. DIBUJO: 1 REV.: -
ESCALA: 1:1		PÉD:
HOJA: 3 DE 7		



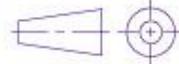
 <b>Universidad César Vallejo</b>	NOMBRE PEM ELECTROLIZADOR	FECHA 01/07/2024	HOJAS 7	
	DIR. CAD JERARHAN 2042	DISEÑO PLACA BIPOLAR C		
	REVISADO APROBADO	MEDIDAS ESTÁN EN MILÍMETROS		
PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO Y SU COMERCIALIZACIÓN O USO DE CUALQUIER TIPO DE REPRODUCCIÓN SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE SU REPRESENTANTE ESTÁ PENADO POR LEY.	INCLUIR 20%	X 50%	XX 100%	XXX 100%
 PROYECCIÓN EN PRIMER ÁNGULO	TAMAÑO <b>A4</b>	NÚM. HOJAS <b>1</b>	REV. <b>-</b>	
ESCALA 1:1		PESO	HOJA 4 DE 7	

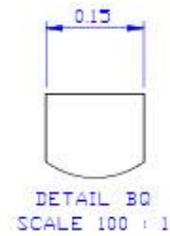
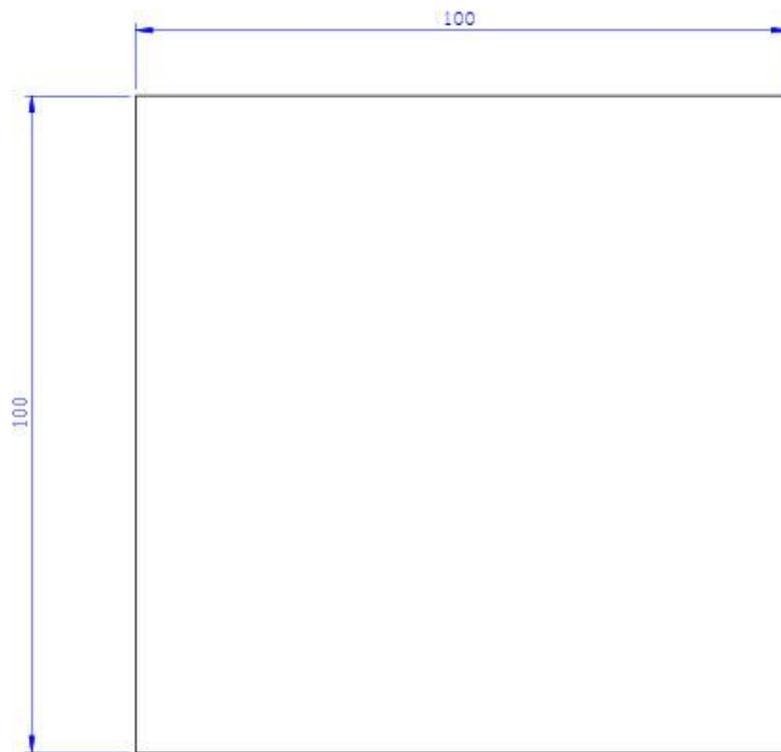


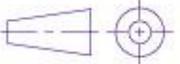
 <b>Universidad César Vallejo</b>	<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE</td> <td>FECHA</td> </tr> <tr> <td>DESIGNADO</td> <td>01/07/2024</td> </tr> <tr> <td>REVISADO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROBADO</td> <td></td> </tr> </table>	NOMBRE	FECHA	DESIGNADO	01/07/2024	REVISADO		APROBADO		<b>PROYECTO</b> PEM ELECTROLIZADOR						
	NOMBRE	FECHA														
	DESIGNADO	01/07/2024														
	REVISADO															
APROBADO																
SALVO OTRA INDICACION LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS	<b>DISEÑO</b>	<b>MEMBRANA</b>														
<b>PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD</b> ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO Y SU CONFIDENCIALIDAD. NO SE DE COMPARTIR, VENDER, USAR REPRODUCCION SIN CONSENTIR PREVIAMENTE. EL DISEÑO DE SUS RESULTADOS DEBE SER FONDA POR LEY.	<table border="1"> <tr> <td>ANGULO</td> <td>K</td> <td>KK</td> <td>KKK</td> </tr> <tr> <td>20°</td> <td>±1</td> <td>±0.3</td> <td>±0.05</td> </tr> </table>	ANGULO	K	KK	KKK	20°	±1	±0.3	±0.05	<table border="1"> <tr> <td>TAMANO</td> <td>NÚM. BORNAS</td> <td>REV.</td> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>1</td> <td>-</td> </tr> </table>	TAMANO	NÚM. BORNAS	REV.	A4	1	-
ANGULO	K	KK	KKK													
20°	±1	±0.3	±0.05													
TAMANO	NÚM. BORNAS	REV.														
A4	1	-														
 PROYECCION EN PRIMER ANGULO	ESCALA 1:1	HOJA 5 DE 7														



DETAIL BP  
SCALE 30 : 1

 <b>Universidad César Vallejo</b>	<table border="1"> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> <th>PROYECTO</th> </tr> <tr> <td>DESARROLLO DE</td> <td>01/07/2024</td> <td>PEM ELECTROLIZADOR</td> </tr> </table>	NOMBRE	FECHA	PROYECTO	DESARROLLO DE	01/07/2024	PEM ELECTROLIZADOR									
	NOMBRE	FECHA	PROYECTO													
	DESARROLLO DE	01/07/2024	PEM ELECTROLIZADOR													
	<table border="1"> <tr> <th>REVISADO</th> <th>APROBADO</th> <th>DISEÑADOR</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	REVISADO	APROBADO	DISEÑADOR				<b>CAPA DIFUSORA DE GASES</b>								
REVISADO	APROBADO	DISEÑADOR														
SALVO OTRA INDICACION LAS MEDIDAS ESTÁN EN MILÍMETROS	<table border="1"> <tr> <th>TAMAÑO</th> <th>NÚM. DE HOJAS</th> <th>REV.</th> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>1</td> <td>-</td> </tr> </table>	TAMAÑO	NÚM. DE HOJAS	REV.	A4	1	-									
TAMAÑO	NÚM. DE HOJAS	REV.														
A4	1	-														
<b>PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD</b> ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO Y SU CONTENIDO NO DEBE SER REPRODUCIDO NI UTILIZADO SIN EL CONSENTIMIENTO PREVIO POR ESCRITO DE SU REPRESENTACIÓN LEGAL. Queda prohibida la explotación económica de esta obra sin el consentimiento escrito por escrito.	<table border="1"> <tr> <th>ANGULO</th> <th>X</th> <th>XX</th> <th>XXX</th> </tr> <tr> <td>30°</td> <td>45°</td> <td>60°</td> <td>90°</td> </tr> </table>  <p>PROYECCIÓN EN PRIMER ÁNGULO</p>	ANGULO	X	XX	XXX	30°	45°	60°	90°	<table border="1"> <tr> <th>ESCALA</th> <th>HOJA</th> <th>DE</th> </tr> <tr> <td>1:1</td> <td>6</td> <td>7</td> </tr> </table>	ESCALA	HOJA	DE	1:1	6	7
ANGULO	X	XX	XXX													
30°	45°	60°	90°													
ESCALA	HOJA	DE														
1:1	6	7														



 <b>Universidad César Vallejo</b>	<table border="1"> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> <th>PROYECTO</th> </tr> <tr> <td>BOB. CAD: DEBAYDAN BOB</td> <td>01/07/2024</td> <td>PEM ELECTROLIZADOR</td> </tr> </table>	NOMBRE	FECHA	PROYECTO	BOB. CAD: DEBAYDAN BOB	01/07/2024	PEM ELECTROLIZADOR	
	NOMBRE	FECHA	PROYECTO					
	BOB. CAD: DEBAYDAN BOB	01/07/2024	PEM ELECTROLIZADOR					
<table border="1"> <tr> <th>REVISADO</th> <th>APROBADO</th> <th>DIRECCION</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	REVISADO	APROBADO	DIRECCION					
REVISADO	APROBADO	DIRECCION						
<p>SALVO OTRA INDICACION LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS</p> <table border="1"> <tr> <th>ANGULOS</th> <th>X</th> <th>XX</th> <th>XXX</th> </tr> <tr> <td>30°</td> <td>45°</td> <td>60°</td> <td>90°</td> </tr> </table>	ANGULOS	X	XX	XXX	30°	45°	60°	90°
ANGULOS	X	XX	XXX					
30°	45°	60°	90°					
<p><b>PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD</b></p> <p>ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO Y SU CONTENIDO NO DEBE SER REPRODUCIDO, COPIADO, VISTO, NI USADO SIN LA AUTORIZACION ESCRITA DE SUS PROPIETARIOS. ESTA PUNADA POR LEY.</p>	<table border="1"> <tr> <th>TAMANO</th> <th>NO. DE HOJAS</th> <th>REV.</th> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>1</td> <td>-</td> </tr> </table>	TAMANO	NO. DE HOJAS	REV.	A4	1	-	
TAMANO	NO. DE HOJAS	REV.						
A4	1	-						
 <p>PROYECCION EN PRIMER ANGULO</p>	<table border="1"> <tr> <th>ESCALA (1)</th> <th>PESO</th> <th>HOJA 7 DE 7</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	ESCALA (1)	PESO	HOJA 7 DE 7				
ESCALA (1)	PESO	HOJA 7 DE 7						