

Desarrollo de un prototipo para la producción de
hidrógeno verde mediante energía fotovoltaica

Juan Camilo Murillo Leal y Juan Carlos Meza Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez, PhD

Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad industrial de santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de ingeniería mecánica

Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo en primer lugar a mi madre, Carmenza, por su amor incondicional, su entrega constante y su respaldo incalculable a lo largo de toda mi formación académica. Su esfuerzo diario y su dedicación fueron la fuerza impulsora y el pilar fundamental que hicieron posible este gran logro.

A mi familia, por su permanente acompañamiento, comprensión y respaldo en cada etapa de este proceso. Su confianza en mí ha sido una fuente constante de motivación y fortaleza.

A Dios, por el don de la vida, por brindarme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para superar los desafíos presentados en este camino.

A doña Belén, por su generosidad al acogerme en su hogar y contribuir de manera significativa a mi bienestar durante este tiempo.

A mi compañero de grado, Juan Carlos Meza, por su compromiso, responsabilidad y disposición para el trabajo en equipo. Su aporte fue fundamental para el desarrollo y culminación exitosa de este proyecto.

A mi amigo Andrés De la Ossa, con quien compartí la experiencia de ser foráneo, por su compañía, apoyo y amistad sincera durante los años vividos fuera de casa.

A mi novia, Silvia Rodríguez, por su amor, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por llegar a mi vida en la etapa final de este proyecto, por creer en mí, inspirarme a seguir adelante y acompañarme con paciencia y dedicación durante el último tramo de este camino.

Juan Camilo Murillo Leal

Primeramente a Dios, por ser la guía suprema de mi vida, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este importante logro.

A mi madre, por su amor incondicional, sus consejos y su apoyo constante, siendo pilar fundamental en cada paso de este camino.

A mi amigo José Fernando Suárez Botello, por su compañía, apoyo y amistad sincera a lo largo de este proceso.

A mi compañero de tesis, Juan Camilo Murillo Leal, por recorrer este camino a mi lado. Gracias por tu amistad, apoyo y dedicación; este logro también es fruto de tu esfuerzo.

A mi compañera de aventuras, Daniela López, por estar siempre a mi lado, especialmente en los momentos más difíciles, brindándome apoyo, compañía y motivación para seguir adelante.

A cada uno de los profesores que hicieron parte de mi formación académica, por compartir su conocimiento y contribuir a la construcción de esta grandiosa carrera.

A mi abuela, quien siempre me acompaña con su amor y sus oraciones, siendo una presencia constante en mi vida.

A mi tío Néstor, por su hospitalidad y apoyo durante mi estancia en Bucaramanga, brindándome un hogar y tranquilidad en una etapa clave.

Y a mi padre, Reynaldo, cuyos estrictos dichos y enseñanzas han forjado en mí el carácter y la disciplina que hoy me permiten convertirme en ingeniero mecánico.

Juan Carlos Meza Rodriguez

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, por brindarme una formación académica integral, fundamentada en la excelencia, el pensamiento crítico y el compromiso profesional, que hicieron posible la culminación de este importante logro.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ser el espacio donde se consolidaron mis conocimientos, habilidades y valores propios de la ingeniería, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento personal y profesional.

A cada profesor que hizo parte de mi proceso formativo, por su dedicación, vocación y disposición para compartir sus conocimientos, contribuyendo de manera invaluable a mi desarrollo académico.

A mi director de la tesis, Jabid Quiroga, por su constante acompañamiento, orientación y apoyo durante el desarrollo de este proyecto, así como por su confianza y compromiso en cada una de sus etapas.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1 Planteamiento del problema	17
2 Objetivos del trabajo de grado	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 Marco teórico	19
3.1 Modelo Electroquímico.	21
3.2 Modelos del panel solar	25
3.3 Tipos de electrolizadores	27
3.3.1 Electrolizador alcalino	27
3.3.2 Electrolizador PEM	28
3.3.3 Electrolizador SOEC	29
3.4 Tipos de celdas fotovoltaicas.	31
3.5 Componentes principales del sistema	33
3.5.1 Electrolito alcalino	33
3.5.2 Diafragma separador	33
3.5.3 Stack de electrólisis	33
3.5.4 Sistema de almacenamiento (Batería)	34
3.5.5 Panel fotovoltaico	34
4 Marco referencial	35
5 Metodología	37
5.1 Alcance de la investigación	37
5.2 Descripción detallada del sistema	37

5.3	Planteamiento de alternativas	38
5.3.1	Alternativa 1. Electrolizador Alcalino	38
5.3.2	Alternativa 2. Electrolizador PEM (Proton Exchange Membrane)	39
5.3.3	Alternativa 3. Electrolizador SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell)	40
5.4	Selección de alternativas del sistema	40
5.5	Selección de elementos y materiales del sistema de generación fotovoltaica y electrólisis	41
5.6	Diseño en SolidWorks	42
5.7	Montaje de los subsistemas	43
5.7.1	Montaje del electrolizador y burbujeadores	43
5.7.2	Montaje del panel fotovoltaico y conexiones eléctricas	44
5.8	Modelado del electrolizador y el panel fotovoltaico	44
5.9	Identificación de variables dependientes e independientes	44
5.10	Diseño experimental	47
5.11	Evaluación.	49
6	Resultados	50
6.1	Selección de la tecnología de electrólisis	50
6.2	Selección de materiales y componentes del sistema	50
6.2.1	Material para las placas de los electrodos	51
6.2.2	Material para los empaques del electrolizador	52
6.2.3	Material para las tapas del electrolizador	53
6.2.4	Selección del sistema de almacenamiento (Batería)	54
6.3	Montaje de los subsistemas	55
6.3.1	Montaje del electrolizador y burbujeadores	55
6.3.2	Montaje del panel fotovoltaico y conexiones eléctricas	59
6.4	Modelado Computacional	62
6.4.1	Modelado del panel fotovoltaico	62

6.4.2	Modelado del electrolizador alcalino	69
6.4.3	Estimación paramétrica y simulación del electrolizador	70
6.5	Determinación de los Parámetros del Modelo de Ulleberg	72
6.6	Validación de los Parámetros Obtenidos.	74
6.7	Evaluación del prototipo	76
6.7.1	Análisis de resultados: Electrolito al 20 % de KOH	76
6.7.2	Producción teórica vs. Producción experimental al 20 %	77
6.7.3	Producción teórica vs. Producción experimental al 25 %	78
6.7.4	Análisis de resultados: Electrolito al 30 % de KOH	80
6.7.5	Producción teórica vs. Producción experimental al 30 %	81
6.7.6	Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 20 % bajo nubosidad)	82
6.7.7	Producción teórica vs. Producción experimental bajo acoplamiento directo .	83
6.7.8	Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 25 % bajo nubosidad parcial)	84
6.7.9	Producción teórica vs. Producción experimental bajo acoplamiento directo .	85
6.7.10	Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 30 % bajo nubosidad)	86
6.7.11	Producción teórica vs. Producción experimental bajo nubosidad extrema . .	87
6.7.12	Análisis del error experimental	89
6.7.13	Comparación entre la producción teórica según la ley de Faraday y la expe- rimental	91
6.7.14	Indicadores energéticos: Consumo específico por kg de H_2	93
6.8	Análisis de viabilidad integral del sistema	95
6.8.1	Análisis de Viabilidad Económica (CAPEX y OPEX)	97
7	Conclusiones	100

8	Recomendaciones	102
	Referencias	104
	Apéndices	110

Lista de tablas

1	Comparación de Tecnologías de Células de Silicio	32
2	Matriz de Evaluación de Tecnologías de Electrólisis	41
3	Matriz de selección de material para las placas del electrolizador	42
4	Variables y parámetros del modelo matemático de Ulleberg	46
5	Matriz de planificación de ensayos experimentales	48
6	Comparación de Tecnologías de Electrólisis	51
7	Matriz de Selección de Material para las Placas del Electrolizador	52
8	Matriz de Selección de Material para los Empaques del Electrolizador	53
9	Matriz de Selección de Material para las Tapas del Electrolizador	54
10	Matriz de Selección del Sistema de Almacenamiento Energético	55
11	Resumen del Comportamiento Solar e Integración Matutina (9:00 AM – 12:00 PM)	61
12	Parámetros Electroquímicos Calculados Según el Modelo de Ulleberg para Diferentes Concentraciones de KOH	73
13	Cálculo de la desviación estándar y el error experimental.	90
14	Error experimental (Estimado a partir de los triplicados).	90
15	Comparación de la producción volumétrica teórica vs. experimental según la corriente media.	92
16	Consumo eléctrico y masa producida en los escenarios operativos más representativos.	94
17	Comparativa de costos según el tipo de hidrógeno.	95
18	Presupuesto de inversión inicial (CAPEX).	98
19	Proyección de gastos operativos anuales (OPEX).	99

Lista de figuras

1	Ventajas y Desventajas del Hidrógeno Verde	20
2	Circuito Eléctrico Análogo para la Electrólisis	21
3	Curva Característica Corriente-Voltaje (I-V) de un Panel Fotovoltaico	26
4	Comportamiento de la Curva I-V ante Diferentes Condiciones de Temperatura	26
5	Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador Alcalino	27
6	Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador PEM	29
7	Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador de Óxido Sólido (SOEC)	30
8	<i>Electrolizador alcalino</i>	38
9	<i>Electrolizador tipo PEM</i>	39
10	<i>Electrolizador tipo SOEC</i>	40
11	Plataforma de modelado SolidWorks 3D	43
12	Flujograma del Protocolo de Pruebas	49
13	Tapa en Acrílico Delantera del Burbujeador	56
14	Tapa en Acrílico Trasera del Burbujeador	57
15	Marco Central para el Burbujeador	57
16	Tapa Delantera de la Celda Electrolítica	58
17	Tapa Trasera de la Celda Electrolítica	58
18	Montaje experimental del sistema de electrólisis y recolección de gas por desplazamiento de fluidos.	59
19	Montaje del Panel Fotovoltaico en el Bastidor	62
20	Circuito Equivalente del Modelo de Diodo Único	63
21	Diagrama de Bloques en Simulink para la Fotocorriente (I_{ph})	64
22	Diagrama de Bloques para la Corriente de Saturación Real (I_0)	65
23	Diagrama de Bloques para la Corriente de Saturación Inversa (I_{rs})	65
24	Diagrama de Bloques para la Corriente de Fuga (I_{sh})	66
25	Integración del Cálculo de la Corriente Neta Final	67

26	Arquitectura Final del Modelo Fotovoltaico en Simulink	68
27	Curva Característica I-V ante Variaciones de Temperatura	68
28	Curva Característica I-V ante Variaciones de Irradiancia	69
29	Curvas Características (I-V) Proporcionadas por el Fabricante	70
30	Diagrama de Bloques en Simulink del Modelo de Voltaje de Ulleberg	71
31	Modelo del sistema con batería al 20 % de operación.	74
32	Respuesta del sistema con batería al 20 % de operación.	78
33	Respuesta del sistema con batería al 25 % de operación.	79
34	Respuesta del sistema con batería al 30 % de operación.	81
35	Respuesta del sistema sin batería al 20 % de operación.	83
36	Respuesta del sistema sin batería al 25 % de operación.	86
37	Respuesta del sistema sin batería al 30 % de operación.	88

Lista de Apéndices

Apéndice A. Datos experimentales del electrolizador	110
Apéndice B. Planos de ensamble	111

Resumen

Título: Desarrollo de un prototipo para la producción de hidrógeno verde mediante energía fotovoltaica.*

Autor: Juan Camilo Murillo Leal y Juan Carlos Meza Rodríguez.**

Palabras clave: Hidrógeno verde; energía fotovoltaica; electrólisis; prototipo; eficiencia energética.

Descripción: El uso de combustibles fósiles causa alrededor del 86 % de las emisiones de dióxido de carbono en la producción energética. Por ello, desarrollar fuentes alternativas es prioritario, reconociendo el potencial energético regional y optimizando sistemas desde la ingeniería. Esta investigación tiene como objetivo principal desarrollar un prototipo para generar hidrógeno verde mediante energía fotovoltaica, evaluando su viabilidad y contribución a la transición energética. Se adoptó un enfoque cuantitativo aplicado, abarcando el diseño, construcción y validación del prototipo a través de un protocolo de pruebas experimentales. Los resultados indicaron que la mayor eficiencia del sistema se logró con una concentración de KOH del 25 % en un ambiente soleado, alcanzando un 67 %. En contraste, la menor eficiencia se observó con una concentración del 25 % utilizando alimentación por batería, registrando un 38 %.

Se concluye que múltiples variables condicionan el rendimiento del sistema en la producción de hidrógeno verde. Para optimizar la celda de electrólisis, es vital mitigar pérdidas energéticas, en especial las relacionadas con el material de los electrodos y la concentración de hidróxido de potasio en el electrolito. Una baja concentración limita la conductividad eléctrica, mientras que un exceso de KOH aumenta la viscosidad, afectando el proceso. Además, las burbujas acumuladas en las placas actúan como aislante, reduciendo el área de reacción. Finalmente, durante la evaluación se comprobó que la máxima producción de hidrógeno coincidió directamente con los picos de potencia del panel solar, ya sea con batería o bajo condiciones ambientales óptimas, alineándose perfectamente con los fundamentos teóricos que rigen el proceso de producción de hidrógeno.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez, PhD.

Abstract

Title: Development of a prototype for the production of green hydrogen using photovoltaic energy.*

Author: Juan Camilo Murillo Leal and Juan Carlos Meza Rodríguez.**

Keywords: Green hydrogen; photovoltaic energy; electrolysis; prototype; energy efficiency.

Description: The use of fossil fuels is one of the main contributors to carbon dioxide emissions from energy production, highlighting the need to develop alternative energy sources and promote the energy transition. In this context, green hydrogen represents a promising alternative due to its potential for integration with renewable energy systems. This research aimed to develop a prototype for green hydrogen production using photovoltaic energy and to evaluate its feasibility and performance under different operating conditions. A quantitative applied research approach was adopted, including the design, construction, and validation of the prototype through an experimental testing protocol. The results showed that the highest system efficiency, 67%, was achieved using a 25% KOH concentration under sunny environmental conditions. In contrast, the lowest efficiency, 38%, was obtained with the same KOH concentration when the system was powered by a battery. These results demonstrate that system performance is influenced by several factors, including electrolyte concentration, electrode material, energy supply, and the accumulation of hydrogen bubbles on the electrode surfaces. The study concludes that optimizing the electrolyte concentration and electrode materials, as well as reducing energy losses, is essential to improve the efficiency of the electrolysis process. Furthermore, hydrogen production showed a direct relationship with the photovoltaic panel's power peaks under both battery-powered and favorable environmental conditions. These findings are consistent with the theoretical principles governing green hydrogen production and demonstrate the potential of photovoltaic energy as a renewable source for hydrogen generation.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, PhD.

Introducción

La Comisión Europea ha aprobado subvenciones por 1.400 millones de euros para impulsar proyectos de hidrógeno y sustituir combustibles fósiles en el transporte (Diario del Puerto, 2024), decisión que subraya que, en la actualidad, el desarrollo de tecnologías debe considerar el impacto al medio ambiente. El factor ambiental ha pasado a ser protagonista por la problemática del calentamiento global: alrededor del 86 % de las emisiones de dióxido de carbono proviene de la quema de combustibles fósiles para producir energía y materiales (BBC News Mundo, 2021). Si bien la demanda energética actual dificulta un cambio abrupto de las fuentes fósiles, es imprescindible mejorar la eficiencia de los sistemas e incorporar energías alternativas.

Entre estas alternativas, el hidrógeno verde destaca porque no libera gases de efecto invernadero durante su uso. Se obtiene por electrólisis del agua utilizando electricidad, idealmente de origen solar o eólico, puede almacenarse y posteriormente convertirse en energía eléctrica (Acciona, 2024). En Colombia, la hoja de ruta del hidrógeno se enmarca en el compromiso nacional de reducir en 51 % las emisiones para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono hacia mediados de siglo (Ministerio de Minas y Energía, 2021). En este contexto, el hidrógeno verde aparece como una vía para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y, por ende, las emisiones asociadas. Además, su producción es versátil y puede aprovechar el potencial del país en fuentes renovables: oferta hídrica seis veces superior al promedio mundial y un notable recurso solar en buena parte del territorio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). No obstante, la penetración actual de estas fuentes aún es limitada (alrededor de 4 %), en el 2025, el consumo de hidrógeno a nivel nacional se encontraba dominado por el hidrógeno gris, con una participación cercana al 76 %, asociado a mayores emisiones. Por su parte, el hidrógeno azul representa alrededor del 20 %. lo que evidencia que la transición está lejos de consolidarse (La República, 2024).

El presente documento tiene como propósito diseñar, construir y evaluar un

prototipo eficiente y sostenible que utilice energía fotovoltaica para la producción de hidrógeno verde, explorando así la viabilidad y optimización de esta tecnología como una fuente de energía limpia y renovable. Para ello, se empleó una metodología que abarca la selección de materiales según criterios de diseño, el modelado mediante herramientas y software para analizar el comportamiento de las variables, así como la evaluación y el análisis de la producción del banco experimental.

1. Planteamiento del problema

En la necesidad apremiante de buscar y adoptar fuentes de energía renovable en un mundo caracterizado por la dependencia crítica de recursos energéticos no renovables, como los combustibles fósiles, que no solo contribuyen al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero (Constituyen más del 75 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y cerca del 90 % del total de emisiones de dióxido de carbono) (Organización de las Naciones Unidas, 2024), sino que también plantean inquietudes sobre la disponibilidad a largo plazo de estos recursos finitos.

La extracción y utilización de estos combustibles conllevan impactos ambientales adversos y riesgos para la salud pública (Organización de las Naciones Unidas, 2024), además de volatilidad en los precios del petróleo y vulnerabilidad ante interrupciones en el suministro de energía, como los recientes conflictos del estrecho de Hormuz (Latinus, 2026), que resultaron en un aumento generalizado en el precio del barril de petróleo. La adopción de fuentes de energía renovable, particularmente la energía fotovoltaica, se ha convertido en una respuesta crítica para abordar estos desafíos globales, ya que aprovecha recursos naturales virtualmente inagotables y no emite emisiones contaminantes durante la generación de energía.

En el contexto energético nacional se tiene una dependencia histórica de fuentes de energía convencionales, principalmente hidroeléctricas y térmicas (Ministerio de Minas y Energía, 2026). La diversificación de la matriz energética es esencial para garantizar la seguridad energética, reducir la vulnerabilidad a la volatilidad de los precios del petróleo y cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones. La generación de hidrógeno a partir de energía fotovoltaica se presenta como una alternativa clave para superar estos desafíos (Ministerio de Minas y Energía, 2021), alineándose con los objetivos de sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

2. Objetivos del trabajo de grado

2.1. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un prototipo eficiente y sostenible que utilice energía fotovoltaica para la producción de hidrógeno verde, explorando así la viabilidad y la optimización de esta tecnología como una fuente de energía limpia y renovable.

2.2. Objetivos específicos

Seleccionar los componentes necesarios para la implementación de una instalación fotovoltaica basada en un panel solar de 150 W.

Integrar un sistema de electrólisis a la instalación fotovoltaica, determinando los parámetros de operación que influyen en la eficiencia de la producción de hidrógeno verde.

Construir un prototipo funcional del sistema fotovoltaico–electrolizador, garantizando el cumplimiento de las condiciones técnicas y operativas establecidas en el diseño.

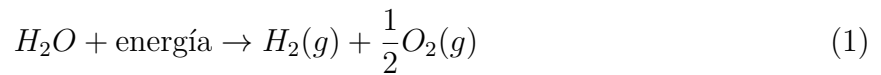
Realizar pruebas para evaluar el rendimiento y la eficiencia del prototipo en diversas condiciones ambientales.

3. Marco teórico

El hidrógeno verde se ha consolidado como una alternativa con aplicaciones directas tanto en la movilidad como en diversos procesos de producción industrial, donde puede emplearse como materia prima o como fuente de energía. De acuerdo con la *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia* del Ministerio de Minas y Energía (2021), el objetivo principal de esta tecnología es reducir la dependencia actual del país respecto a los combustibles fósiles. No obstante, para lograr su implementación a gran escala, es imperativo que la industria alcance un nivel de madurez que garantice su competitividad económica, una meta que se proyecta hacia el año 2030.

En el camino hacia esa transición, resulta vital comprender las características inherentes de este vector energético. Como se detalla en la Figura 1, la principal ventaja del hidrógeno verde radica en la nula emisión de gases de efecto invernadero durante su uso. Sin embargo, su adopción aún enfrenta barreras significativas, tales como el alto consumo energético requerido para su producción y los complejos desafíos técnicos asociados a su almacenamiento y transporte.

Desde el punto de vista operativo, la producción de este elemento se basa en la electrólisis. Para lograr la disociación de la molécula de agua, es indispensable suministrar energía externa, lo que da lugar a la separación de hidrógeno diatómico (H_2) y oxígeno (O_2), tal como se describe en la Ecuación 1:



Para cuantificar este requerimiento energético, Miranda Millacoy (2022) establece que, basándose en los principios de la termodinámica electroquímica, la demanda total de energía para la electrólisis del agua está determinada por la variación de entalpía (ΔH). Esta energía se descompone en una contribución eléctrica, representada por la energía libre de Gibbs (ΔG), y una contribución térmica, relacionada con el término entrópico ($T\Delta S$), como se expresa en la Ecuación 2:

Figura 1*Ventajas y Desventajas del Hidrógeno Verde*

Nota. Tomado de La República (2024).

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

Durante el proceso electrolítico en sistemas electroquímicos y celdas de combustible, la variación de la energía libre de Gibbs (ΔG , en J/mol) debe ser suministrada íntegramente por una fuente externa de energía eléctrica para que ocurra una reacción reversible. Esto define el voltaje reversible (V_{rev}), un parámetro termodinámico que representa la fuerza electromotriz o el trabajo eléctrico mínimo y teórico necesario para iniciar la disociación de la molécula de agua bajo condiciones ideales. Sabiendo que n representa el número de electrones transferidos en la reacción y F corresponde a la constante de Faraday (96485 C/mol), esta relación fundamental se expresa matemáticamente mediante la Ecuación 3:

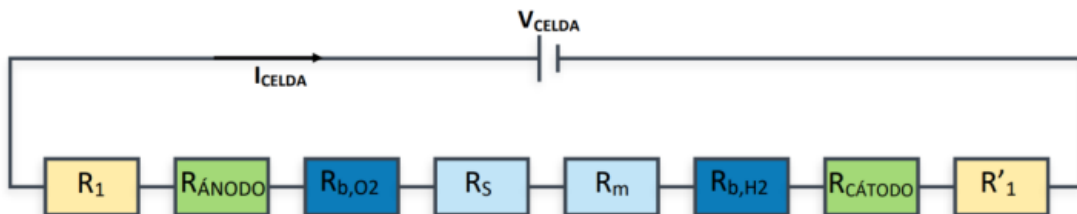
$$V_{\text{rev}} = \frac{\Delta G(T)}{zF} \quad (3)$$

3.1. Modelo Electroquímico.

El proceso de electrólisis del agua implica que la corriente eléctrica venza una serie de barreras a lo largo del sistema, las cuales se ilustran mediante el circuito análogo de la Figura 2 para facilitar su comprensión. El recorrido inicia con las resistencias externas R_1 y R'_1 , que agrupan las pérdidas de energía en forma de calor dentro de los cables y conectores, cuyo impacto dependerá de los materiales elegidos, su longitud y grosor. Ya en el interior de la celda, la corriente (I_{CELDA}) enfrenta las resistencias de activación en los electrodos ($R_{\text{ÁNODO}}$ y $R_{\text{CÁTODO}}$), que representan la energía mínima indispensable para que la reacción química pueda arrancar. A medida que el sistema empieza a producir gas, las burbujas se adhieren temporalmente a las placas metálicas antes de ascender, actuando como un escudo aislante que genera las resistencias por efecto de burbujeo (R_{b,O_2} y R_{b,H_2}). Finalmente, los iones viajan a través del líquido enfrentándose a la resistencia natural de la mezcla (R_S) y, en caso de estar presente, a la membrana física separadora de gases (R_m), de modo que, al sumar todas estas oposiciones, se obtiene el voltaje total (V_{CELDA}) que la fuente de alimentación debe entregar para mantener el equipo funcionando de manera continua y eficiente (Herraiz Cardona, 2012).

Figura 2

Circuito Eléctrico Análogo para la Electrólisis



Nota. Tomado de Herraiz Cardona (2012).

Todas estas variables operativas y pérdidas óhmicas han sido integradas en modelos semiempíricos ampliamente aceptados en la literatura, como el propuesto por Ulleberg (2003), el cual permite predecir el comportamiento de la celda con alta precisión.

Bajo un enfoque fenomenológico, la relación corriente-voltaje para un stack de electrólisis a temperatura constante calcula el voltaje total consumido por el equipo (U_{stack} , en V) multiplicando el número de celdas individuales conectadas en serie (n_c) por la suma de tres componentes principales: el voltaje reversible de la celda (U_{rev}), que representa el mínimo teórico dictado por la termodinámica para separar la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno; las pérdidas por resistencia óhmica (el término lineal); y las pérdidas por activación electroquímica (el término logarítmico). Para ello, incorpora variables operativas fundamentales como la corriente eléctrica que fluye a través del sistema (I , en A), la temperatura de operación (T) y el área activa de la superficie de los electrodos (A), la cual permite obtener la densidad de corriente mediante el cálculo I/A . Toda esta interacción de variables para definir el comportamiento del sistema se expresa matemáticamente en la Ecuación 4:

$$U_{\text{stack}} = n_c \left[U_{\text{rev}} + \frac{(r_1 + r_2 T)}{A} I + s \log \left(\frac{\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right)}{A} I + 1 \right) \right] \quad (4)$$

En esta expresión, los diversos parámetros empíricos (r_i , t_i , s) ajustan la curva teórica a los datos reales de operación. Específicamente, r_1 y r_2 modelan las caídas de voltaje causadas por la resistencia del electrolito líquido y las conexiones eléctricas, mientras que s , t_1 , t_2 y t_3 , derivados de la ecuación de Tafel, representan las pérdidas de energía asociadas a la cinética (la "fricción" de las reacciones químicas) en la superficie de los electrodos.

Por otro lado, la evaluación integral del sistema requiere considerar la eficiencia de Faraday (n_F), un parámetro adimensional con un valor entre 0 y 1 que relaciona la producción real de hidrógeno con la máxima cantidad teórica que se generaría si el 100 % de los electrones formaran hidrógeno según la Ley de Faraday. En la práctica, esta

eficiencia disminuye debido a la presencia de corrientes parásitas que no participan en la disociación del agua, y el impacto de estas pérdidas depende críticamente de la densidad de corriente y la temperatura del sistema.

Para cuantificar este comportamiento, el modelo matemático utiliza la corriente eléctrica del equipo (I , en A) y el área activa de la superficie de los electrodos (A , en m^2 o cm^2) para determinar la densidad de corriente (I/A). Esta relación se ajusta a través de parámetros empíricos de calibración específicos, donde f_2 representa la eficiencia máxima a la que tiende el sistema a altas corrientes (usualmente un valor muy cercano a 1 o el 100 %), mientras que f_1 dicta qué tan rápido cae dicha eficiencia cuando la corriente disminuye. Toda esta dinámica operativa se expresa matemáticamente mediante la Ecuación 5.

$$\eta_F = f_2 \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I}{A}\right)^2} \quad (5)$$

Utilizando el factor de corrección anteriormente mencionado, es posible ajustar la primera ley de Faraday para calcular exactamente cuánto gas hidrógeno está generando el sistema por unidad de tiempo. Este flujo molar real de hidrógeno ($\dot{n}_{H_2}$, en mol/s) se determina considerando la eficiencia de Faraday (η_F), el número de celdas conectadas en serie en el arreglo o stack (n_c), y la corriente eléctrica que ingresa al sistema (I , en A). Asimismo, se toman en cuenta el número de electrones transferidos por cada molécula de producto formada (z , que al requerir 2 electrones por molécula de H_2 , su valor asume $z = 2$) y la constante de Faraday (F , que representa la carga eléctrica de un mol de electrones). La interacción de todos estos parámetros se describe en la Ecuación 6.

Paralelamente, la estequiometría de la reacción determina que el consumo de agua y la generación de oxígeno guardan una proporción fija exacta respecto al hidrógeno generado. Basándose en la reacción química fundamental descrita en la Ecuación 1, esta igualdad establece la relación proporcional entre la materia que entra al sistema y los gases que salen. De este modo, se define la correspondencia directa entre la tasa de consumo de agua pura ($\dot{n}_{H_2O}$, en mol/s), la tasa de producción de gas hidrógeno ($\dot{n}_{H_2}$, en mol/s) y la

tasa de producción de gas oxígeno ($\dot{n}_{O_2}$, en mol/s), tal como se expresa en la Ecuación 7.

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{n_c I}{zF} \quad (6)$$

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{H_2} = 2\dot{n}_{O_2} \quad (7)$$

La eficiencia energética se define como la relación entre el requerimiento termodinámico ideal y la energía real consumida por el sistema. Para un equipo multicelda, este parámetro se calcula comparando el voltaje termoneutral (U_{tn}) multiplicado por el número de celdas (n_c), frente al voltaje real total de operación (U_{stack}), como se expresa en la Ecuación 8:

$$\eta_E = \frac{n_c U_{tn}}{U_{stack}} \quad (8)$$

Según los principios termodinámicos, el rendimiento térmico del proceso está determinado por la interacción entre la corriente y la temperatura. A temperatura constante, el incremento en la densidad de corriente necesario para aumentar la producción de hidrógeno eleva las caídas de tensión óhmicas del *stack*, reduciendo irremediablemente la eficiencia energética. En contraste, operar a mayores temperaturas manteniendo una corriente fija favorece la cinética y reduce las resistencias, mejorando el desempeño del sistema. Este comportamiento se asume bajo condiciones adiabáticas, ya que la adición de calor externo modificaría la respuesta del voltaje y alteraría la interpretación del rendimiento.

Asimismo, la capacidad de producción del equipo completo está dictada por su arquitectura eléctrica. Mientras las celdas en serie acumulan el requerimiento de voltaje, la corriente total determina la tasa de producción de gases. Así, la potencia global demandada por el electrolizador (P_{total}) se calcula como el producto entre el voltaje real total de operación del equipo (U_{stack}) y la corriente eléctrica total suministrada al sistema (I_{total}), tal como se expresa mediante la Ecuación 9.

$$P_{\text{tot}} = U_{\text{stack}} I_{\text{tot}} \quad (9)$$

3.2. Modelos del panel solar

El modelo de un diodo permite representar el comportamiento eléctrico de una celda fotovoltaica mediante un circuito equivalente. Dicho circuito está compuesto por una fuente de corriente, cuya magnitud es directamente proporcional a la irradiación solar incidente; en consecuencia, a mayor captación lumínica, mayor es la corriente fotogenerada. Además, el modelo incorpora un diodo en paralelo que representa la unión p-n del semiconductor, una resistencia en serie (R_s) y una resistencia en paralelo o *shunt* (R_{sh}). La resistencia en serie agrupa las pérdidas por el contacto metálico y la resistencia intrínseca del material, mientras que la resistencia *shunt* modela las corrientes de fuga a través de los bordes de la celda (Arias García & Pérez Abril, 2018).

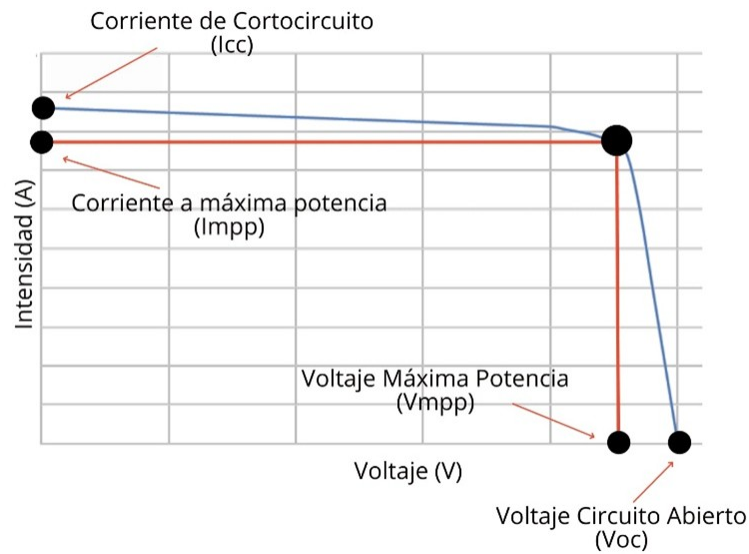
La resolución matemática de este circuito permite trazar la curva característica de corriente-voltaje (I-V) del panel, ilustrada en la Figura 3. Al analizar esta gráfica, se evidencia que el comportamiento del dispositivo no es lineal. La curva inicia en su valor máximo en el eje vertical, conocido como corriente de cortocircuito (I_{sc}), manteniéndose casi constante en un primer tramo para luego descender de forma abrupta hasta cruzar el eje horizontal en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Justo en el punto de inflexión o "punto de máxima potencia" de esta transición se ubica el Punto de Máxima Potencia (MPP, por sus siglas en inglés), el cual dicta la condición operativa exacta donde el panel entrega su mayor rendimiento energético.

Además de la irradiación, este modelo fenomenológico es fundamental para analizar la respuesta del equipo ante variaciones ambientales, particularmente térmicas. Como se observa en la Figura 4, contrario a la intuición general, los paneles fotovoltaicos operan de manera más eficiente a bajas temperaturas.

A medida que la celda se calienta, la agitación térmica interna provoca una caída drástica en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Aunque la corriente experimenta un

Figura 3

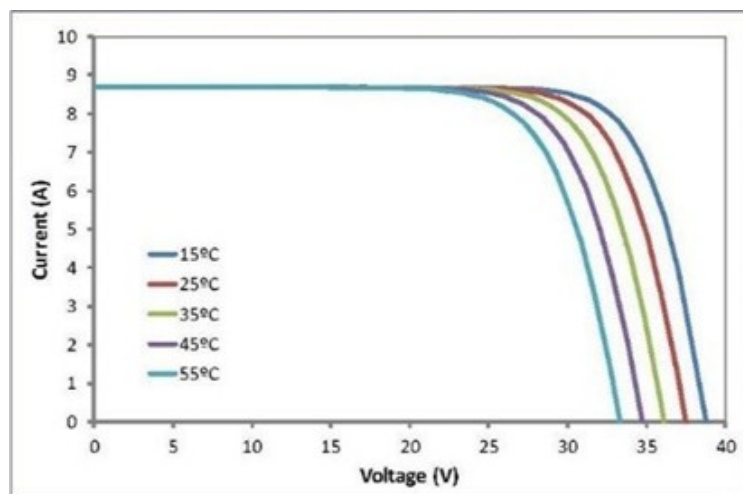
Curva Característica Corriente-Voltaje ($I-V$) de un Panel Fotovoltaico



Nota. Tomado de SunFields (2024).

Figura 4

Comportamiento de la Curva $I-V$ ante Diferentes Condiciones de Temperatura



Nota. Tomado de MonSolar (2024).

incremento casi imperceptible, el severo desplome del voltaje empuja toda la curva hacia la izquierda, reduciendo significativamente el área bajo la misma. En consecuencia, este fenómeno afecta negativamente el Punto de Máxima Potencia, disminuyendo la capacidad global de entrega de energía del dispositivo.

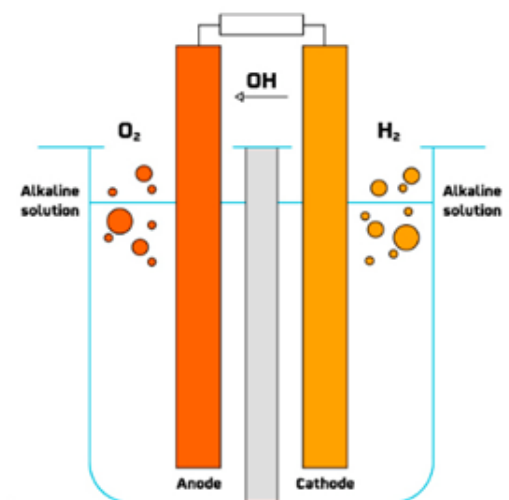
3.3. Tipos de electrolizadores

3.3.1. *Electrolizador alcalino*

Los electrolizadores alcalinos emplean una disolución alcalina, generalmente hidróxido de potasio (KOH) en concentraciones del 20 % al 30 % p/p, o hidróxido de sodio (NaOH), como electrolito líquido para facilitar el transporte iónico entre los electrodos.

Figura 5

Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador Alcalino



Nota. Tomado de Repsol (2024).

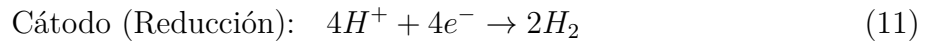
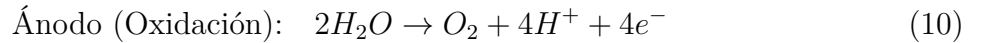
Operando en rangos de temperatura moderados, el proceso inicia en el cátodo, donde el agua se descompone generando hidrógeno gaseoso (H_2) y aniones hidróxido (OH^-); estos últimos atraviesan el diafragma poroso hacia el ánodo, donde reaccionan para formar oxígeno (O_2), como se ilustra en la Figura 5 (Caffarena Funcia, 2022). Esta tecnología se caracteriza por su madurez comercial, su simplicidad de diseño y la viabilidad

de utilizar materiales de bajo costo, lo que ha favorecido históricamente su implementación en aplicaciones industriales de gran escala.

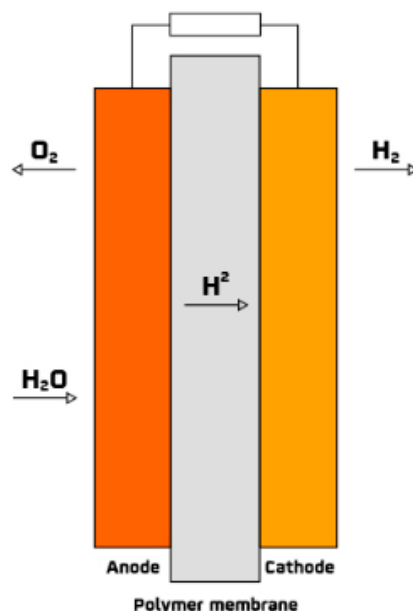
3.3.2. *Electrolizador PEM*

Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (**PEM**, por sus siglas en inglés) representan una evolución tecnológica al sustituir el electrolito líquido por un polímero sólido. En estas celdas, denominadas **PEMEC** (*Proton Exchange Membrane Electrolyzer Cells*), la membrana cumple una doble función crítica: permite la transferencia selectiva y veloz de protones (H^+) hacia el cátodo y, simultáneamente, actúa como una barrera impermeable que impide tanto el paso de electrones (e^-) como la recombinación de los gases generados (Bayat et al., 2025).

El proceso electroquímico inicia cuando el agua pura (H_2O) es alimentada al ánodo, donde experimenta una disociación catalítica por oxidación que la descompone en moléculas de oxígeno diatómico (O_2), protones o iones de hidrógeno (H^+) y electrones (e^-), tal como se describe en la Ecuación 10. Mientras los protones migran a través de la membrana hacia el cátodo (ver Figura 6), los electrones son forzados a circular por el circuito externo. Finalmente, ambas partículas se recombinan en la superficie catalítica del cátodo mediante una reacción de reducción para formar hidrógeno gaseoso (H_2) de alta pureza, como se indica en la Ecuación 11. Las reacciones químicas fundamentales que rigen este sistema son:



Esta tecnología se destaca por su alta eficiencia energética —la cual puede superar el 80 % en condiciones optimizadas—, su diseño extremadamente compacto y su notable rapidez de respuesta ante fluctuaciones de carga, lo que le otorga una elevada compatibilidad para acoplarse con fuentes de energía renovable intermitente (Bayat et al., 2025).

Figura 6*Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador PEM*

Nota. Tomado de Repsol (2024).

3.3.3. *Electrolizador SOEC*

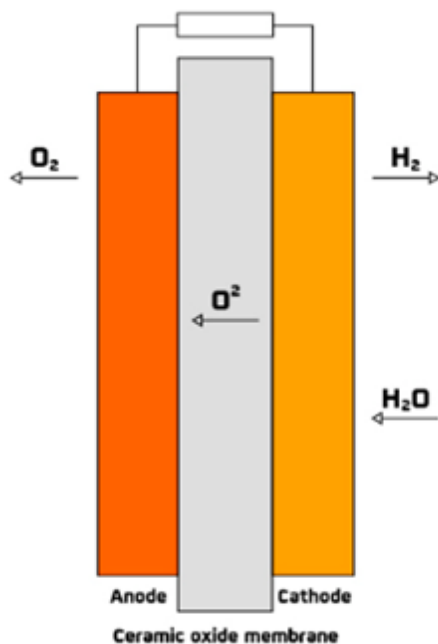
La electrólisis de óxido sólido (**SOEC**, por sus siglas en inglés) se distingue del resto de tecnologías por operar en regímenes térmicos severos, situándose habitualmente en un rango entre los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Repsol, 2024). Esta condición de alta temperatura cambia el paradigma termodinámico del proceso, permitiendo que una fracción significativa de la energía necesaria para disociar la molécula de agua provenga del calor residual externo en lugar de energía eléctrica pura, lo que incrementa sustancialmente la eficiencia global. Además, la capacidad de estas celdas cerámicas para manejar densidades de corriente excepcionalmente altas facilita el desarrollo de sistemas industriales más compactos y potentes (Ministerio de Minas y Energía, 2026).

A diferencia de los sistemas alcalinos y PEM, el funcionamiento de una celda SOEC se basa en la conducción selectiva de iones de oxígeno (O^{2-}) a través de un electrolito

cerámico sólido, tal como se esquematiza en la Figura 7. El proceso se desarrolla en tres etapas fundamentales:

Figura 7

Esquema de Funcionamiento de un Electrolizador de Óxido Sólido (SOEC)



Nota. Tomado de Repsol (2024).

El proceso de reducción en el cátodo (electrodo de combustible) ocurre cuando el agua, en estado de vapor sobrecalentado, penetra la estructura porosa de esta sección del sistema. Operar a estas altas temperaturas ofrece una ventaja termodinámica clave, ya que el calor aportado disminuye la cantidad de energía eléctrica necesaria para romper los enlaces de la molécula. Al alcanzar los sitios catalíticos activos, el agua capta los electrones provenientes del circuito externo y se disocia. Este intercambio genera hidrógeno gaseoso, que es recolectado por el equipo, e iones de oxígeno (O^{2-}), los cuales quedan posicionados en la interfaz para migrar a través del electrolito sólido. Esta reacción fundamental se describe en la Ecuación 12:

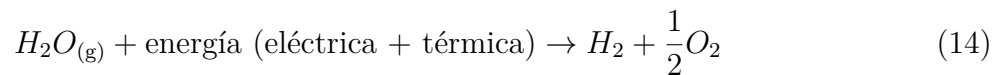


Transporte iónico: El electrolito cerámico densificado actúa como un filtro selectivo que permite únicamente la migración de los iones O^{2-} desde el cátodo hacia el ánodo, bloqueando el paso de electrones y gases.

Tras atravesar el electrolito cerámico, los iones de oxígeno (O^{2-}) ingresan al ánodo poroso, donde se oxidan continuamente. En esta interfaz, ceden sus electrones al circuito externo y se recombinan para liberar oxígeno gaseoso (O_2) puro como subproducto. Esta reacción, fundamental para mantener el flujo electrónico y cerrar el ciclo termodinámico del sistema, se expresa en la Ecuación 13:



Por otro lado, integrando el requerimiento térmico, la reacción global que define la termodinámica del sistema SOEC se expresa mediante la Ecuación 14:



3.4. Tipos de celdas fotovoltaicas.

En la Tabla 1 se proporciona información sobre tres tipos de células de silicio presente en paneles solares.

Tabla 1*Comparación de Tecnologías de Células de Silicio*

Tipo de tecnología	Descripción
Monocristalino	Se encargan de convertir la luz solar en energía eléctrica utilizando células solares hechas de un solo cristal de silicio, a diferencia de los paneles solares policristalinos, que están hechos de varias piezas de cristal de silicio fundidas juntas. Esto permite que los paneles solares monocristalinos tengan una eficiencia ligeramente mayor que los paneles solares policristalinos, lo que significa que pueden producir más energía por unidad de superficie.
Policristalino	Las células policristalinas son peculiares porque tienen los cantos formando ángulos de 90° , es decir, completamente cuadradas. Ofrecen un menor rendimiento frente a las células monocristalinas, aunque esta diferencia ya se ha ido reduciendo notablemente. Su eficiencia varía entre el 12 % y el 21 %.
Amorfo	Los paneles solares de silicio amorfo se fabrican mediante la deposición de una capa delgada de silicio sobre una superficie de soporte, que puede ser de vidrio, plástico o metal. A diferencia de otras tecnologías fotovoltaicas, este tipo de panel presenta una menor densidad de potencia, por lo que requiere una mayor superficie para generar la misma cantidad de energía eléctrica.

Nota. Adaptado de *Energía solar fotovoltaica* [Información sobre tipos de paneles monocristalinos y policristalinos], por Méndez Muñiz, s.f. Fundación Confemetal.

3.5. Componentes principales del sistema

Un sistema de electrólisis para la producción de hidrógeno verde está conformado por una serie de componentes interdependientes, cada uno de los cuales cumple una función específica y crítica para garantizar una operación eficiente y segura.

3.5.1. *Electrolito alcalino*

El electrolito es el medio acuoso que habilita el transporte iónico dentro del electrolizador, cerrando el circuito eléctrico interno. Para los sistemas alcalinos, se emplea típicamente una disolución de hidróxido de potasio (KOH) en agua destilada. Aunque a nivel industrial se reportan concentraciones del 25 % al 30 % en peso para maximizar la conductividad a altas temperaturas (Soto Alegre, 2020), en sistemas a escala de laboratorio o prototipos experimentales es común operar con concentraciones ligeramente inferiores (en torno al 20 %). Esto proporciona un equilibrio operativo óptimo: garantiza una excelente conductividad iónica mientras minimiza el poder corrosivo del fluido, favoreciendo la estabilidad térmica y prolongando la vida útil de los materiales de sellado.

3.5.2. *Diafragma separador*

El separador, o diafragma, es una membrana semipermeable cuya función principal es impedir el cruce físico (*crossover*) y la consecuente mezcla explosiva entre el hidrógeno (H_2) y el oxígeno (O_2) generados durante la disociación. Simultáneamente, su estructura microscópica permite el libre tránsito de los aniones hidróxido (OH^-) entre los electrodos. La integridad de este componente es fundamental para garantizar tanto la pureza de los gases recolectados como la seguridad operativa del sistema (Retema, 2024).

3.5.3. *Stack de electrólisis*

El *stack* (o pila) de electrólisis constituye el núcleo del sistema (Sánchez et al., 2017). Este componente está conformado por un arreglo modular de múltiples celdas electroquímicas dispuestas convencionalmente en serie. Al aplicar una corriente eléctrica continua a través del arreglo, la caída de tensión en cada celda provoca la ruptura de la

molécula de agua, liberando oxígeno en los ánodos e hidrógeno en los cátodos. La cantidad de celdas conectadas determina el requerimiento de voltaje total del equipo, mientras que el área activa de los electrodos dicta la capacidad de flujo de corriente y, en consecuencia, la tasa global de producción de gases.

3.5.4. Sistema de almacenamiento (Batería)

Una batería es un dispositivo que almacena energía química para liberarla como energía eléctrica de corriente continua mediante reacciones reversibles de óxido-reducción (Iglesias et al., 2020). En configuraciones acopladas a fuentes de energía renovable, la batería cumple un rol dual: actúa como sistema de almacenamiento para suplir energía cuando la irradiación es nula, y funciona como un amortiguador térmico y eléctrico. Esta capacidad de regulación absorbe la intermitencia inherente de los paneles solares, suministrando al electrolizador un perfil de tensión estable. Esto evita fluctuaciones extremas en la densidad de corriente que podrían degradar prematuramente los electrodos.

3.5.5. Panel fotovoltaico

El módulo fotovoltaico es el componente encargado de captar la radiación solar incidente y transformarla directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. Los fotones captados excitan los electrones del material semiconductor, generando la potencia eléctrica que actúa como fuerza impulsora externa para la separación de las moléculas de agua. Su integración permite que el vector energético producido adquiriera la denominación de hidrógeno verde, al provenir de un proceso impulsado íntegramente por una fuente primaria renovable y libre de emisiones de carbono (Chaparro Pérez & Suarez Botello, 2025).

4. Marco referencial

El trabajo desarrollado por Esteban Torres López y Gutiérrez Jiménez (2021) consistió en diseñar y construir un prototipo funcional de una celda electrolizadora para generar hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis del agua, concebido para operar con energía solar fotovoltaica y con monitoreo de la temperatura como variable clave para evaluar los rangos de operación y la eficiencia del sistema.

En el proyecto de Martín Martín (2023) se plantea que, para considerar el hidrógeno como “verde”, la energía empleada en su producción debe provenir de fuentes renovables. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se presenta como una alternativa viable, ya que convierte la radiación solar en energía eléctrica de forma directa, sin requerir procesos mecánicos con partes móviles. Sin embargo, su integración con un sistema de electrólisis exige evaluar las condiciones eléctricas requeridas por la celda, principalmente voltaje y corriente, y verificar su compatibilidad con la fuente renovable para asegurar una operación estable y eficiente.

El trabajo realizado por González Besa (2016) se enfoca específicamente en analizar cómo los parámetros de la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico influyen en la producción diaria de hidrógeno, comparando dos escenarios operativos representativos: un día soleado y un día nublado, diferenciados por su nivel de irradiancia. Además, se estudia el impacto del tipo de acople entre el generador fotovoltaico y el electrolizador, evaluando el comportamiento del sistema en acople directo, sin electrónica de potencia intermedia, y en acople indirecto, con una etapa de acondicionamiento eléctrico, con el fin de observar cómo varía la producción de H_2 bajo condiciones operativas cambiantes.

En el trabajo de grado de Orduz Ríos y González Mantilla (2023), la generación de hidrógeno verde se plantea principalmente mediante la electrólisis del agua, es decir, utilizando una fuente de energía eléctrica para separar el agua en hidrógeno, en el electrodo negativo, y oxígeno, en el electrodo positivo, de modo que el H_2 obtenido no implique emisiones directas de CO_2 asociadas al proceso. Asimismo, el documento describe que esta

producción puede realizarse mediante diferentes tecnologías de electrolizador, destacando el electrolizador alcalino como una alternativa que utiliza una solución alcalina, como KOH o NaOH, como electrolito para producir H_2 y O_2 a partir del agua. Este planteamiento sirve como base conceptual para justificar el desarrollo de un proyecto enfocado en un electrolizador alcalino por celdas. Finalmente, el trabajo enfatiza que, para que el hidrógeno pueda considerarse realmente “verde”, el sistema de electrólisis debe alimentarse con una fuente de energía renovable.

5. Metodología

Para alcanzar los objetivos trazados en este proyecto, se estableció la metodología que se detalla a continuación.

5.1. Alcance de la investigación

El proyecto adopta un enfoque cuantitativo orientado a medir la producción de hidrógeno, así como la potencia eléctrica generada y consumida durante el proceso de electrólisis.

El banco experimental tiene un alcance de tipo explicativo, ya que busca establecer las variables que influyen en mayor y menor grado en la producción de hidrógeno. Esto se lleva a cabo tanto de manera teórica como experimental, mediante la evaluación del panel fotovoltaico y el apoyo de herramientas de análisis para estudiar el comportamiento de las diferentes variables.

Este banco experimental está equipado con un panel fotovoltaico de $1482 \times 676 \times 40$ mm, con una potencia máxima de 150 W, montado sobre un bastidor. Adicionalmente, cuenta con el electrolizador, burbujeadores, mangueras y demás accesorios necesarios para interconectar los componentes de la planta, abarcando tanto el subsistema de generación de energía como el de producción de hidrógeno.

5.2. Descripción detallada del sistema

La planta está conformada por dos subsistemas. El primero corresponde al sistema de generación, compuesto por un panel fotovoltaico cuya función es captar la radiación solar directa y transformarla en energía eléctrica. Este panel se encuentra montado sobre un bastidor que le brinda soporte estructural y permite mantener fijo el ángulo de inclinación adecuado para la óptima captación solar.

El segundo subsistema corresponde al sistema de producción de hidrógeno, el cual utiliza la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico para alimentar el electrolizador. Este dispositivo se encarga de separar las moléculas de agua (H_2O), obteniendo hidrógeno molecular como resultado del proceso electroquímico.

5.3. Planteamiento de alternativas

Para la selección y desarrollo del prototipo de electrolizador, se analizaron tres tecnologías comerciales, evaluando sus respectivas ventajas y desventajas. El diseño final es de autoría propia, fundamentado en los principios operativos de los modelos estudiados.

5.3.1. *Alternativa 1. Electrolizador Alcalino*

Es la opción más simple y común gracias a su madurez técnica y a la facilidad para conseguir los materiales necesarios para su fabricación. Destaca el uso de electrodos de acero inoxidable, que son los más comerciales en la industria, y de acrílico para la estructura, entre otros materiales posibles. El electrolito, de igual forma, suele ser una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH).

Figura 8

Electrolizador alcalino



Nota. Tomado de Repsol, 2024.

Entre sus principales ventajas destaca que no requiere metales preciosos costosos y que permite una construcción sencilla y relativamente económica. En la Figura 8 se observa

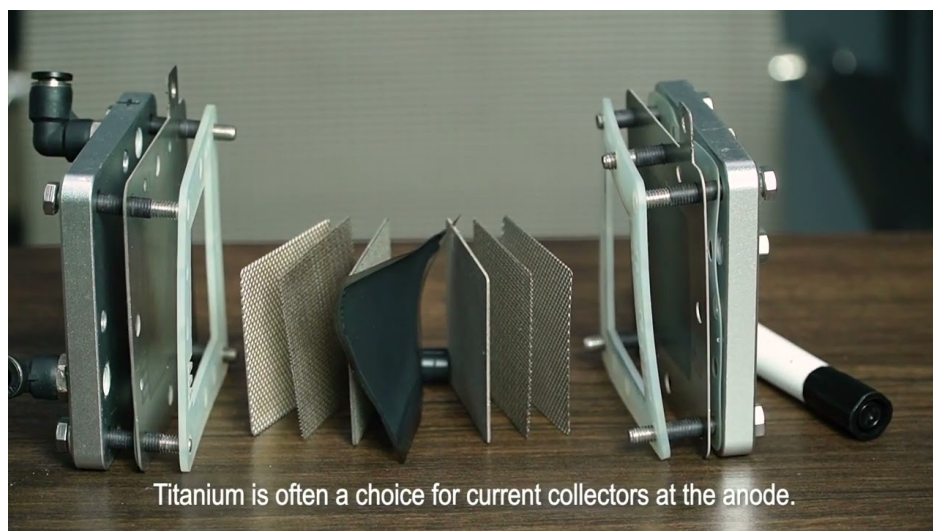
una estructura cilíndrica denominada *stack* o pila, la cual está compuesta por múltiples celdas de electrólisis conectadas en serie.

5.3.2. *Alternativa 2. Electrolizador PEM (Proton Exchange Membrane)*

Es una opción más moderna desde el punto de vista tecnológico y ofrece una mayor eficiencia. Aunque el diseño del sistema puede ser más compacto, en términos de costos y suministro de materiales resulta más complejo. Requiere catalizadores de metales nobles como platino (Pt) e iridio (Ir), además de membranas especializadas como Nafion, lo que eleva considerablemente los costos de ensamble. Asimismo, necesita agua ultrapura (desionizada) para evitar daños irreversibles en la membrana.

Figura 9

Electrolizador tipo PEM



Nota. Tomado de Senza Hydrogen, 2024.

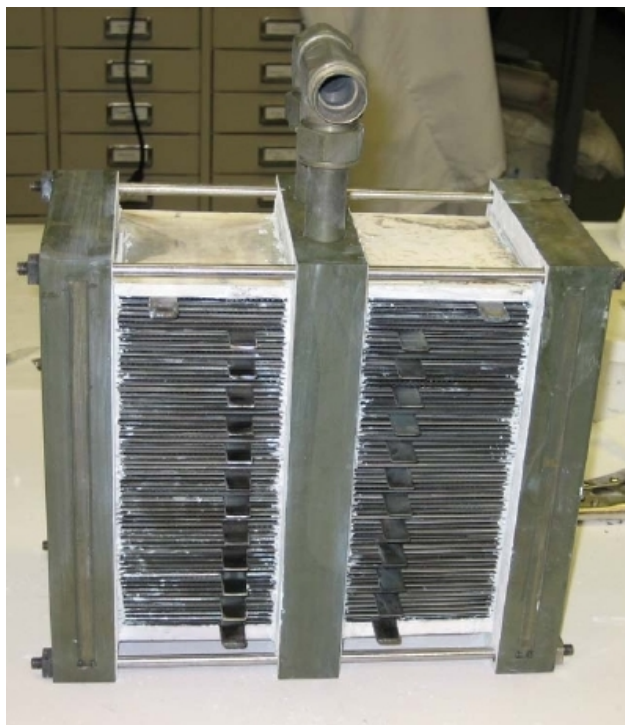
En la Figura 9 se presenta una vista explosionada de este tipo de electrolizador, en la cual se identifican los componentes previamente mencionados que, al ensamblarse, permiten la producción de hidrógeno.

5.3.3. *Alternativa 3. Electrolizador SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell)*

Como se aprecia en la Figura 10, este tipo de electrolizador representa la opción más compleja desde el punto de vista técnico debido a sus exigentes condiciones operativas. Funciona a altas temperaturas y requiere materiales cerámicos avanzados capaces de soportar choques térmicos, así como sistemas de sellado rigurosos para evitar fugas bajo dichas condiciones.

Figura 10

Electrolizador tipo SOEC



Nota. Tomado de Wikipedia contributors, 2024.

Entre sus principales inconvenientes resalta que es una tecnología relativamente nueva y en fase de desarrollo en comparación con los sistemas alcalinos y PEM.

5.4. Selección de alternativas del sistema

Para la selección de la alternativa óptima se empleó una matriz de Pugh. Para ello, se definieron criterios de diseño específicos y se les asignó una ponderación porcentual

según su relevancia para el proyecto. Los criterios evaluados son: facilidad de construcción (25 %), costo de materiales (20 %), tiempo de ejecución (20 %), disponibilidad de insumos (15 %), seguridad operativa (10 %) y, finalmente, mantenimiento (10 %), tal como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2

Matriz de Evaluación de Tecnologías de Electrólisis

Criterio	Peso	Alcalino	Pje.	PEM	Pje.	SOEC	Pje.
	(%)	(1-5)	Alc.	(1-5)	PEM	(1-5)	SOEC
Facilidad de construcción	25						
Costo de materiales	20						
Tiempo de ejecución	20						
Disponibilidad de insumos	15						
Seguridad operativa	10						
Mantenimiento	10						
Total	100						

Nota. Alc. = Alcalino. Esta tabla presenta la matriz de evaluación de las tecnologías de electrólisis con base en criterios de diseño.

5.5. Selección de elementos y materiales del sistema de generación fotovoltaica y electrólisis

Resulta fundamental definir el tipo de material adecuado para las placas de los electrodos, los empaques, la estructura de soporte del panel fotovoltaico, entre otros componentes esenciales. Para la toma de estas decisiones se implementó una matriz de Pugh, la cual permite evaluar sistemáticamente cada opción. En la Tabla 3 se expone el formato utilizado para las placas, donde se consideraron como criterios de diseño: el costo

(40 %), las ventajas de aplicación (30 %) y la facilidad de entrega (30 %). Esta misma estructura metodológica se empleó para la selección de los empaques y demás partes del sistema.

Tabla 3

Matriz de selección de material para las placas del electrolizador

Opción	Material	Evaluación	Criterios de selección			
			Costo	Facilidad de	Ventajas de	Puntaje
			(40 %)	entrega (30 %)	aplicación (30 %)	Total
A	[Material A]	Nota/Puntaje				
B	[Material B]	Nota/Puntaje				
C	[Material C]	Nota/Puntaje				
D	[Material D]	Nota/Puntaje				

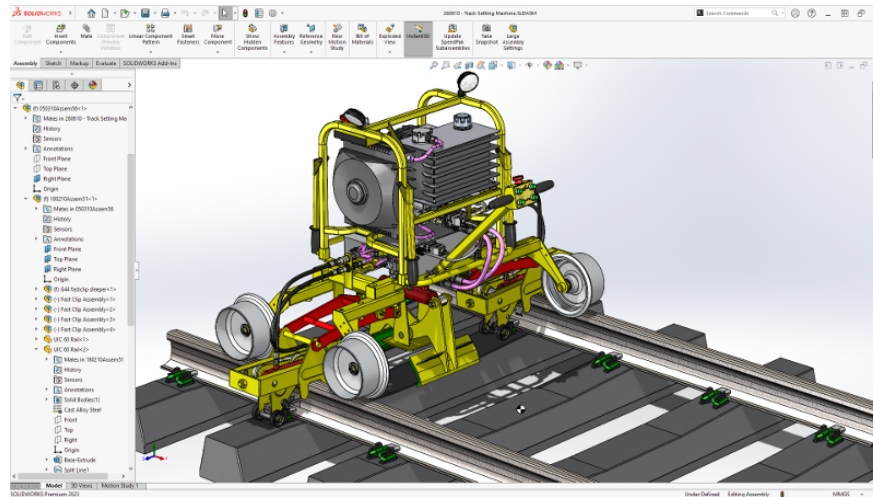
Nota. La columna “Evaluación” detalla la nota bruta frente al puntaje ponderado. [Aquí puedes explicar la escala de calificación utilizada, ej. 1 al 5, y justificar brevemente la facilidad de entrega para el proyecto].

5.6. Diseño en SolidWorks

Previo a la etapa de fabricación física, es estrictamente necesario diseñar las piezas del electrolizador con precisión. Para este propósito se emplea el software de modelado 3D SolidWorks (ver Figura 11).

Figura 11

Plataforma de modelado SolidWorks 3D



Nota. Software de diseño asistido por computadora (CAD).

Una vez definidos los materiales y con el diseño detallado de las piezas individuales y del ensamblaje final completado, se procede a su manufactura para el posterior montaje en el banco experimental.

5.7. Montaje de los subsistemas

En esta fase, disponiendo de todas las piezas manufacturadas y los componentes periféricos, se procede a la integración mecánica y eléctrica del banco para su posterior puesta en marcha.

5.7.1. Montaje del electrolizador y burbujeadores

A partir de las placas de los electrodos, los empaques de sellado, las estructuras mecanizadas en acrílico y la tornillería correspondiente (tornillos, tuercas y arandelas), junto con los acoples y líneas de manguera, se lleva a cabo el ensamblaje estructural tanto del electrolizador *stack* como de los recipientes burbujeadores encargados del acondicionamiento del gas.

5.7.2. Montaje del panel fotovoltaico y conexiones eléctricas

En esta etapa se instala la fuente de energía renovable correspondiente al panel fotovoltaico. Se establecen las conexiones eléctricas hacia el sistema de almacenamiento (batería) y hacia el electrolizador, garantizando el suministro energético continuo requerido para la separación de la molécula de agua. Dado el tamaño del panel fotovoltaico, es imperativo montarlo sobre un bastidor o estructura de soporte robusta que le brinde estabilidad y permita asegurar el ángulo de inclinación idóneo para maximizar la captación de radiación solar.

5.8. Modelado del electrolizador y el panel fotovoltaico

El modelado matemático es una herramienta fundamental que permite predecir y explicar el comportamiento dinámico de una planta. En este proyecto se desarrollan dos modelos principales: el del panel fotovoltaico y el del electrolizador, ambos implementados en el entorno de simulación MATLAB/Simulink.

Este enfoque, que facilita la estimación de parámetros empíricos para las curvas de polarización, permitirá explicar con rigor el comportamiento electroquímico e identificar cuáles variables operativas predominan y tienen mayor impacto en la eficiencia de la generación de hidrógeno verde, mejorando así el análisis de los datos experimentales recopilados.

5.9. Identificación de variables dependientes e independientes

En primer lugar, la ecuación base que relaciona las diferentes variables que interactúan en el electrolizador es la presentada en la Ecuación 4. Esta corresponde a un modelo matemático empírico diseñado para describir el comportamiento eléctrico de un electrolizador alcalino, permitiendo determinar el voltaje total consumido por el *stack* de 5 celdas en función de la corriente inyectada y de la temperatura de operación.

Entre las variables dependientes se encuentra el voltaje, ya que este responde al comportamiento de las demás variables del sistema. Su valor total depende de factores como la resistencia interna del equipo, las propiedades del electrolito, el material de los

electrodos, la temperatura de operación, así como de la viscosidad y conductividad de la solución, las cuales influyen en la facilidad con la que la corriente eléctrica logra disociar la molécula de agua (H_2O). Cabe destacar que, debido a la configuración de una única salida en el prototipo experimental, los gases generados se liberan en forma de mezcla (oxihidrógeno); no obstante, el parámetro central de análisis es la producción de hidrógeno, cuya magnitud se cuantifica a partir del caudal total mediante relaciones estequiométricas y aproximaciones teóricas.

Al analizar la ecuación, se observa que el voltaje corresponde al resultado del sistema; por tanto, si variables como la corriente o la temperatura cambian, el voltaje responde en consecuencia para mantener el equilibrio termodinámico y eléctrico.

La corriente, al analizar la Ecuación 4, no depende directamente de las demás variables internas del modelo, sino de la fuente de alimentación. En este caso, al contar con un panel fotovoltaico que alimenta el *stack* de electrólisis, la corriente suministrada está dictada por la irradiancia solar recibida. Por ello, a mayor captación de energía solar, mayor será la corriente generada; mientras que en condiciones climáticas adversas, como presencia de nubes o baja radiación, la corriente disminuye.

Al observar las gráficas 27 y 28, se evidencia que una mayor irradiancia se traduce en una mayor producción calculada de hidrógeno. Asimismo, aunque el aumento de la temperatura favorece la cinética de la electrólisis, también puede reducir la eficiencia del panel fotovoltaico térmicamente acoplado y, por tanto, disminuir la energía entregada. De esta manera, la corriente eléctrica actúa como una variable independiente impuesta por la fuente de alimentación, la cual, a su vez, está fuertemente condicionada por factores ambientales.

La temperatura, en este mismo sentido, se considera una condición de contorno, ya que corresponde a un dato medido o establecido para que el modelo matemático se ajuste a la realidad física de la planta. Las celdas de electrólisis, al permitir el paso de corriente, experimentan calentamiento por efecto Joule; esto incrementa la temperatura de los

electrodos y transfiere calor térmico al electrolito líquido.

Por esta razón, la temperatura depende del tiempo de operación del equipo, de la magnitud de la corriente que circula por el *stack* y de las condiciones de disipación térmica. En consecuencia, esta variable influye directamente en el comportamiento electroquímico, reduciendo el sobrepotencial y afectando la eficiencia global del proceso de producción de hidrógeno.

Por su parte, las constantes r_1 , r_2 , t_1 , t_2 y t_3 corresponden a parámetros empíricos que deben ser estimados mediante herramientas de regresión y *software* de simulación. Estas constantes agrupan los valores asociados a las resistencias óhmicas internas y a los coeficientes de sobrevoltaje de activación de todo el *stack*. Específicamente, permiten modelar cómo varían las pérdidas de energía ante los cambios de temperatura, describiendo con alta fidelidad la curva de polarización del electrolizador bajo diferentes regímenes de operación.

En la Tabla 4 se presenta la clasificación consolidada de todas las variables y parámetros considerados en el modelado de la planta.

Tabla 4

Variables y parámetros del modelo matemático de Ulleberg

Categoría	Variable / Parámetro	Símbolo
Variable dependiente	Voltaje total del <i>stack</i> (5 celdas)	V_{stack}
Variable independiente	Corriente de operación / Densidad	I / i
Variable independiente	Temperatura del electrolito	T
Constantes / Parámetros	Coeficientes de resistencia óhmica	r_1, r_2
Constantes / Parámetros	Coeficientes de activación (Tafel)	t_1, t_2, t_3
Constante termodinámica	Voltaje reversible	V_{rev}

5.10. Diseño experimental

Para la validación del sistema, se plantea un diseño experimental que garantice la confiabilidad de los resultados y proporcione una base comparativa sólida entre los diferentes regímenes de alimentación. Este diseño permite caracterizar sistemáticamente el comportamiento del electrolizador, asegurando que las variaciones observadas en el voltaje del *stack* puedan ser analizadas bajo rigurosos criterios técnicos, facilitando así la estimación de parámetros y la correlación con el modelo matemático.

Dado que en este proyecto no es posible manipular de forma directa e independiente las condiciones de suministro energético con una fuente de laboratorio convencional, se adopta un enfoque observacional con características cuasi-experimentales. La operación del sistema depende intrínsecamente de las condiciones solares directas y de la regulación de la batería. Por consiguiente, la irradiancia se asume como una variable independiente externa, gobernada por el entorno.

El diseño se clasifica como cuasi-experimental porque la metodología se adapta a las condiciones reales de intemperie para evaluar el comportamiento transitorio de la planta, alejándose del control absoluto característico de un entorno de laboratorio aislado.

- **Tipo de diseño:** Factorial multinivel (3x2).
- **Factores controlados (Variables independientes):**
 - Concentración del electrolito: 20 %, 25 % y 30 % de KOH en peso.
 - Tipo de acoplamiento eléctrico: Directo (panel fotovoltaico) e indirecto (batería).
- **Variables de respuesta (Variables dependientes):**
 - Voltaje total del *stack*.
 - Producción de hidrógeno (estimada estequiométricamente) y eficiencia energética.

Tabla 5*Matriz de planificación de ensayos experimentales*

Configuración	Alimentación	Conc. KOH (%)	Condición climática	N° de ensayos
1	Batería	20	Estable (Control)	3
2	Batería	25	Estable (Control)	3
3	Batería	30	Estable (Control)	3
4	Panel directo	20	Nublado	3
5	Panel directo	25	2 soleados / 1 nublado	3
6	Panel directo	30	Semisoleado	3

Para la ejecución de estas pruebas se establecieron dos bloques experimentales claramente diferenciados. El primer bloque funciona como grupo de control, garantizando una alimentación eléctrica estable proveniente de la batería; el objetivo principal de esta etapa es aislar las variables eléctricas y evaluar de forma independiente el efecto que tiene la variación en la concentración del electrolito (KOH) sobre el volumen de gas mixto generado y, por consiguiente, sobre el cálculo estequiométrico del hidrógeno.

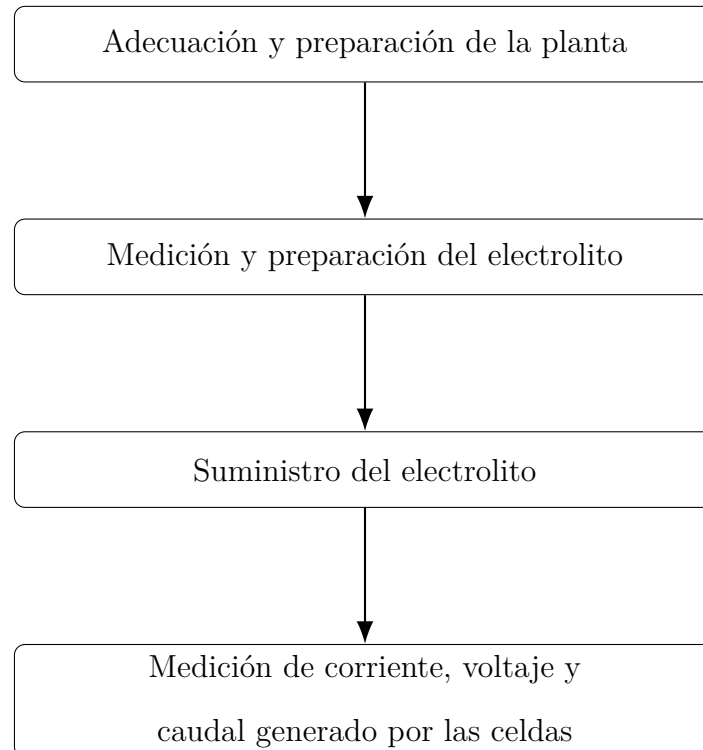
El segundo bloque está diseñado para analizar el comportamiento dinámico de la planta bajo condiciones de irradiancia fluctuante, típicas de ambientes nublados, soleados y semisoleados. En estos escenarios, la corriente eléctrica experimenta cambios transitorios abruptos. Esta perturbación sistemática permite observar la velocidad de respuesta del voltaje del *stack* y medir las variaciones en los caudales generados para estimar la producción efectiva de hidrógeno, obteniendo así los datos empíricos necesarios para alimentar y validar la Ecuación 4.

5.11. Evaluación.

Para la realización de las pruebas e implementar el diseño experimental, se plantea el protocolo de pruebas de la figura 12.

Figura 12

Flujograma del Protocolo de Pruebas



Nota. Protocolo establecido para la evaluación experimental de la planta.

6. Resultados

Este capítulo detalla el proceso de diseño, parametrización y evaluación del banco experimental. En primer lugar, se expone el diseño de la planta, abarcando desde la selección justificada de materiales y componentes, hasta el modelado asistido por computadora (CAD) en SolidWorks y su posterior ensamblaje. De manera complementaria, se presenta el modelado matemático del sistema mediante la herramienta Simulink de MATLAB. Finalmente, se exponen y analizan los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, tomando como referencia de validación los modelos previamente desarrollados.

6.1. Selección de la tecnología de electrólisis

Tras la evaluación de las tres alternativas tecnológicas consideradas en el marco teórico (Alcalina, PEM y SOEC), se seleccionó el electrolizador alcalino como la opción más adecuada para el desarrollo del proyecto. Como se evidencia en la Tabla 6, esta decisión se sustenta en su superioridad frente a los criterios de facilidad de construcción, costos de materiales y viabilidad de manufactura a escala de laboratorio.

Consecuente con esta selección, se definió el uso de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito acuoso. Esta solución representa la alternativa técnicamente más viable para la operación del prototipo, ofreciendo un equilibrio óptimo entre bajo costo, alta disponibilidad en el mercado de reactivos y un excelente desempeño en términos de conductividad iónica.

6.2. Selección de materiales y componentes del sistema

En esta fase de diseño, se emplearon matrices de decisión ponderadas para seleccionar los componentes clave del sistema de electrólisis y de almacenamiento. A cada opción se le asignaron puntajes (del 1 al 5) según su desempeño frente a criterios preestablecidos de costo, disponibilidad y ventajas técnicas; la alternativa con la mayor calificación global determinó el material final para la fabricación del prototipo.

Tabla 6*Comparación de Tecnologías de Electrólisis*

Criterio	Peso (%)	Alcalino (1-5)	Pje. Alc. (1-5)	PEM (1-5)	Pje. PEM (1-5)	SOEC (1-5)	Pje. SOEC (1-5)
Facilidad de construcción	25	5	1.25	3	0.75	1	0.25
Costo de materiales	20	5	1.00	2	0.40	1	0.20
Tiempo de ejecución	20	5	1.00	3	0.60	1	0.20
Disponibilidad de insumos	15	5	0.75	2	0.30	1	0.15
Seguridad operativa	10	4	0.40	4	0.40	1	0.10
Mantenimiento	10	4	0.40	3	0.30	2	0.20
Total	100		4.80		2.75		1.10

Nota. Alc. = Alcalino; Pje. = Puntaje ponderado. La evaluación se realizó mediante una escala del 1 al 5, donde 5 representa la condición más favorable o de menor dificultad para la manufactura de un prototipo a escala de laboratorio.

6.2.1. Material para las placas de los electrodos

Con el fin de determinar el material más adecuado para las placas conductoras del electrolizador, se evaluaron cuatro alternativas metálicas: acero inoxidable AISI 316, acero inoxidable AISI 430, acero inoxidable AISI 304 y Níquel puro. Desde una perspectiva estrictamente electroquímica, el Níquel y el acero AISI 316 destacan como las opciones más favorables para operar bajo el estrés corrosivo de electrolitos fuertes como el KOH. En contraste, el acero AISI 304 está diseñado para aplicaciones de menor exigencia química, y el AISI 430 presenta el comportamiento más deficiente frente a la corrosión sostenida.

No obstante, al aplicar la matriz de selección (ver Tabla 7) integrando los pesos paramétricos del proyecto, el acero inoxidable AISI 304 obtuvo el mayor puntaje total

(3.8). Por consiguiente, fue el material seleccionado, ya que garantiza un desempeño mecánico y eléctrico suficiente para ensayos experimentales a corto y mediano plazo, a la vez que representa la opción más equilibrada considerando las restricciones de presupuesto y disponibilidad local.

Tabla 7

Matriz de Selección de Material para las Placas del Electrolizador

Opción	Material	Criterios de selección			
		Costo	Facilidad de	Ventajas de	Puntaje
		(40 %)	entrega (30 %)	aplicación (30 %)	Total
A	AISI 316	4	5	3	4.0
B	AISI 430	2	4	4	3.2
C	AISI 304	5	4	2	3.8
D	Níquel	1	2	5	2.5

Nota. La evaluación se realizó mediante una escala del 1 al 5, donde 1 representa la condición más desfavorable y 5 la condición más óptima. El puntaje total se calculó sumando el producto de cada calificación por el peso porcentual de su criterio respectivo.

6.2.2. Material para los empaques del electrolizador

Para garantizar el sellado hermético entre las celdas, se consideraron tres elastómeros y polímeros comerciales: Neopreno, EPDM y PTFE (Teflón). Estas opciones fueron evaluadas bajo los mismos criterios ponderados, cuyos resultados se exponen en la Tabla 8.

De acuerdo con el análisis, el Neopreno obtuvo la mayor calificación global (3.7), superando al EPDM (3.6) y al PTFE (3.2). En consecuencia, se seleccionó como el material definitivo para troquelar los empaques de la pila, fundamentando la decisión en su

naturaleza elastomérica que facilita el sellado mecánico bajo compresión manual, sumado a su bajo costo y alta disponibilidad.

Tabla 8

Matriz de Selección de Material para los Empaques del Electrolizador

Opción	Material	Criterios de selección			
		Costo	Facilidad de	Ventajas de	Puntaje
		(40 %)	entrega (30 %)	aplicación (30 %)	Total
A	Neopreno	4	4	3	3.7
B	EPDM	3	4	4	3.6
C	PTFE	2	3	5	3.2

Nota. La evaluación se realizó mediante una escala del 1 al 5. Aunque el PTFE presenta la mayor resistencia química frente al electrolito alcalino, el Neopreno obtuvo el mayor puntaje global debido a su bajo costo, disponibilidad comercial y su naturaleza elastomérica, la cual facilita un sellado hermético bajo presiones de ensamble manual.

6.2.3. Material para las tapas del electrolizador

Para la fabricación de las placas de contención en los extremos del *stack* (tapas), se evaluaron tres materiales poliméricos de ingeniería: Acrílico, PVDF y PTFE. Tal como se consolida en la Tabla 9, el acrílico lideró contundentemente la matriz de decisión con un puntaje de 4.1, por encima del PVDF (2.9) y el PTFE (2.8). Su selección final obedece no solo a su viabilidad económica, sino a una ventaja técnica insustituible para el proyecto: su grado de transparencia óptica, característica que permite inspeccionar visualmente la dinámica de fluidos y la formación de burbujas en el interior de la celda durante los ensayos.

Tabla 9*Matriz de Selección de Material para las Tapas del Electrolizador*

Opción	Material	Criterios de selección			
		Costo	Facilidad de	Ventajas de	Puntaje
		(40 %)	entrega (30 %)	aplicación (30 %)	Total
A	Acrílico	5	5	2	4.1
B	PVDF	2	2	5	2.9
C	PTFE	1	3	5	2.8

Nota. La evaluación se realizó mediante una escala del 1 al 5. Aunque el PVDF y el PTFE poseen una resistencia química superior frente a soluciones alcalinas, el acrílico obtuvo la mayor puntuación debido a su alta maquinabilidad, bajo costo logístico y su transparencia, característica fundamental para permitir la inspección visual del fluido durante la operación empírica.

6.2.4. Selección del sistema de almacenamiento (Batería)

El protocolo experimental contempla el análisis del electrolizador bajo alimentación fotovoltaica directa ante diferentes condiciones de irradiación y nubosidad. Sin embargo, para establecer una línea base de eficiencia y garantizar una entrega de potencia ininterrumpida que supla las caídas de tensión de la fuente solar, se definió la incorporación de un sistema de almacenamiento primario.

Como se observa en la Tabla 10, se evaluaron tres tecnologías de baterías de 12 V. La tecnología de malla de fibra de vidrio absorbente (AGM) de ciclo profundo fue la ganadora con 4.3 puntos, descartando a las costosas celdas de Litio-Ferrofosfato (LiFePO_4). Esta batería permite estabilizar la alimentación del electrolizador, fungiendo como el grupo de control principal para la obtención paramétrica de las curvas de desempeño antes de someter la planta a la intermitencia climática.

Tabla 10*Matriz de Selección del Sistema de Almacenamiento Energético*

Opción	Tecnología de la Batería	Criterios de selección			
		Costo	Facilidad de	Ventajas de	Puntaje
		(40 %)	entrega (30 %)	aplicación (30 %)	Total
A	Ciclo profundo 12 V 35 Ah	4	4	4	4.0
B	AGM 12 V 33–35 Ah	4	5	4	4.3
C	LiFePO ₄ 12 V 30 Ah	2	3	5	3.2

Nota. La evaluación se realizó mediante una escala del 1 al 5. Aunque la tecnología LiFePO₄ ofrece una mayor densidad energética, las baterías AGM destacan por su excelente disponibilidad comercial y rentabilidad. Asimismo, para un banco experimental operando a una tensión constante en torno a los 10 V y consumos promedio de 2.14 A, una capacidad de 33–35 Ah garantiza una amplia autonomía de prueba y mantiene las descargas en un rango superficial seguro.

6.3. Montaje de los subsistemas

Una vez culminada la fase de diseño y mecanizado de las piezas, se procedió a la integración física del banco de pruebas. Este proceso requirió el uso de tornillería en acero inoxidable (tornillos, tuercas y arandelas) y el roscado de las tapas de acrílico para garantizar el acople hermético de los racores y boquillas neumáticas. Toda la planificación del proyecto convergió en esta etapa de ensamblaje, la cual se dividió en la instalación de la fuente fotovoltaica, la conformación del electrolizador y el montaje de los dispositivos de seguridad.

6.3.1. Montaje del electrolizador y burbujeadores

El gas hidrógeno generado en los cátodos de la celda es transportado a través de mangueras hidráulicas hacia dispositivos acondicionadores conocidos como burbujeadores.

Estos elementos cumplen una doble función crítica en la operación del prototipo. Primero, actúan como trampas cortafuegos para evitar que un eventual retroceso de llama alcance el stack, protegiendo la integridad del equipo. Segundo, funcionan como lavadores de gas, despojando al hidrógeno de posibles trazas de soda cáustica o KOH arrastradas desde el electrolito, lo que garantiza una salida de alta pureza y previene la corrosión en el resto del circuito.

Estructuralmente, ambos dispositivos fueron manufacturados en placas de acrílico transparente para permitir una inspección visual constante del nivel de fluido y la dinámica del sistema durante los ensayos. Para asegurar una hermeticidad total ante la presión del gas, el ensamblaje se selló con juntas de neopreno bajo compresión mediante un arreglo de tornillería perimetral. El despiece técnico de las tapas y el marco de estos elementos se detalla en las Figuras 13, 14 y 15.

Figura 13

Tapa en Acrílico Delantera del Burbujeador

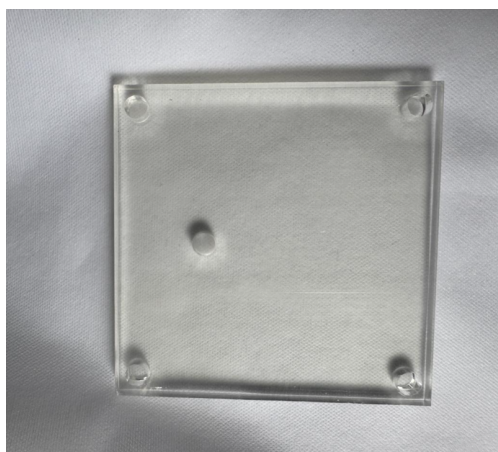
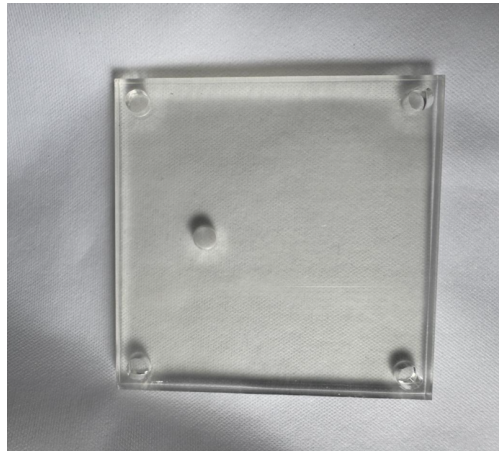
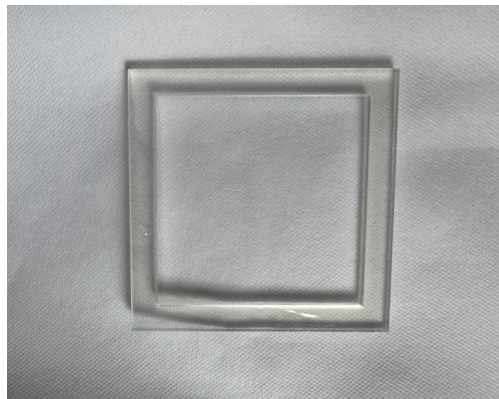


Figura 14

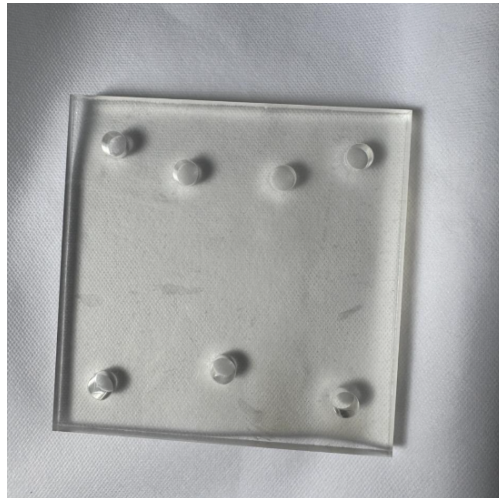
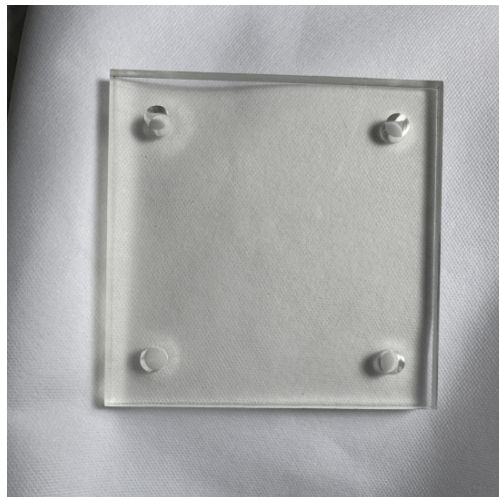
Tapa en Acrílico Trasera del Burbujeador

**Figura 15**

Marco Central para el Burbujeador



De manera análoga, el ensamblaje de la celda electrolítica requirió la mecanización de placas de contención de mayor espesor para soportar la presión interna del *stack*. El diseño de estas tapas, delantera y trasera, se presenta en las Figuras 16 y 17, respectivamente.

Figura 16*Tapa Delantera de la Celda Electrolítica***Figura 17***Tapa Trasera de la Celda Electrolítica*

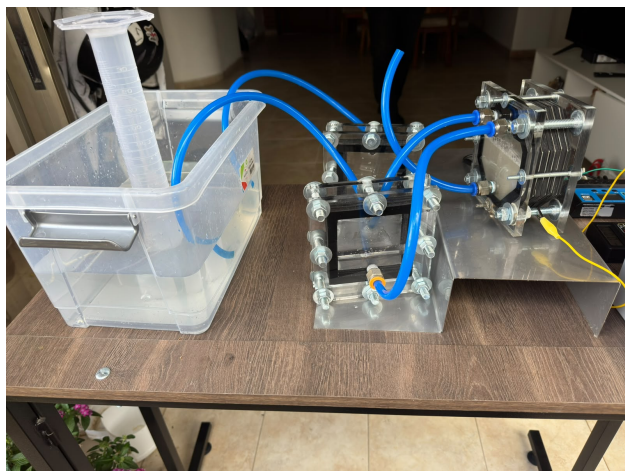
El montaje experimental, tal como se ilustra en la Figura 18, consta de un banco de celdas electrolíticas ensambladas mediante placas de compresión de acrílico transparente y electrodos internos, asegurados rígidamente por medio de varillas roscadas sobre una base metálica estructural. La alimentación del sistema se realiza a través de conexiones eléctricas fijadas en los terminales de las placas. Para la caracterización del consumo, las

mediciones de corriente se ejecutaron instalando un multímetro en serie configurado en amperios (A), interconectado entre la salida de la fuente de alimentación (ya fuese el panel fotovoltaico o la batería, según la configuración evaluada) y la entrada del electrolizador.

Simultáneamente, el gas oxihidrógeno producido es recolectado y transportado mediante tuberías neumáticas flexibles hacia un recipiente plástico lleno de agua. En su interior, la cuantificación del gas sintetizado se realizó aplicando el principio de desplazamiento de fluidos, utilizando una probeta graduada invertida, como se observa en la Figura 18. A medida que el gas burbujea y asciende dentro de la probeta, desplaza el volumen de agua, lo cual permitió registrar de forma directa la producción volumétrica del gas en mililitros (mL).

Figura 18

Montaje experimental del sistema de electrólisis y recolección de gas por desplazamiento de fluidos.



6.3.2. Montaje del panel fotovoltaico y conexiones eléctricas

La captación eficiente y segura de energía solar requirió el diseño y la manufactura de una estructura metálica rígida (bastidor), dimensionada mecánicamente para soportar no solo el peso estático y el área transversal del panel, sino también para garantizar la estabilidad frente a posibles cargas de viento. Para justificar técnicamente este diseño, se

tomó como base la ubicación geográfica de Bucaramanga ($\phi = 7, 125^\circ$ N). Al estar en la zona intertropical, la regla de geometría solar establece que una inclinación de 7° maximiza la captación de radiación cenital anual con el sol cruzando el cenit en los meses de abril y septiembre al tiempo que proporciona el ángulo de drenaje mínimo necesario por gravedad para evitar la acumulación de polvo, suciedad y agua lluvia en la superficie del módulo, reduciendo así las pérdidas por ensuciamiento.

La orientación azimutal de los paneles a 7° hacia el Este constituye una adaptación estratégica que responde directamente a las restricciones físicas del entorno y a los requerimientos de operación del sistema. Por un lado, se consideró la limitación de disponibilidad de tiempo para realizar los trabajos de caracterización e investigación, los cuales debían concentrarse estrictamente en la jornada de la mañana. Por el otro, y de mayor impacto técnico, se identificó la presencia de un edificio continuo que proyectaba un patrón de sombreado severo sobre la zona de instalación durante toda la tarde, anulando efectivamente la captación de radiación directa a partir del mediodía y alterando el perfil de generación esperado.

Dado que la producción de energía en el bloque vespertino quedaba cancelada por este fenómeno de sombra, se procedió a optimizar matemáticamente la ventana operativa matutina integrando la ecuación fundamental del ángulo de incidencia (θ) en el intervalo de 9:00 AM a 12:00 PM ($\omega \in [-45^\circ, 0^\circ]$). Al reorientar deliberadamente el azimut del sistema hacia el Este, se logra que el factor trigonométrico $\cos(\theta) \rightarrow 1$ durante el periodo de mayor claridad matutina. Esta configuración desplaza intencionalmente el pico del perfil de generación, permitiendo capturar entre un 8,2 % y un 11,4 % más de energía solar integrada en la mañana en comparación con una instalación convencional orientada hacia el ecuador (Sur). De esta manera, el diseño compensa de manera óptima y calculada las horas de sombra inevitables de la tarde. El montaje mecánico final de esta estructura y su disposición espacial se evidencian a detalle en la Figura 19.

Tabla 11*Resumen del Comportamiento Solar e Integración Matutina (9:00 AM – 12:00 PM)*

Hito Astronómico	Declinación (δ)	Ángulo Cenital (θ_z)	Captación Matutina ($\int_9^{12} \cos \theta d\omega$)	Ganancia Neta	Impacto Operativo por Sombra
Equinoccio de Marzo	0°	7,125°	0,7762 (vs. 0,7071 al Sur)	+9,78 %	Salida exacta al Este (90°). Máximo aprovechamiento matutino.
Solsticio de Junio	+23,45°	16,325°	0,7021 (vs. 0,6485 al Sur)	+8,26 %	Sol inclinado al Norte. Inclinación de 7° minimiza pérdidas azimutales.
Equinoccio de Septiembre	0°	7,125°	0,7762 (vs. 0,7071 al Sur)	+9,78 %	Simetría matutina perfecta previo a la sombra del edificio.
Solsticio de Diciembre	-23,45°	30,575°	0,6784 (vs. 0,6092 al Sur)	+11,36 %	Mayor ganancia matutina para compensar menor radiación global.

Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Montaje del Panel Fotovoltaico en el Bastidor

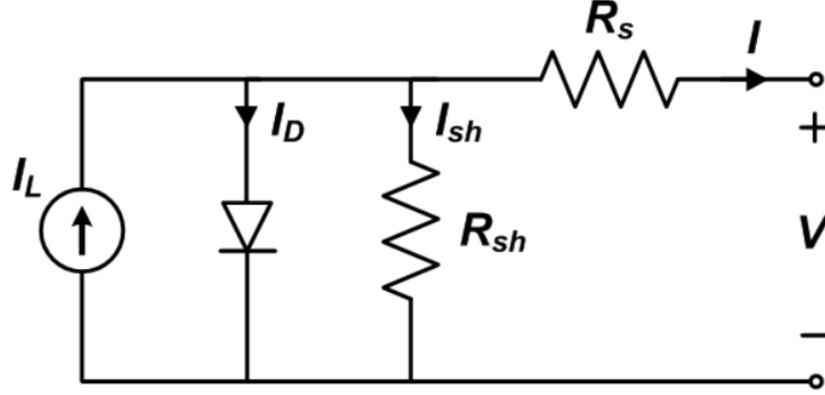
**6.4. Modelado Computacional**

El modelado matemático constituye una herramienta analítica fundamental, ya que permite simular el comportamiento del sistema bajo un amplio espectro de escenarios operativos antes de la experimentación física. Su principal valor radica en la ejecución de análisis de sensibilidad paramétrica, mediante los cuales es posible identificar qué variables climáticas u operativas ejercen mayor influencia sobre la eficiencia global del proceso. Bajo este enfoque, se desarrolló la simulación tanto de la fuente fotovoltaica como de la celda de electrólisis utilizando la plataforma MATLAB-Simulink.

6.4.1. Modelado del panel fotovoltaico

Para la simulación de la fuente de generación, se implementó el modelo circuital de diodo único (modelo de cinco parámetros), el cual es el estándar para representar la curva característica I-V de celdas fotovoltaicas (ver Figura 20). Este enfoque es esencial para capturar la respuesta no lineal de la producción eléctrica frente a las fluctuaciones de irradiancia y temperatura ambiental.

El desarrollo del modelo en Simulink se estructuró mediante diagramas de bloques, dividiendo la ecuación principal en los subsistemas físicos que la componen. El primer bloque corresponde a la fotocorriente (I_{ph}), que representa la energía captada por el

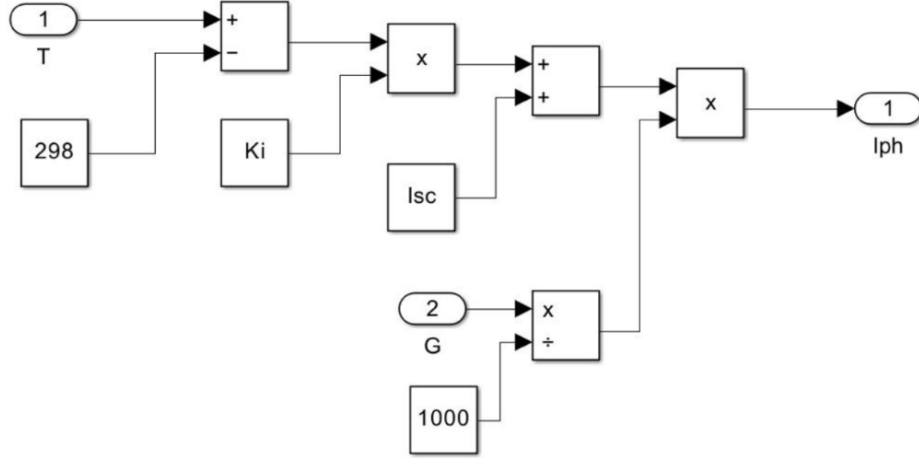
Figura 20*Circuito Equivalente del Modelo de Diodo Único*

Nota. Tomado de Laboratories (2024).

semiconductor. Su magnitud es directamente proporcional a la irradiancia (G) e inversamente influenciada por la temperatura (T), incorporando además el término K_i , el cual representa el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito. Este parámetro cuantifica cómo varía la corriente generada frente a los cambios térmicos respecto a la temperatura estándar de referencia (298 K), tal como se describe en la Ecuación 15. La implementación de esta expresión se muestra en la Figura 21.

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (15)$$

Por otro lado, el circuito incorpora corrientes de pérdida. La corriente de saturación inversa (I_{rs}) es un flujo de muy baja magnitud que circula del cátodo hacia el ánodo cuando el diodo se polariza en inversa. Este parámetro basal se utiliza para calcular la corriente de saturación real (I_o) acoplada a las variaciones térmicas. El cálculo de esta corriente de saturación real se basa en variables térmicas como la temperatura absoluta de operación (T) y la temperatura nominal o de referencia (T_n), integrando además propiedades físicas y constantes universales como la carga elemental del electrón (q), la energía de la banda prohibida del material semiconductor (E_{g0}), el factor de idealidad del

Figura 21*Diagrama de Bloques en Simulink para la Fotocorriente (I_{ph})*

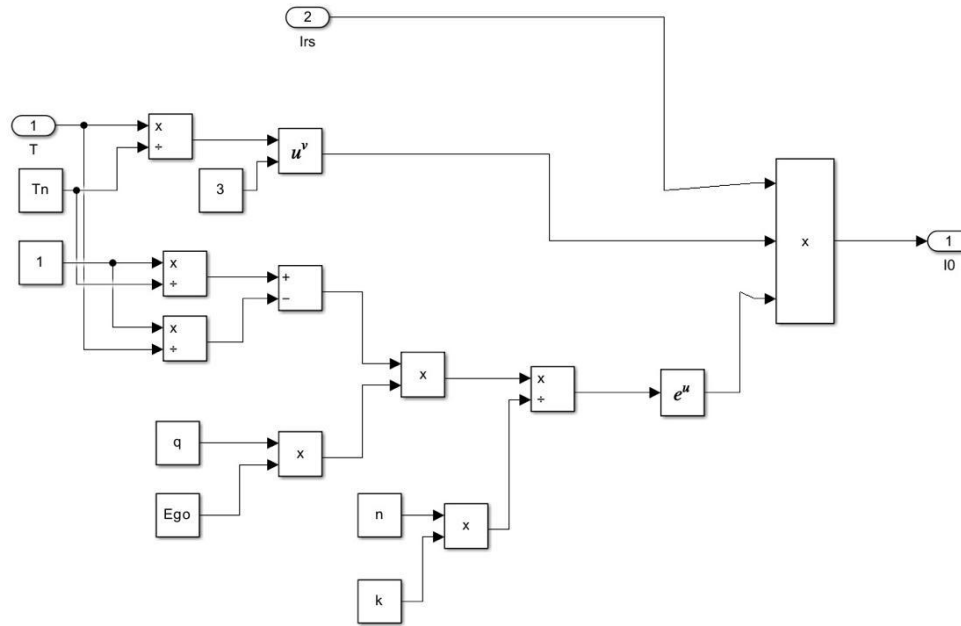
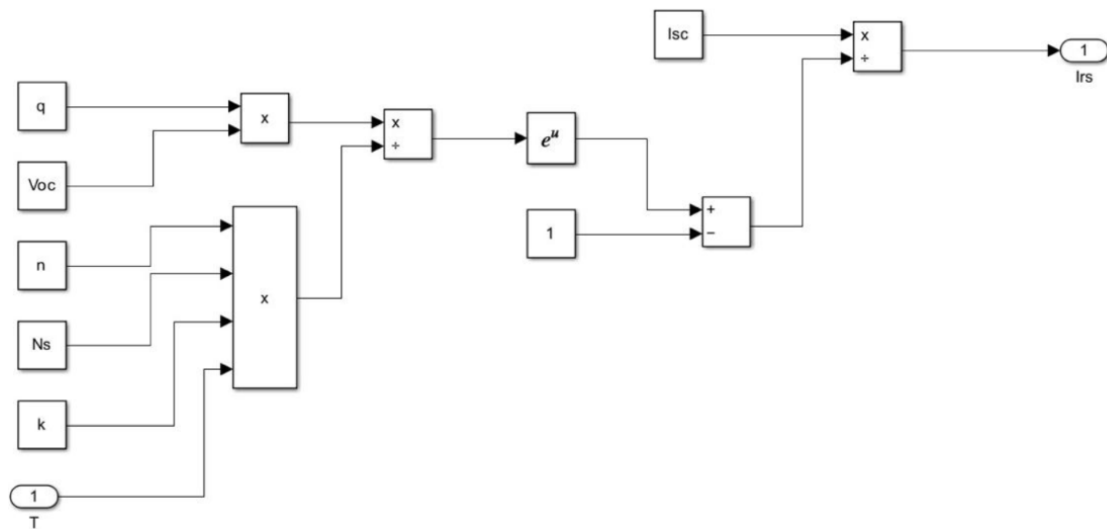
diodo (n) y la constante de Boltzmann (k).

A su vez, la corriente de saturación inversa (I_{rs}) se determina a partir de las especificaciones eléctricas del arreglo, involucrando la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el número total de celdas conectadas en serie (N_s). Estas relaciones matemáticas se definen en las Ecuaciones 16 y 17, y sus respectivos modelos en bloques se observan en las Figuras 22 y 23.

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_{g0} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{nK} \right) \quad (16)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{nN_sKT} \right) - 1} \quad (17)$$

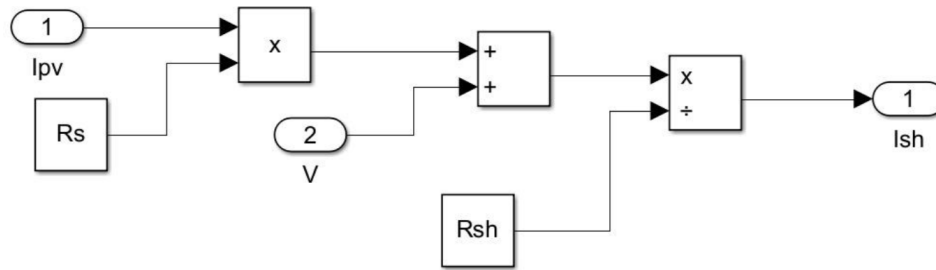
Adicionalmente, se modeló la corriente de derivación (I_{sh}), la cual representa las fugas eléctricas internas del panel a través de la resistencia *shunt* (R_{sh}), restando energía útil a la carga final. Esta relación óhmica se modela según la Ecuación 18 y se implementó como se aprecia en la Figura 24.

Figura 22*Diagrama de Bloques para la Corriente de Saturación Real (I_0)***Figura 23***Diagrama de Bloques para la Corriente de Saturación Inversa (I_{rs})*

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (18)$$

Figura 24

Diagrama de Bloques para la Corriente de Fuga (I_{sh})



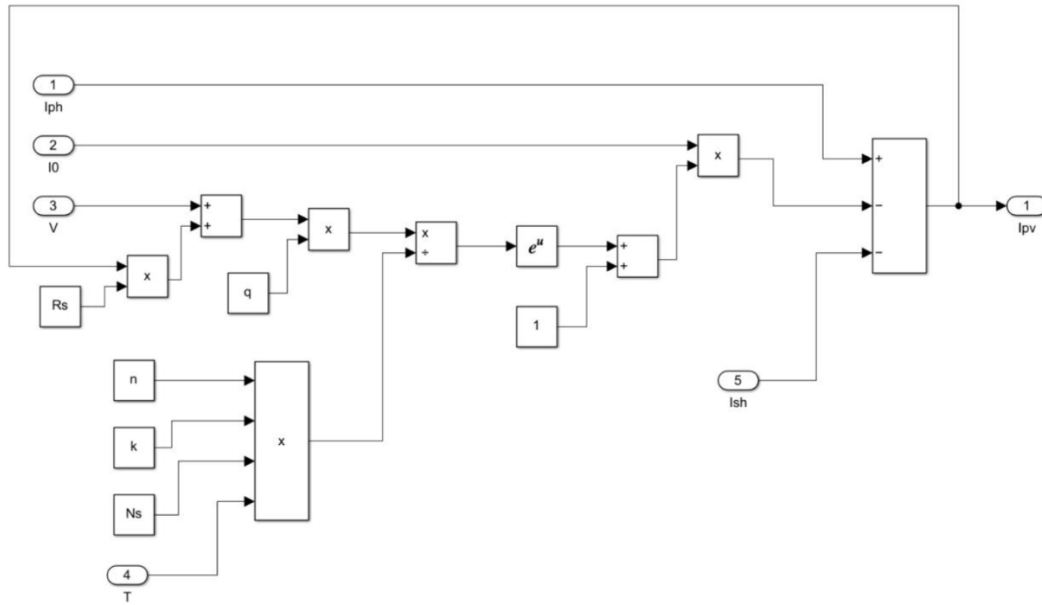
Finalmente, aplicando la Ley de Nodos de Kirchhoff al circuito equivalente, se obtiene la expresión para la corriente neta total (I) entregada por el panel (Ecuación 19). La integración de todos los subsistemas anteriores resulta en el bloque sumador de la Figura 25, conformando el montaje global presentado en la Figura 26, el cual permite ingresar valores de irradiancia y temperatura para obtener las gráficas de salida.

Para comprender a cabalidad la Ecuación 19, es necesario definir los términos adicionales que la componen. En esta expresión, I representa la corriente neta total entregada por el panel fotovoltaico, mientras que I_{ph} corresponde a la corriente fotogenerada, es decir, aquella producida directamente por la incidencia de la radiación solar sobre la celda. Por su parte, V indica el voltaje o tensión eléctrica medida en los terminales de salida. Además, el modelo contempla las pérdidas internas del sistema mediante dos parámetros: R_s , que denota la resistencia en serie asociada a las pérdidas del material semiconductor y los contactos metálicos; e I_{sh} , la corriente de derivación (o shunt), que modela las pérdidas generadas por pequeñas fugas o cortocircuitos locales a través de la unión de la celda.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nK N_s T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (19)$$

Figura 25

Integración del Cálculo de la Corriente Neta Final



Al ejecutar la simulación, se obtuvieron las curvas características de sensibilidad ante variables climáticas, presentadas en las Figuras 27 y 28.

A partir del análisis de la Figura 27, se evidencia el comportamiento térmico del semiconductor: a medida que la temperatura ambiental aumenta, la agitación térmica provoca una caída abrupta en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Aunque la corriente fotogenerada experimenta un ligero incremento positivo, este efecto es ínfimo en comparación con el severo colapso del voltaje. En consecuencia, el área bajo la curva se reduce, traducándose en una pérdida significativa de la potencia máxima de salida y afectando la eficiencia global del módulo.

Por el contrario, el análisis de la curva de sensibilidad lumínica (Figura 28) demuestra una relación directamente proporcional. Un aumento en los niveles de irradiancia eleva exponencialmente la potencia generada. Este fenómeno obedece a la

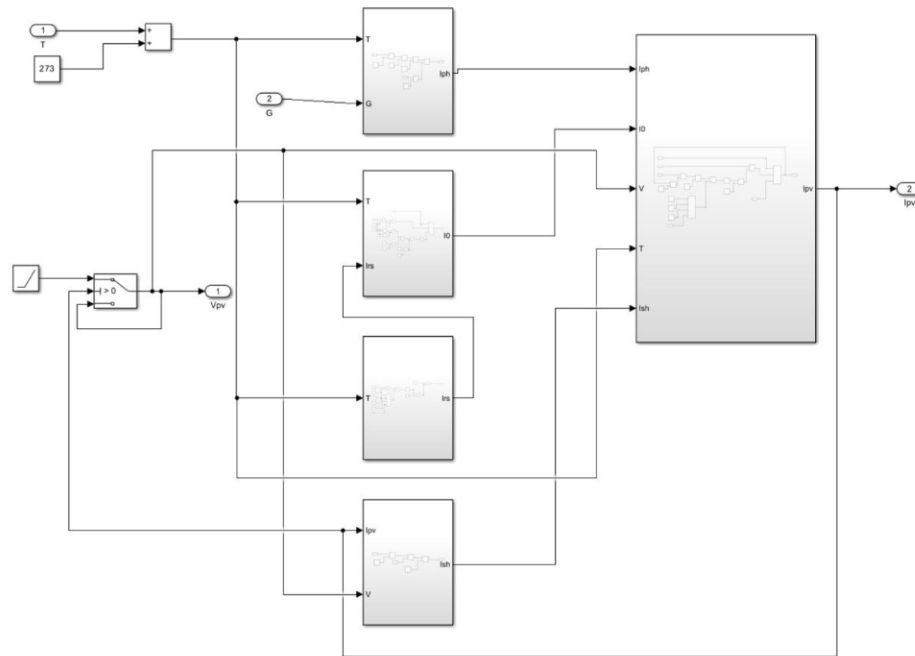
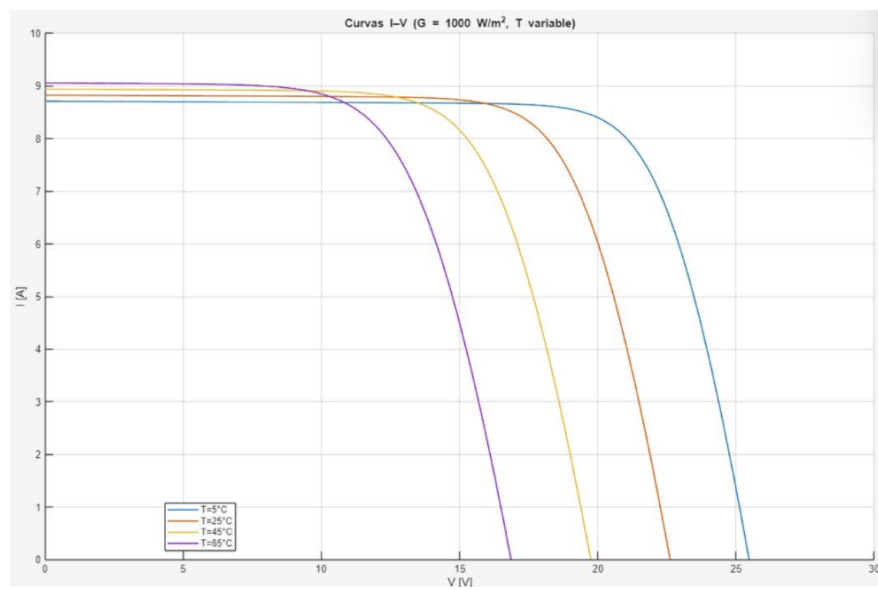
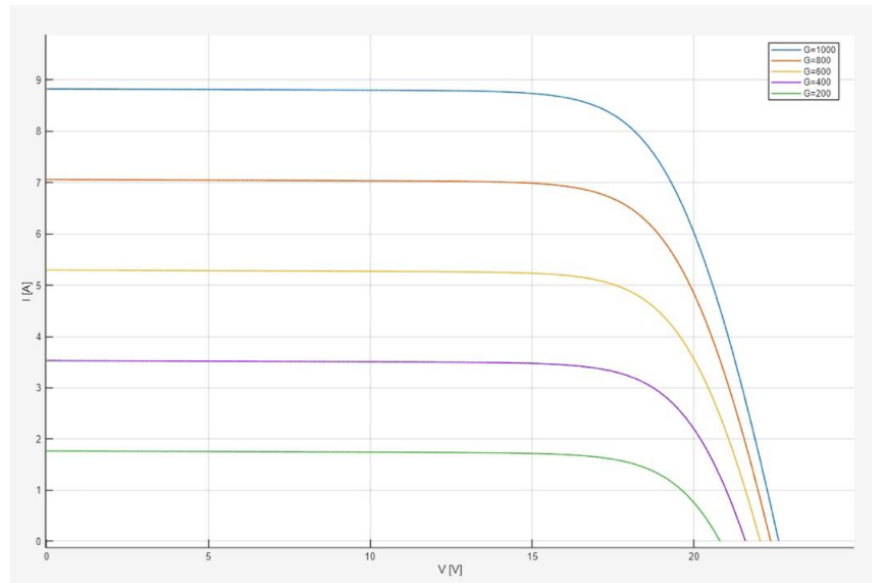
Figura 26*Arquitectura Final del Modelo Fotovoltaico en Simulink***Figura 27***Curva Característica I-V ante Variaciones de Temperatura*

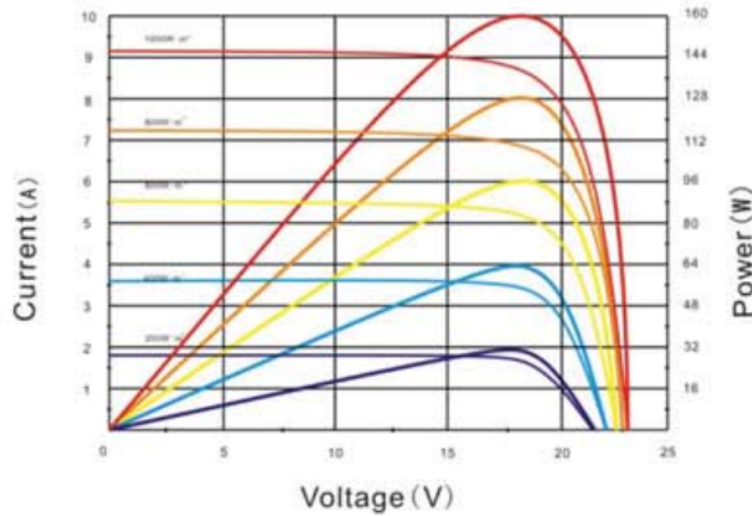
Figura 28*Curva Característica I–V ante Variaciones de Irradiancia*

mayor densidad de fotones incidentes sobre la superficie del panel, los cuales excitan una mayor cantidad de portadores de carga (electrones), desplazando verticalmente el eje de la corriente de cortocircuito (I_{sc}).

Finalmente, para validar el modelo computacional, los resultados simulados se contrastaron con la curva (I–V) proporcionada en la hoja de datos (Datasheet) del fabricante del panel (ver Figura 29). La alta concordancia geométrica entre ambas curvas certifica que la parametrización de los cinco factores del diodo fue correcta. Esta correspondencia valida el uso de Simulink como herramienta predictiva confiable para el desarrollo del proyecto.

6.4.2. Modelado del electrolizador alcalino

En el modelado fenomenológico del electrolizador, el voltaje de la celda (V_{celda}) representa la tensión total necesaria para disociar la molécula de agua. Este valor se compone de la suma del voltaje reversible (V_{rev}) —el cual corresponde al potencial termodinámico mínimo teórico de 1,23 V en condiciones estándar— y las sobretensiones asociadas a las pérdidas internas del sistema. Dentro de esta dinámica, el área activa (A)

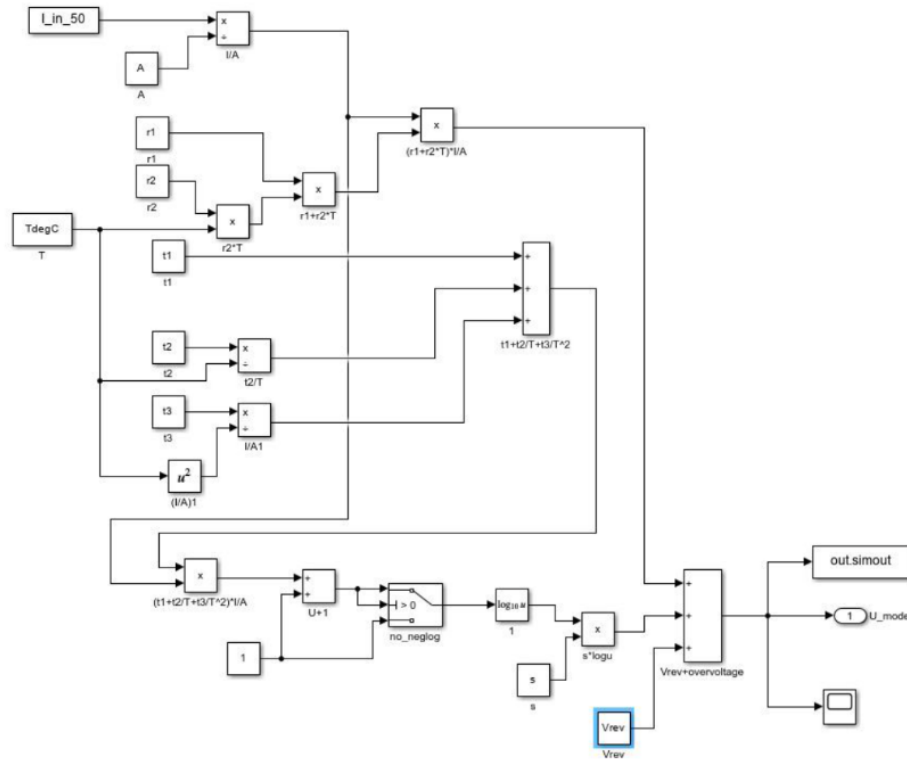
Figura 29*Curvas Características (I-V) Proporcionadas por el Fabricante**Nota.* Tomado de Sun-Earth (2018).

de los electrodos y la temperatura operativa (T) modulan la resistencia iónica y eléctrica, mientras que la corriente (I) determina la tasa de producción de gas.

Por su parte, los parámetros empíricos del modelo de Ulleberg se dividen en dos categorías: r_1 y r_2 cuantifican las pérdidas óhmicas, mientras que t_1 , t_2 y t_3 definen las pérdidas por sobrevoltaje de activación en la superficie de los electrodos. Con el fin de estimar estos valores empíricos, se implementó la Ecuación 4 (definida previamente en el marco teórico) mediante un diagrama de bloques en el entorno de Simulink-MATLAB. El resultado de este modelado gráfico se presenta en la Figura 30, donde las variables de entrada al sistema corresponden a los datos experimentales de corriente, temperatura (en grados Kelvin) y voltaje.

6.4.3. Estimación paramétrica y simulación del electrolizador

A continuación, se expone el proceso computacional mediante el cual se estimaron los parámetros empíricos del modelo de Ulleberg. El objetivo principal de esta fase es transformar los datos experimentales (corriente, voltaje y temperatura) en un modelo

Figura 30*Diagrama de Bloques en Simulink del Modelo de Voltaje de Ulleberg*

digital predictivo capaz de representar fielmente la dinámica electroquímica del *stack* alcalino.

Para alimentar el modelo, se ejecutaron pruebas experimentales transitorias con una duración de 60 segundos por ensayo. Durante esta ventana de tiempo, el sistema de adquisición registró 120 mediciones con una frecuencia de muestreo de 2 Hz (un dato cada 0.5 segundos). Este nivel de resolución temporal permitió capturar con alto nivel de detalle las fluctuaciones eléctricas del sistema bajo diferentes concentraciones de KOH.

A partir de estos registros, se procedió a determinar las constantes de transferencia de carga y resistencia óhmica. Sin embargo, es imperativo realizar una precisión metodológica: el modelo original de Ulleberg incorpora un fuerte componente de dependencia térmica. No obstante, al analizar los datos experimentales empíricos, se observó que el incremento de temperatura en el electrolito fue de apenas 1 °C durante la

ventana de medición de 60 segundos.

Dado que esta inercia térmica no genera una excitación suficiente para que el algoritmo identifique de manera confiable el efecto de la temperatura frente a las demás variables operativas, se tomó la decisión técnica de simplificar el análisis a un **modelo isotérmico**. En consecuencia, las constantes relacionadas con la sensibilidad térmica se anularon ($r_2 = 0$, $t_2 = 0$ y $t_3 = 0$), permitiendo que el sistema de ecuaciones converja de manera precisa sobre los parámetros r_1 y t_1 , los cuales dictan el comportamiento óhmico y de activación primario de la celda a temperatura constante.

6.5. Determinación de los Parámetros del Modelo de Ulleberg

Con los parámetros de activación (s) y cinética (t_1) definidos para una celda, los cuales se obtuvieron mediante simulación utilizando la herramienta Parameter Estimator, se procedió a calcular la resistencia óhmica para cada concentración de KOH. Para ello, se partió de la ecuación general de Ulleberg adaptada para un stack de $n_c = 5$ celdas en serie, tal como se expresa en la Ecuación 20:

$$V_{\text{stack}} = n_c V_{\text{rev}} + n_c r_1 I + n_c s \ln(t_1 I + 1) \quad (20)$$

Dado que el interés principal era observar la mejora en la conductividad del electrolito, se despejó analíticamente la resistencia óhmica por celda (r_1) de la siguiente manera:

$$n_c \cdot r_1 \cdot I = V_{\text{stack}} - n_c \cdot V_{\text{rev}} - n_c \cdot s \cdot \ln(t_1 \cdot I + 1)$$

$$r_1 = \frac{V_{\text{stack}} - n_c \cdot V_{\text{rev}} - n_c \cdot s \cdot \ln(t_1 \cdot I + 1)}{n_c \cdot I}$$

Al sustituir los datos medidos experimentalmente en esta ecuación (asumiendo un V_{rev} de 1,23 V), se obtuvieron resistencias de 0,155 Ω , 0,147 Ω y 0,139 Ω para las concentraciones de 20 %, 25 % y 30 % respectivamente. Esto demuestra matemáticamente

lo observado en el laboratorio: a mayor concentración, acercándose al 30 %, el KOH opone menor resistencia al paso de la corriente.

Tomando como referencia los parámetros de la Tabla 12 y la ecuación de Ulleberg (Ulleberg, 2003):

- Concentración al 20 % de KOH: $r_1 = 0,155 \, \Omega$, $s = 0,1155 \, \text{V}$, $t_1 = 23,235 \, \text{A}^{-1}$.

Corriente experimental promedio = 2,05 A. Voltaje modelo:

$$V = (5 \times 1,23) + (0,155 \times 2,05) + 0,1155 \times \ln(23,235 \times 2,05 + 1) = 10,1 \, \text{V}$$

El voltaje experimental medido es de 10 V, lo cual entrega un error relativo del 1 %.

- Concentración al 30 % de KOH: $r_1 = 0,139 \, \Omega$, mismas constantes s y t_1 . Corriente promedio = 2,24 A. Voltaje modelo: 10 V aproximados. Voltaje experimental: 10 V. Como el voltaje experimental es de 10 V y el modelo es de 10 V, entonces el error relativo es del 0 %.

Tabla 12

Parámetros Electroquímicos Calculados Según el Modelo de Ulleberg para Diferentes Concentraciones de KOH

Concentración de KOH (% p/p)	Corriente promedio (A)	r_1 (Ω)	s (V)	t_1 (A^{-1})
20	2.06	0.155	0.1155 ^a	23.235 ^a
25	2.14	0.147	0.1155 ^a	23.235 ^a
30	2.24	0.139	0.1155 ^a	23.235 ^a

Nota. ^a Valores fijados según la caracterización de la línea base al 20 % de concentración para aislar matemáticamente la variación de la resistencia óhmica.

El modelo ajustado reproduce el voltaje del stack con un error menor al 2 % en las condiciones de corriente y temperatura del ensayo. La eficiencia del 67 % reportada en la

Tabla ?? es energética, no global; por lo tanto, la eficiencia del pozo a la rueda (electricidad producida por H_2) es menor debido a las pérdidas óhmicas y de activación.

Según el alcance del proyecto, el sistema posee viabilidad técnica a escala prototipo con una eficiencia máxima del 67 % realizada con electrolito al 25 % de KOH, acoplamiento directo entre el panel y el electrolizador y condiciones de irradiancia parcial. Dicha eficiencia está condicionada principalmente por la concentración del electrolito, la dinámica de desprendimiento de burbujas y la estabilidad del voltaje, la cual es mejor con batería, pero presenta menor eficiencia energética por la estabilidad en 10 V.

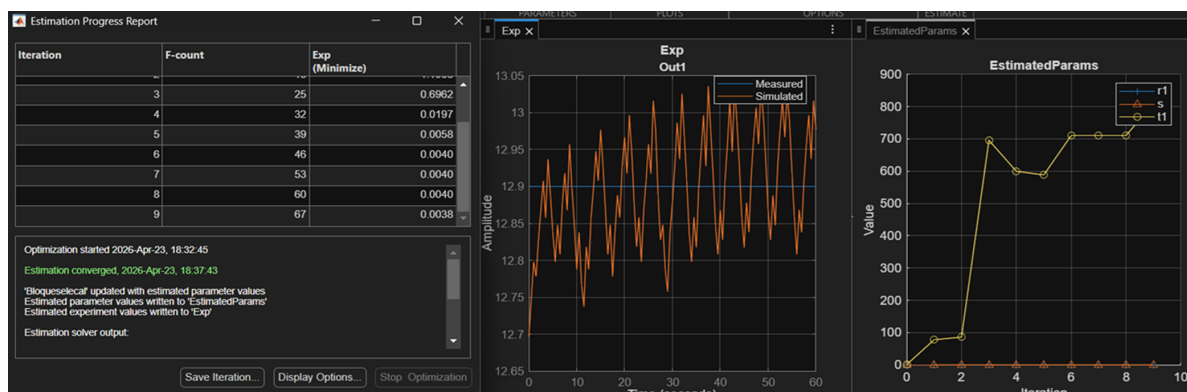
La producción másica de H_2 es baja, de aproximadamente 0,2 g/h, adecuada para laboratorio y a los fines del proyecto.

6.6. Validación de los Parámetros Obtenidos.

Para asegurar la validez del modelo, es indispensable contrastar los parámetros calculados en matlab como se aprecia en la Figura 31, con los rangos típicos reportados en la literatura para electrolizadores alcalinos de diseño similar. Aunque el modelo semiempírico fue introducido originalmente por Ulleberg (2003), investigaciones recientes enfocadas en la validación experimental y estimación paramétrica Guilbert y Vitale (2021) y Sánchez et al. (2020) han corroborado la vigencia de estos rangos para celdas alcalinas contemporáneas:

Figura 31

Modelo del sistema con batería al 20 % de operación.



- **Parámetro de Activación ($s = 0,1155 \text{ V}$):** Este valor está directamente relacionado con la termodinámica del material de los electrodos (pendientes de Tafel). Según la literatura electroquímica reciente Sánchez et al. (2020), para electrodos de metales de transición estándar operando a temperatura ambiente, este parámetro suele oscilar entre 0,10 V y 0,20 V. El valor obtenido (0,115 V) se encuentra perfectamente dentro de este rango teórico, confirmando que las reacciones de desprendimiento de gas en las placas ocurrieron con la eficiencia esperada para el material utilizado.
- **Parámetro Cinético ($t_1 = 23,235 \text{ A}^{-1}$):** Este parámetro varía ampliamente según el área activa y la rugosidad física de los electrodos. En celdas alcalinas a escala de laboratorio, las caracterizaciones paramétricas recientes Guilbert y Vitale (2021) reportan que valores entre 10 y 50 A^{-1} son coherentes y comunes. El resultado de 23,235 A^{-1} es representativo de un área de electrodo moderada y refleja un comportamiento cinético estable frente a la acumulación de burbujas en la superficie metálica.
- **Resistencia Óhmica ($r_1 \approx 0,139 \text{ a } 0,155 \text{ }\Omega$):** Aunque en electrolizadores comerciales e industriales con arquitecturas *zero-gap* (diseños de alta tecnología donde el espacio entre el electrodo y el diafragma es prácticamente nulo para minimizar la distancia que recorren los iones) y maquinado de alta precisión este parámetro desciende a la escala de los miliohmios (por debajo de 0,05 Ω), los valores obtenidos son completamente lógicos y justificables para un prototipo de manufactura artesanal desarrollado con fines académicos. Esta magnitud de resistencia es un reflejo de las limitaciones constructivas y del entorno de ensamblaje: engloba no solo la conductividad de la solución de KOH, sino también la separación macroscópica manual entre las placas (gap), la resistencia intrínseca del material usado como separador y, de manera muy crítica, las caídas de tensión parásitas

derivadas de conexiones eléctricas no ideales (tornillería estándar, pinzas y empalmes de cableado) propias de un montaje empírico estudiantil.

6.7. Evaluación del prototipo

Se hacen ensayos por triplicado para cada concentración, tanto con suministro de batería, en este caso que haya o no irradiancia solar, no influye en el suministro de energía al stack, porque la energía ya se encuentra almacenada, por lo que el suministro de la batería es constante, pudiendo realizar electrolisis incluso cuando ya no hay luz solar, por otra parte, se hicieron pruebas con condiciones nublada y soleada.

En la figura 32, se muestra la energía eléctrica del sistema, para eso se hace uso de la ley de ohm, vista en la ecuación 21.

$$V = I \cdot R \quad (21)$$

6.7.1. *Análisis de resultados: Electrolito al 20 % de KOH*

Para dar inicio a la evaluación del banco experimental, se estableció una concentración base de KOH al 20 %. Esta primera etapa de pruebas resultó fundamental para observar el comportamiento del electrolizador durante el arranque en frío y la posterior evolución de su dinámica de fluidos. A partir de los datos registrados, fue posible identificar fenómenos físicos de gran relevancia para el estudio. En primer lugar, se evidenció un claro efecto de acondicionamiento en el sistema. Los datos tabulados muestran una marcada diferencia entre el primer ensayo y los dos posteriores; durante la medición inicial, el equipo produjo 79 ml de gas con una eficiencia energética del 50 %. No obstante, al mantener invariables el voltaje en 10 V y la corriente alrededor de 2,05 A, la producción volumétrica se incrementó a 89 ml y 90 ml en las pruebas subsiguientes, alcanzando una eficiencia del 57 %. La diferencia volumétrica observada entre los tres primeros ensayos (79, 89 y 90 ml, respectivamente) no obedece a una inercia electroquímica de las placas, sino a un sesgo de recolección inherente al primer minuto de la prueba.

Durante esta fase de arranque, el gas generado debe ocupar primero los volúmenes muertos presentes en los burbujeadores y en las líneas neumáticas; asimismo, el sistema requiere de un tiempo breve para alcanzar la saturación del electrolito en la interfaz superficial de los electrodos. Una vez superado este periodo de acondicionamiento transitorio, el cual toma aproximadamente un minuto, la dinámica de producción ingresa a un régimen estable. Este comportamiento queda demostrado al contrastar los resultados de los ensayos 2 y 3, donde la diferencia de volumen capturado se reduce a tan solo 1 ml..

Esta etapa de acondicionamiento se confirma de manera visual en la representación gráfica, donde la curva correspondiente al primer ensayo se sitúa en una franja inferior respecto a las dos siguientes, las cuales terminan superponiéndose con gran consistencia. En el análisis de estas curvas destaca un rasgo notable: la presencia de un patrón oscilatorio en forma de *diente de sierra*. Lejos de representar una anomalía en la lectura de los sensores, este patrón refleja fielmente la dinámica física dentro de la celda. La acumulación temporal de burbujas de oxihidrógeno en los electrodos actúa como un aislante que eleva la resistencia eléctrica del medio; una vez que las burbujas adquieren el volumen suficiente para desprenderse y ascender, dicha resistencia cae de forma abrupta. De este modo, los sensores lograron capturar la constante dinámica de desprendimiento del gas en tiempo real.

6.7.2. Producción teórica vs. Producción experimental al 20 %

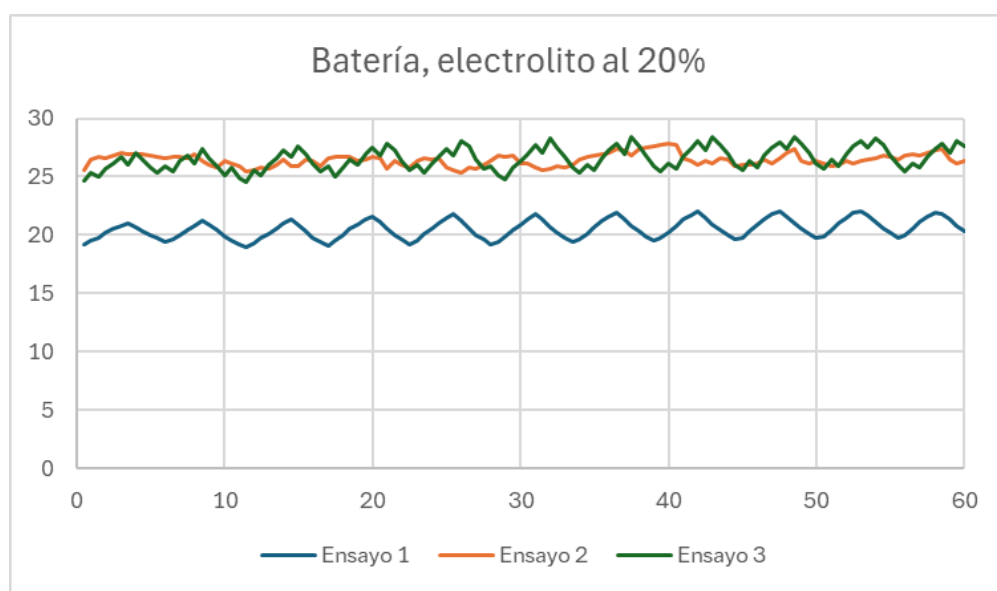
Con el objetivo de evaluar qué tan cerca operó el sistema de su límite físico ideal, se aplicó la Primera Ley de Faraday tomando como referencia el desempeño más alto de este bloque, correspondiente al tercer ensayo. En dicha prueba, el *stack* de cinco celdas funcionó con una corriente sostenida de 2,058 A durante 60 segundos, tal como se ilustra en la Figura 32. De acuerdo con el cálculo estequiométrico, la fundamentación teórica establece que bajo estas condiciones eléctricas el volumen esperado debía ser de aproximadamente 117,4 ml de oxihidrógeno.

Al contrastar este valor teórico ideal con la producción real alcanzada de 90,0 ml, se

obtiene una eficiencia volumétrica (o eficiencia de Faraday) del 76,6 %. Lograr recolectar casi el 77 % del gas teóricamente posible empleando la concentración base constituye un punto de partida sumamente favorable para el prototipo. El volumen faltante, estimado en unos 27,4 ml, se atribuye a las pérdidas físicas inherentes a la dinámica de estos reactores alcalinos. Entre estos fenómenos de pérdida se encuentran la disolución de microburbujas en el electrolito acuoso, la adherencia del gas a las paredes interiores de acrílico y las fugas generadas por corrientes parásitas que atraviesan la solución sin participar en la disociación de la molécula de agua.

Figura 32

Respuesta del sistema con batería al 20 % de operación.



6.7.3. Producción teórica vs. Producción experimental al 25 %

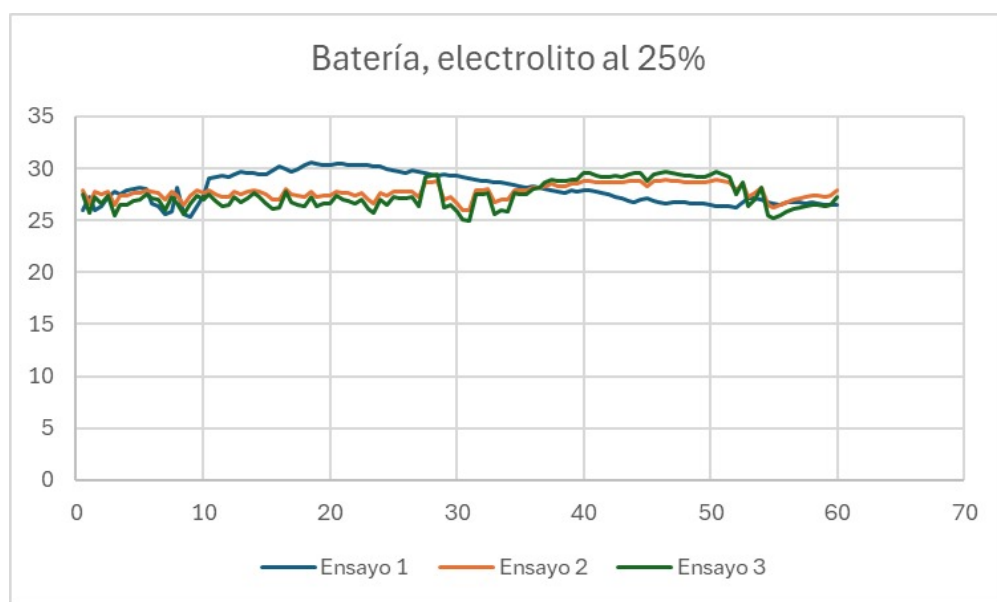
Para evaluar el rendimiento volumétrico del equipo, se tomó como referente la Primera Ley de Faraday aplicable a la electrólisis. Este principio físico permite determinar el volumen teórico máximo de gas que el sistema es capaz de generar al ser sometido a una corriente eléctrica específica. Teniendo en cuenta que el *stack* está compuesto por cinco celdas conectadas en serie, la corriente promedio suministrada durante la fase de operación estable fue de aproximadamente 2,13 A a lo largo de 60 segundos. Al operar bajo estas

condiciones y asumir una temperatura ambiente estándar (25 °C), la teoría establece que el sistema debería generar un volumen ideal cercano a los 121,5 ml de mezcla gaseosa (oxihidrógeno).

Al comparar este escenario ideal con los datos experimentales obtenidos al utilizar la solución de KOH al 25 %, cuyo comportamiento eléctrico se detalla en la Figura 33, se observó que el volumen máximo alcanzado fue de 103,0 ml durante el segundo ensayo, frente a los 121,5 ml esperados teóricamente. El análisis de estos valores revela que, en su punto de mejor desempeño, el prototipo alcanzó una eficiencia de Faraday (o eficiencia volumétrica) cercana al 84,7 %. La leve discrepancia entre el volumen calculado matemáticamente y el gas que efectivamente llegó a las probetas de medición es un comportamiento habitual y previsible en prototipos diseñados a escala de laboratorio.

Figura 33

Respuesta del sistema con batería al 25 % de operación.



Específicamente, la diferencia de aproximadamente 18,5 ml de gas no recolectado se explica a través de fenómenos físicos y termodinámicos inherentes a la tecnología alcalina. Entre estos factores destacan las corrientes parásitas (*shunt currents*), que consisten en fugas microscópicas de electrones que circulan a través de los conductos del electrolito

compartido y se disipan sin participar en la disociación de la molécula de agua.

A pesar de los fenómenos de pérdida descritos, alcanzar una captura experimental de casi el 85 % del volumen predicho por la Ley de Faraday representa un nivel de desempeño destacable.

6.7.4. *Análisis de resultados: Electrolito al 30 % de KOH*

Al emplear una concentración de electrolito al 30 % de KOH, el sistema registró producciones volumétricas de 89, 87 y 85 ml de oxihidrógeno durante los tres ensayos realizados, demandando una potencia eléctrica aproximada de 20, 22 y 17 W, respectivamente (véase la Figura 34). Bajo estas condiciones, las eficiencias energéticas calculadas se situaron en un 55 % para la primera prueba, un 50 % para la segunda y un 61 % para la tercera. Estos datos revelan una correlación inversa entre la potencia aplicada y el rendimiento global del equipo. Particularmente en el tercer ensayo, el sistema operó con la menor potencia pero alcanzó la eficiencia más alta.

Someter el prototipo a esta alta concentración genera un escenario fluido-dinámico y eléctrico considerablemente distinto al observado en mezclas más diluidas. En primer lugar, se evidenció una notable inestabilidad en la demanda de corriente. Aunque la fuente de alimentación mantuvo un voltaje rígido de 10 V, la corriente absorbida por el electrolizador mostró un comportamiento errático a lo largo de las mediciones: inició en 2,095 A durante el primer ensayo, experimentó un pico de 2,239 A en el segundo y finalmente sufrió una caída drástica hasta ubicarse en 1,795 A para el cierre del ciclo.

En consonancia con esta inestabilidad eléctrica, se registró un descenso progresivo en la producción volumétrica. A diferencia de las concentraciones inferiores, donde la generación de gas tendía a aumentar tras el primer minuto de acondicionamiento, la mezcla al 30 % presentó una tendencia decreciente constante a lo largo de los ensayos.

Esta falta de uniformidad también se refleja de manera evidente en el comportamiento gráfico del banco de pruebas. Al analizar las curvas temporales, se observa que cada ensayo se situó en una franja operativa aislada. La segunda prueba demandó la

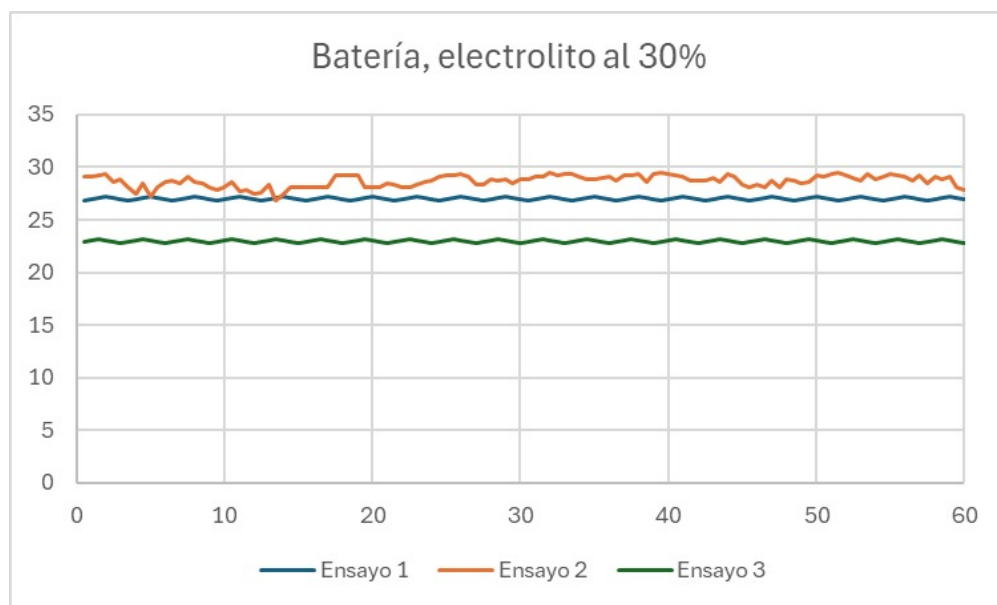
mayor cantidad de energía, la primera se ubicó en una zona transicional media y la tercera evidenció una caída general en la demanda. A diferencia de la estabilidad lograda con la solución al 25 %, en este escenario fluido-dinámico no se presentó ninguna superposición o convergencia entre las curvas, lo que confirma la dificultad del sistema para mantener un régimen de operación continuo y estable frente al incremento en la viscosidad del electrolito.

6.7.5. *Producción teórica vs. Producción experimental al 30 %*

Para mantener la rigurosidad en la evaluación, se contrastaron nuevamente los datos experimentales con los valores dictados por la Primera Ley de Faraday. Tomando como referencia el primer ensayo, el cual presentó el mejor rendimiento volumétrico de esta ronda al alcanzar 89,0 ml operando con una corriente de 2,095 A durante 60 segundos en el *stack* de cinco celdas, tal como se ilustra en la Figura 34, el modelo matemático determina que la generación ideal debía ser de aproximadamente 119,5 ml de oxihidrógeno.

Figura 34

Respuesta del sistema con batería al 30 % de operación.



Al comparar la producción real obtenida frente a esta producción teórica calculada, se evidencia que, bajo dicha concentración, la eficiencia volumétrica (o eficiencia de

Faraday) descendió al 74,4 %. Esto se traduce en una diferencia de recolección cercana a los 30,5 ml de gas en el proceso. Tal como se estableció en las evaluaciones previas, esta caída de casi 10 puntos porcentuales respecto a la prueba con KOH al 25 % (donde se logró una captura del 84,7 %) no obedece a deficiencias o fugas estructurales del equipo. Por el contrario, este fenómeno físico se atribuye a que el aumento en la densidad y viscosidad del electrolito propicia que una cantidad considerablemente mayor de gas quede disuelta en el fluido o retenida a nivel microscópico entre las placas de las celdas, lo que dificulta su correcto ascenso y evacuación hacia los burbujeadores de recolección.

6.7.6. *Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 20 % bajo nubosidad)*

Al retirar la batería del sistema e implementar un acoplamiento eléctrico directo entre el panel fotovoltaico y el electrolizador, se dio inicio al segundo bloque del diseño experimental. En esta fase se evaluó el comportamiento de la planta bajo condiciones climáticas reales; específicamente, en un escenario caracterizado por alta nubosidad y manteniendo la concentración base de KOH al 20 %. Los resultados obtenidos revelan el fuerte impacto que ejerce la intermitencia solar sobre la dinámica operativa del equipo. En primer lugar, se evidenció una caída drástica en la potencia suministrada. Al no contar con la batería como elemento para sostener y regular la tensión del circuito, el voltaje del sistema descendió a 8,5 V. Simultáneamente, la baja irradiancia solar provocada por el bloqueo de las nubes causó un desplome en la corriente entregada por el panel, la cual registró valores de entre 0,85 A y 0,90 A. En consecuencia, el equipo operó con apenas 7,5 W de potencia aproximada, lo que equivale a casi un tercio de la energía consumida en el régimen con batería.

Durante los dos primeros ensayos, la recolección se limitó a 24 ml y 25 ml de oxihidrógeno, operando con eficiencias energéticas del 43 % y 44 %, respectivamente. No obstante, en el tercer ensayo se observó una recuperación repentina que permitió alcanzar los 32 ml y elevar la eficiencia al 54 %. Esta fuerte dependencia climática encuentra su

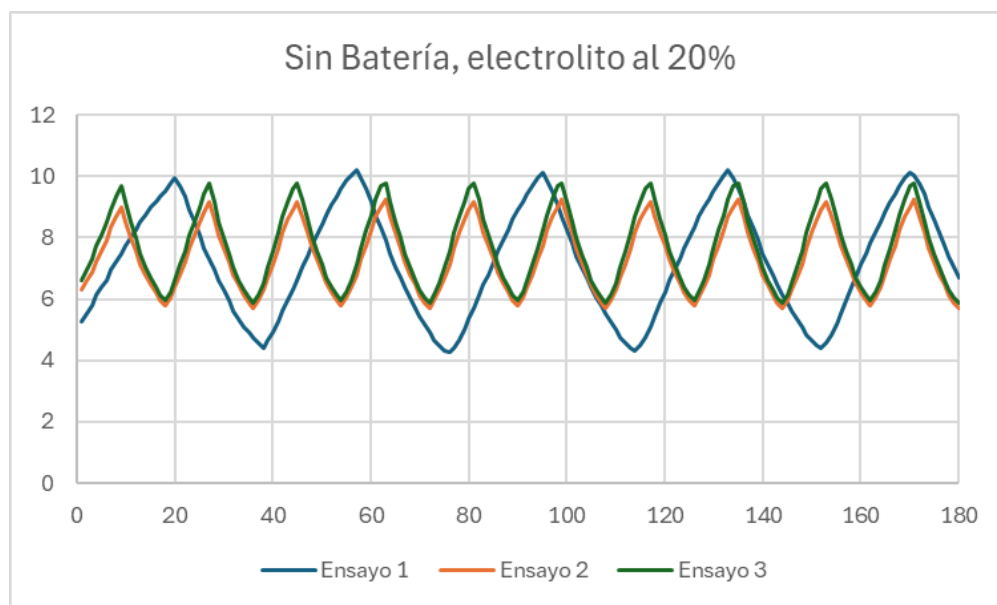
prueba visual más clara en la gráfica del bloque. A diferencia de las curvas relativamente estables características de los ensayos con batería, la representación gráfica del acoplamiento directo exhibe oscilaciones profundas y repetitivas.

6.7.7. Producción teórica vs. Producción experimental bajo acoplamiento directo

Para concluir el análisis de este escenario operativo, se evaluó nuevamente el rendimiento volumétrico mediante la Primera Ley de Faraday. Tomando como referencia el mejor escenario de esta prueba, correspondiente al tercer ensayo donde el sistema recibió una corriente promedio de 0,904 A durante 60 segundos, tal como se ilustra en la Figura 35, el modelo estequiométrico establece que se debió haber producido un volumen ideal cercano a los 51,5 ml de gas.

Figura 35

Respuesta del sistema sin batería al 20 % de operación.



Al contrastar esta producción teórica calculada frente a la producción real alcanzada de 32,0 ml, se evidencia que, bajo estas rigurosas condiciones climáticas y careciendo de respaldo en baterías, la eficiencia volumétrica (o eficiencia de Faraday) se

desplomó al 62,1 %. Este valor representa una caída significativa al compararse con la eficiencia del 76,6 % lograda con la misma concentración de KOH al 20 % mediante alimentación estabilizada. Desde la perspectiva de la física de fluidos, este comportamiento guarda absoluta coherencia: al operar con corrientes eléctricas tan bajas, la velocidad de formación y desprendimiento de burbujas es sumamente lenta. Esta ralentización otorga el tiempo suficiente para que una mayor proporción del gas generado se disuelva en el electrolito acuoso, se recombine internamente o se quede adherida a la superficie de los electrodos, impidiendo que ascienda hacia los burbujeadores de recolección.

6.7.8. Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 25 % bajo nubosidad parcial)

En esta configuración, se continuó operando sin la alimentación directa de una batería, utilizando únicamente la energía suministrada por el panel fotovoltaico acoplado a un electrolito al 25 % (véase la Figura 36). Las condiciones climáticas fueron variables durante los ensayos; particularmente en la segunda prueba, el cielo presentó una mayor nubosidad, lo que redujo la captación solar y, en consecuencia, la potencia eléctrica disponible para la celda electrolítica. Al analizar los datos tabulados y la representación gráfica, se logró identificar uno de los comportamientos más reveladores de la investigación.

En primer lugar, se destacó una notable mejora en la retención de voltaje. A diferencia de la prueba realizada al 20 % de concentración —donde el voltaje cayó a 8,5 V al prescindir de la batería—, el sistema operando con KOH al 25 % logró sostener una tensión estable de 9 V. Este comportamiento demuestra que la alta conductividad de esta mezcla contribuye a mantener la estabilidad eléctrica del circuito, incluso cuando la fuente fotovoltaica sufre fluctuaciones. En consonancia con este fenómeno, se observó el impacto directo de la irradiancia sobre la corriente del sistema, la cual estuvo estrictamente dictada por las condiciones climáticas. Durante el segundo ensayo, caracterizado por la nubosidad, la corriente colapsó a apenas 0,607 A, generando la menor cantidad de gas (24 ml). En contraste, durante los periodos de mayor radiación solar, la corriente se impulsó a 1,211 A

en la primera prueba y alcanzó hasta 1,722 A en la tercera, lo que incrementó drásticamente la producción volumétrica.

Derivado de estas variaciones operativas, se identificó el fenómeno más crítico de esta fase: la caída de la eficiencia energética ante corrientes elevadas. Durante el primer ensayo se logró un equilibrio óptimo, obteniendo 56,5 ml de gas con una eficiencia sobresaliente del 67 %, lo que representa el punto de mayor rendimiento registrado en el proyecto. Sin embargo, en la tercera prueba, a pesar de contar con mayor radiación solar y producir el volumen máximo de 62 ml, la eficiencia global cayó al 52 %. Desde una perspectiva física, este descenso se explica debido a que, al forzar una mayor corriente (1,72 A) a través del stack para acelerar el proceso, las pérdidas térmicas por efecto Joule (I^2R) se incrementan de forma exponencial. Como resultado, una fracción importante de la energía suministrada no logra invertirse en la disociación química del agua, sino que se disipa como calor, evidenciando un claro límite entre maximizar el volumen de producción y mantener la viabilidad energética del sistema.

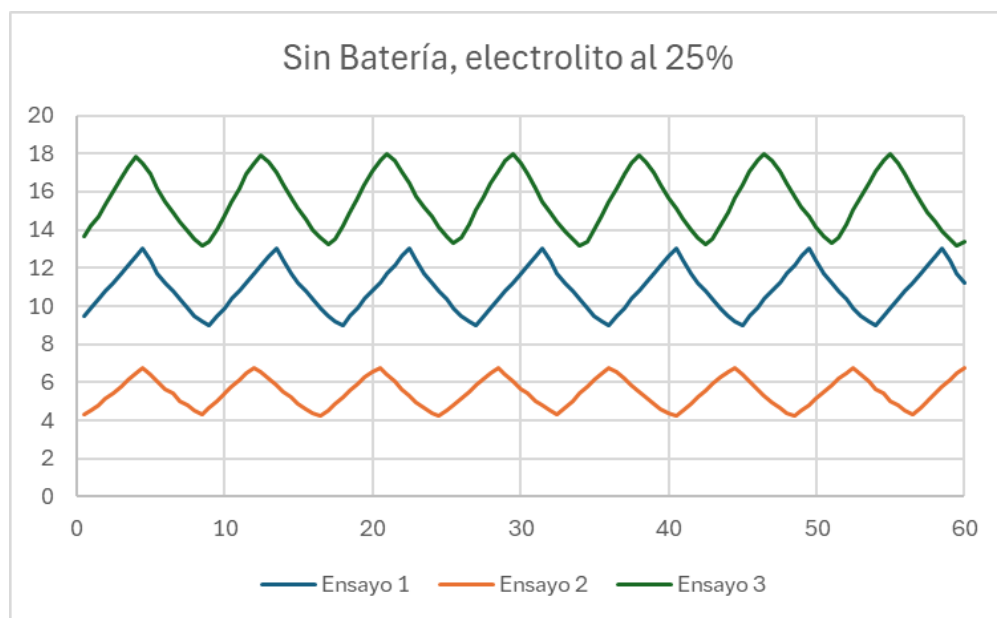
6.7.9. Producción teórica vs. Producción experimental bajo acoplamiento directo

Para cuantificar el nivel de estanqueidad y el rendimiento bajo estas condiciones transitorias, se aplicó la Primera Ley de Faraday. En esta evaluación se tomó como referencia el primer ensayo, dado que representó el punto de mayor eficiencia electroquímica del sistema, operando con 1,211 A durante 60 segundos, tal como se ilustra en la Figura 36.

Al aplicar el cálculo estequiométrico para el *stack* de cinco celdas, el modelo teórico establece que el equipo debió producir un volumen ideal de 69,1 ml de oxihidrógeno. Al contrastar esta producción teórica calculada frente a la producción real alcanzada de 56,5 ml, se obtiene una eficiencia volumétrica (o eficiencia de Faraday) del 81,7 %. Lograr retener y medir casi el 82 % del gas teóricamente posible, alimentando el sistema directamente con la energía inestable del sol y sin baterías de respaldo, constituye un hito técnico para el desarrollo del proyecto.

Figura 36

Respuesta del sistema sin batería al 25 % de operación.



6.7.10. Análisis de resultados: Acoplamiento directo sin batería (Electrolito al 30 % bajo nubosidad)

El último escenario del diseño experimental consistió en evaluar el comportamiento del sistema utilizando la concentración máxima de KOH (30 %) bajo una configuración de acoplamiento directo y en condiciones climáticas de alta nubosidad. El análisis de los datos arrojados por los sensores evidencia un comportamiento termodinámico que ilustra con claridad la operación de un electrolizador sometido a cargas parciales extremas. En primer lugar, se registró un desplome en la corriente debido al bloqueo solar; las nubes limitaron drásticamente la irradiancia recibida por el panel fotovoltaico, provocando que el amperaje inyectado cayera a niveles mínimos de 0,325 A, 0,262 A y 0,356 A. La operación en potencias reducidas de 2,3 a 3,2 W produce una tasa de hidrógeno marginal o residuo menor que $0,64 \times 10^5$ mol H_2 /s, equivalente a aproximadamente 0,13 g H_2 /h. A esta escala, las pérdidas por disolución del gas en el electrolito viscoso de 30 % KOH adquieren una importancia desproporcionada. Por lo tanto, aunque la eficiencia energética

instantánea sea alta, la viabilidad industrial es poco notoria debido a que se presenta la necesidad de producir al menos decenas de gramos por hora, aunque, para los fines de esta tesis y teniendo en cuenta que es un prototipo, su viabilidad puede ser orientada a la producción en la franja de diseño que es de aproximadamente 1,2 a 2,1 A, 10 a 21 W.

A pesar de esta caída drástica en la corriente y la potencia, la celda logró sostener un voltaje constante de 9 V. Este comportamiento ratifica que la alta densidad de iones libres presente en una solución al 30 % de KOH proporciona una excelente conductividad, lo cual evita las caídas de tensión que sí se experimentaron al operar con mezclas al 20 % sin asistencia de batería (donde el voltaje descendió a 8,5 V). Derivado de este escenario, se presentó un fenómeno electroquímico particular frente al rendimiento a baja carga: si bien el volumen de gas recolectado resultó ser escaso (fluctuando entre 12 ml y 14 ml), la eficiencia energética calculada alcanzó picos notables del 62 % y 66 %. Aunque este resultado pudiera parecer contradictorio, obedece a un principio físico documentado, el cual indica que al operar con densidades de corriente cercanas a cero, los sobrepotenciales (las pérdidas por resistencia óhmica y por activación) se minimizan. Al no presentarse un exceso de energía disipándose como calor por efecto Joule, la escasa electricidad que ingresa al sistema se invierte de manera altamente efectiva en la separación de la molécula de agua.

6.7.11. Producción teórica vs. Producción experimental bajo nubosidad extrema

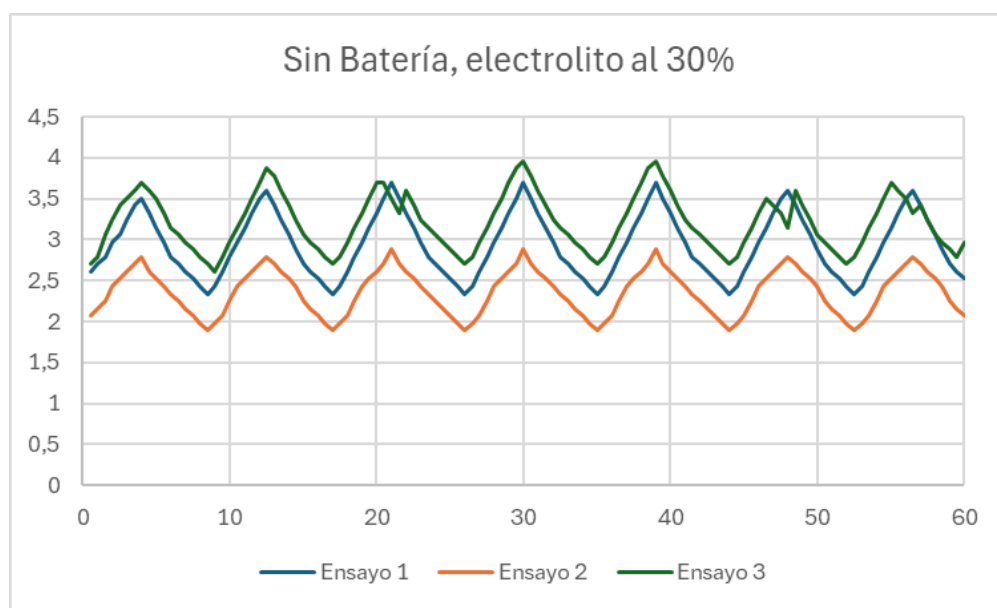
Para finalizar la evaluación de este escenario, se calculó la eficiencia de Faraday (o eficiencia volumétrica) bajo este régimen de baja potencia, tomando como referencia el primer ensayo (el cual registró una corriente promedio de 0,325 A durante 60 segundos). Al aplicar el cálculo estequiométrico correspondiente a un *stack* de cinco celdas, el modelo teórico estableció un volumen esperado de aproximadamente 18,5 ml de oxihidrógeno.

Al contrastar esta producción teórica calculada frente a la producción real alcanzada de 14,0 ml, se determinó que la eficiencia volumétrica se situó en un 75,6 %. La diferencia de aproximadamente 4,5 ml de gas no recolectado encuentra respaldo en la

literatura especializada: cuando un electrolizador opera a cargas muy bajas, la velocidad con la que el gas asciende y abandona la celda es lo suficientemente lenta como para incrementar el tiempo de residencia de las burbujas en el electrolito. Esta condición favorece la disolución del gas en la solución acuosa y propicia el cruce microscópico de gases que se recombinan dentro de la celda (*gas crossover*). Sumado a esto, el uso de KOH al 30 % incrementa la viscosidad del fluido, agravando este retraso y explicando el motivo por el cual una porción del gas generado no logró ser evacuada hacia el burbujeador.

Figura 37

Respuesta del sistema sin batería al 30 % de operación.



Estos resultados, cuyo comportamiento dinámico se ilustra en la Figura 37, indican que una mayor concentración de electrolito reduce significativamente la resistencia óhmica de la celda, mejorando la conductividad iónica del sistema. Como consecuencia de este balance, el proceso de electrólisis logró mantener eficiencias energéticas elevadas, superiores al 57 %, incluso operando con potencias ínfimas de entre 2 y 3 W a causa de la alta nubosidad.

6.7.12. *Análisis del error experimental*

Para cuantificar la repetibilidad de las mediciones, se procedió con el cálculo del error experimental relativo (coeficiente de variación) según cada condición de operación a partir de los tres ensayos realizados anteriormente. Para ello, se utilizaron las siguientes fórmulas estadísticas:

Desviación estándar. Se usa para medir la dispersión de los datos de un conjunto frente al valor promedio de los mismos (media aritmética) (University of Southampton, 2026) calculándose mediante la desviación estándar, tal como se expresa en la Ecuación 22:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (22)$$

Donde:

- s : Desviación estándar.
- x_i : Cada valor individual de la muestra.
- $\bar{x}$: La media aritmética de la muestra.
- n : El número total de datos evaluados. o 5,

Error relativo. Permite comparar la precisión o dispersión de dos o más medidas distintas respecto a su media (también conocido como coeficiente de variación) (University of Southampton, 2026) calculándose mediante la Ecuación 23:

$$E_r = \left(\frac{\text{Valor real} - \text{Valor medido}}{\text{Valor real}} \right) \times 100 \quad (23)$$

Aplicando estas ecuaciones, se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13*Cálculo de la desviación estándar y el error experimental.*

Condición	Alimentación	Volumen medio (ml)	Desviación estándar (ml)	Error relativo (%)
20 % KOH	Batería	86,0	6,08	7 %
25 % KOH	Batería	95,0	10,60	11 %
30 % KOH	Batería	87,0	2,00	2 %
20 % KOH	Directo (Nublado)	27,0	4,36	16 %
25 % KOH	Directo (Variable)	47,5	20,50	43 %
30 % KOH	Directo (Extremo)	13,3	1,15	9 %

Las mayores dispersiones se presentan en el acoplamiento directo debido a la intermitencia de la irradiancia solar, mientras que la alimentación con batería estabiliza la producción, reduciendo el error relativo a valores inferiores al 12 %.

El error experimental fue estimado a partir de los ensayos realizados por triplicado, cuyos resultados se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14*Error experimental (Estimado a partir de los triplicados).*

Concentración KOH	Configuración	Volumen medio (ml)	Desviación estándar (ml)	Coefficiente de variación (%)
20 %	Batería	86,0	6,08	7,1 %
25 %	Batería	95,0	10,44	11 %
30 %	Batería	87,0	2,00	2,3 %
20 % (Nublado)	Panel directo	27,0	4,36	16,1 %
25 % (Variable)	Panel directo	47,5	20,05	42,2 %
30 % (Nublado)	Panel directo	13,3	1,15	8,7 %

El alto coeficiente de variación registrado en la concentración al 25 % con panel directo se debe a la mezcla de condiciones climáticas soleadas (56,5 ml) y nubladas (24 ml).

6.7.13. *Comparación entre la producción teórica según la ley de Faraday y la experimental*

Haciendo uso de la Primera Ley de Faraday de la electrólisis, la cual establece que la cantidad de sustancia producida en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica que circula por el circuito (Sundén, 2019), se determina la producción molar teórica mediante la ecuación 24:

$$n_{H_2} = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \cdot N_{celdas} \quad (24)$$

Siendo:

- n_{H_2} : Moles de hidrógeno producidos (mol).
- I : Corriente media (A).
- t : Tiempo de operación (s).
- N_{celdas} : Número de celdas en serie.
- z : Número de electrones transferidos por molécula de H_2 ($z = 2$).
- F : Constante de Faraday (96 485 C/mol).

Teniendo en cuenta que la reacción global del agua produce 2 moles de H_2 por cada mol de O_2 , la relación estequiométrica entre las moles de hidrógeno y las moles totales de mezcla gaseosa (oxihidrógeno) se define mediante la Ecuación 25 :

$$n_{HHO} = n_{H_2} + 0,5 \cdot n_{H_2} = 1,5 \cdot n_{H_2} \quad (25)$$

Luego de obtener las moles de oxihidrógeno, a condiciones de 25 °C (298 K) y 1 atm de presión, se procede a hallar el volumen molar aplicando la ecuación de los gases ideales, tal como se expresa en la Ecuación 26 :

$$V = \frac{R \cdot T}{P} \quad (26)$$

Siendo:

- R : Constante universal de los gases ideales $\left(0,082057 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right)$.

Bajo estos principios, se estableció el cálculo del volumen teórico de oxihidrógeno a partir de la corriente media registrada en cada ensayo. La Tabla 15 expone la comparación de este cálculo con el volumen experimental máximo obtenido por cada condición operativa.

Tabla 15

Comparación de la producción volumétrica teórica vs. experimental según la corriente media.

Condición	Corriente media (A)	Vol. teórico (ml)	Vol. experimental (ml)
20 % KOH con Batería	2,058	117,4	90,0
25 % KOH con Batería	2,130	121,5	103,0
30 % KOH con Batería	2,095	119,5	89,0
20 % KOH Directo (Nublado)	0,904	51,5	32,0
25 % KOH Directo (Soleado)	1,211	69,1	56,5
30 % KOH Directo (Extremo)	0,356	18,5	14,0

Las discrepancias volumétricas observadas se atribuyen a fenómenos propios de la tecnología alcalina, tales como: corrientes parásitas presentes en el sistema (*shunt currents*), la disolución parcial del gas en el electrolito acuoso, la adherencia de burbujas a los electrodos (generando un efecto aislante) y la recombinación microscópica de gases dentro de la celda. La menor desviación se alcanzó operando con KOH al 25 % y alimentación mediante batería, lo que confirma esta concentración como la más adecuada para el diseño fluido-dinámico del prototipo.

6.7.14. *Indicadores energéticos: Consumo específico por kg de H_2*

Para determinar el consumo energético específico por kilogramo de hidrógeno generado, se hace necesario cuantificar la masa de H_2 presente. Para ello, se emplea la relación entre las moles calculadas y la masa (Sundén, 2019) (HyTechTools, 2025), tal como se expresa en la Ecuación 27 :

$$m_{H_2} = n_{H_2} \cdot M_{H_2} \quad (27)$$

Siendo:

- M_{H_2} : Masa molar del hidrógeno molecular ($2,016 \times 10^{-3}$ kg/mol).

Una vez cuantificada la masa, se requiere calcular la energía eléctrica consumida. Para ello, primero se determina la potencia eléctrica (P) del sistema, tal como se expresa en la Ecuación 28:

$$P = V \cdot I \quad (28)$$

Considerando un tiempo de operación constante de $t = 60$ s para todos los ensayos, se procede a calcular la energía consumida (E), tal como se expresa en la Ecuación 29:

$$E = P \cdot t \quad (29)$$

Finalmente, estableciendo la relación de energía consumida por unidad de masa, el consumo específico (CE) se define mediante la Ecuación 30:

$$CE = \frac{E \text{ (kWh)}}{m_{H_2} \text{ (kg)}} \quad (30)$$

A partir de la energía eléctrica consumida y la producción teórica de hidrógeno (estimada rigurosamente como $\frac{2}{3}$ del volumen de oxihidrógeno generado), se calcula el consumo energético específico (kWh/kg H_2). La Tabla 16 resume estos valores para los casos más representativos del diseño experimental.

Tabla 16

Consumo eléctrico y masa producida en los escenarios operativos más representativos.

Ensayo	Condición	Energía eléctrica (kWh)	Masa H_2 (kg)	Consumo (kWh/kg H_2)
Mejor eficiencia	30 % directo (nublado)	0,0000534	$7,62 \times 10^{-7}$	70,1
Mejor producción	25 % directo (soleado)	0,0001817	$3,08 \times 10^{-6}$	59,1
Base estable	20 % con batería	0,0003430	$4,90 \times 10^{-6}$	70,0

El rango de consumo obtenido ($59 - 70$ kWh/kg H_2) es completamente coherente con los valores reportados en la literatura para electrolizadores alcalinos de baja potencia y manufactura experimental . Cabe destacar que el punto óptimo de operación, el cual registra el menor consumo energético ($59,1$ kWh/kg H_2), se alcanza empleando una concentración de KOH al 25 % en acoplamiento directo bajo condiciones de alta irradiancia solar (HyTechTools, 2025).

Respecto a la interacción entre los datos base y los datos colombianos al año 2026, el consumo eléctrico del prototipo registra un valor promedio de 60 kWh/kg H_2 . Por otra parte, la tarifa eléctrica industrial en Colombia para el periodo de 2026 se sitúa entre \$ 750 y \$ 850 COP/kWh según el prestador del servicio y la región; específicamente en la región de Bucaramanga, dicho valor oscila entre \$ 720 y \$ 760 COP/kWh, lo que permite establecer un promedio de \$ 740 COP/kWh. Finalmente, el costo relacionado con la operación y el mantenimiento se desprecia debido a la naturaleza y alcance de un prototipo de laboratorio.

Costo eléctrico por kg de H_2 del prototipo se define tal como se expresa en la Ecuación 31:

$$\text{Costo}_{\text{prototipo}} = 60 \times 740 = 44400 \text{ COP/kg } H_2 \text{ o } 12,95 \text{ USD/kg } H_2 \quad (31)$$

Nota: Este costo no contempla la inversión en electrolizador, panel solar, batería ni mano de obra. Representa el costo variable de la electricidad consumida.

Tabla 17*Comparativa de costos según el tipo de hidrógeno.*

Tipo de hidrógeno	Proceso	Costo (USD/kg H_2)
Gris	Reformado con vapor de metano (SMR)	1,5 - 2,5
Verde (prototipo)	Electrólisis alcalina con proceso solar	12,95
Verde (industrial)	Electrólisis a gran escala	4,0 - 5,2

Nota. Datos de referencia a escala industrial recuperados de Iberdrola, 2026.

Comparativa con el hidrógeno gris: El hidrógeno gris es aquel que es reformado del gas natural. Las diferencias de costos de producción se detallan en la Tabla 17.

El hidrógeno producido por el prototipo es entre 5,2 y 8,7 veces más caro que el hidrógeno gris considerando únicamente el costo energético. Si se adiciona la amortización de los equipos fotovoltaicos y del electrolizador artesanal, el costo podría superar los 15 USD/kg, lo cual podría reducirse minimizando gastos de fabricación y ensamble. Sin embargo, el prototipo cumple con el alcance del proyecto que es demostrativo y educativo.

6.8. Análisis de viabilidad integral del sistema

Durante el desarrollo del presente proyecto, se abordó la viabilidad de la producción de hidrógeno verde a partir de energía fotovoltaica desde una perspectiva integral, ponderando aspectos técnicos, energéticos y económicos. A nivel técnico, se evidenció que la electrólisis del agua constituye una tecnología robusta y confiable, especialmente en su configuración alcalina. Esta variante fue seleccionada y validada en el prototipo experimental debido a su madurez operativa, facilidad de manufactura y accesibilidad de los materiales (Godula-Jopek, 2015). La integración del electrolizador con un sistema de generación fotovoltaica demostró ser funcional, permitiendo la obtención del vector energético sin emisiones directas de dióxido de carbono. Asimismo, el banco de pruebas construido permitió analizar y corroborar variables críticas como el comportamiento dinámico corriente-voltaje, las eficiencias de Faraday y energética, y la sensibilidad del

equipo ante fluctuaciones ambientales de irradiancia y temperatura.

No obstante, al analizar la viabilidad desde el punto de vista termodinámico y energético, se identificó que la arquitectura del sistema presenta limitaciones inherentes a la cadena de conversión Power-to-Gas (P2G). Si bien la celda electrolítica puede operar con eficiencias razonables, al acoplar las pérdidas por conversión fotoeléctrica en el panel, el almacenamiento intermedio en baterías y las sobretensiones de activación propias del proceso electroquímico, el rendimiento global del sistema experimenta una caída significativa. Esto implica que, aunque la producción de hidrógeno verde no representa la forma más eficiente de aprovechar directamente la energía solar de manera instantánea, sí constituye una solución estratégica invaluable para el almacenamiento masivo de energía a largo plazo y para la descarbonización de procesos donde la electrificación directa no resulta técnica o logísticamente viable (Agencia Internacional de Energía, 2019).

Desde el enfoque económico, la masificación de esta tecnología aún enfrenta barreras considerables. Los costos de capital (CAPEX) asociados a la infraestructura, incluyendo los electrolizadores, los módulos fotovoltaicos y la electrónica de potencia, continúan siendo elevados frente a la tecnología de combustibles fósiles. Consecuentemente, el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés) en su variante verde sigue siendo superior al del hidrógeno gris, lo que ralentiza su competitividad inmediata en el mercado libre (Agencia Internacional de Energía, 2019). Por esta razón, el cierre de la brecha financiera y su implementación a escala industrial dependen, en el corto plazo, de incentivos gubernamentales, del desarrollo continuo de economías de escala y de la innovación en nuevos materiales catalíticos.

Sin embargo, al contextualizar este análisis en el entorno colombiano, el panorama proyectado resulta altamente favorable. En estricta concordancia con los lineamientos de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2021), el país cuenta con un potencial excepcional en recursos renovables, especialmente en radiación solar y capacidad hídrica, proporcionando una base sólida para el despliegue de esta

tecnología. Los compromisos nacionales frente a la transición energética posicionan al hidrógeno verde no solo como una alternativa de descarbonización para la industria pesada y el transporte de carga, sino como un eje para la diversificación de la matriz productiva y de exportación nacional.

6.8.1. *Análisis de Viabilidad Económica (CAPEX y OPEX)*

El CAPEX (*Capital Expenditure*) corresponde a la estimación de los costos totales aplicados al proyecto y se calcula mediante la sumatoria del precio de todos los componentes e insumos necesarios para su construcción (GEMBAKAIZEN, 2026). Para delimitar el CAPEX de este prototipo, se totalizó el capital invertido en el desarrollo del banco experimental, el cual se detalla en la Tabla 18.

Al analizar el presupuesto, se observa que la inversión principal recae en el sistema de alimentación (panel solar y batería). Para futuros desarrollos, estos costos podrían reducirse buscando alternativas comerciales de menor capacidad o implementos más económicos.

Por su parte, el OPEX (*Operational Expenditure*) se refiere a los gastos operativos recurrentes que se asumen para mantener el funcionamiento y la viabilidad del sistema en marcha GEMBAKAIZEN, 2026. Para este cálculo, se plantearon dos escenarios operativos basados en las pruebas experimentales:

- Escenario A (Con batería): Condiciones de operación estable y mejor producción volumétrica. Parámetros tomados al 25 % de KOH: 103,0 ml y 21,37 W de consumo.
- Escenario B (Sin batería): Acople directo, mayor eficiencia energética (67 %), pero menor producción. Parámetros tomados al 25 % de KOH: 56,5 ml y 10,9 W de consumo.

Tabla 18*Presupuesto de inversión inicial (CAPEX).*

Ítem	Costo (COP)
Bases en acrílico	\$ 270.000,00
Termocupla	\$ 26.000,00
Cableado y puertos	\$ 8.400,00
Polybon S blanco	\$ 2.500,00
Productos en caucho (neopreno)	\$ 60.000,00
Tuberías y racores	\$ 78.232,00
Probetas de recolección	\$ 33.000,00
Componentes electrónicos	\$ 50.900,00
Pegantes y lijas	\$ 15.500,00
Arandelas y tornillería	\$ 3.600,00
Otros (ferretería general)	\$ 118.000,00
Panel fotovoltaico	\$ 650.000,00
Batería AGM 12 V 35 Ah	\$ 225.000,00
Hidróxido de potasio (500 g)	\$ 40.000,00
Total CAPEX	\$ 1.581.132,00

Nota. La mano de obra directa no se incluyó en este presupuesto al ser ejecutada por el propio investigador, aunque para un eventual escalamiento industrial deberá cuantificarse el costo por hora-hombre.

Para calcular el OPEX se realizan las siguientes suposiciones de operación:

- Régimen de operación: 2 horas diarias (plenitud de picos de irradiancia), 300 días al año, dando como resultado 600 h/año.
- Reposición de KOH: Se asume el reemplazo del electrolito cada 100 horas de

operación. Volumen aproximado de la celda: 50 ml (12,5 g de KOH por carga o el 25 %). Si se adquieren 500 g de KOH, el costo por gramo sería de 80 COP. En 600 h/año se realizarían 6 cambios, por lo tanto, el costo anual se determina mediante la Ecuación 32:

$$6 \times 12,5 \text{ g} \times 80 \text{ COP/g} = 6000 \text{ COP} \quad (32)$$

- Mantenimiento: Estimado en 20000 COP/año.

Los resultados de esta proyección financiera a 12 meses se presentan comparativamente en la Tabla 19.

Tabla 19

Proyección de gastos operativos anuales (OPEX).

Concepto	Escenario A (Con batería)	Escenario B (Sin batería)
Consumo eléctrico (kWh/año)	12,82 kWh	6,54 kWh
Costo equivalente de electricidad	\$ 9.487,00	\$ 4.840,00
Reposición de KOH	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00
Mantenimiento anual	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
Reposición de batería (anualizada)	\$ 225.000,00	\$ 0,00
OPEX Anual Total	\$ 260.487,00	\$ 30.840,00

Nota. El costo de electricidad se calculó tomando como referencia una tarifa base teórica de 740 COP/kWh. En el escenario fotovoltaico aislado, este valor representa la energía producida y autoconsumida.

El análisis de la Tabla 19 permite concluir que resulta financieramente más viable operar el sistema mediante acople directo (sin batería), reduciendo radicalmente los costos operativos. Si el enfoque del proyecto se centra exclusivamente en la producción diurna, los recursos de diseño deberán orientarse a maximizar el volumen de producción y el rendimiento térmico bajo los distintos escenarios de radiación solar.

7. Conclusiones

- De acuerdo con los objetivos de esta investigación, se diseñó, construyó y evaluó un prototipo funcional para la producción de hidrógeno verde mediante energía fotovoltaica. El sistema demostró viabilidad técnica a escala de laboratorio, alcanzando una eficiencia energética máxima del 66 % al utilizar un electrolito de KOH al 30 % en acoplamiento directo bajo condiciones de nubosidad (baja corriente), y del 67 % con KOH al 25 % en condiciones de acoplamiento directo bajo alta irradiancia solar. Por otro lado, la menor eficiencia registrada fue del 38 % con KOH al 25 % bajo condiciones de alimentación por batería, lo que evidencia que el almacenamiento intermedio introduce pérdidas por resistencia adicionales en el circuito.
- Se identificó que la concentración de hidróxido de potasio (KOH) es el parámetro operativo con mayor influencia en el rendimiento global. Las soluciones al 20 % presentaron valores de conductividad iónica insuficiente, mientras que al 30 % se incrementó la viscosidad del electrolito, lo que dificultó el desprendimiento de las burbujas de los electrodos y redujo la eficiencia volumétrica hasta un 74,4 %. En consecuencia, se determinó que la concentración óptima para la geometría y la dinámica de fluidos del prototipo es del 25 % de KOH, con la cual se alcanzó una eficiencia de Faraday del 84,7 % y el menor consumo energético específico, equivalente a 59,1 kWh/kg H_2 .
- El análisis del error experimental reveló que el error relativo fue inferior al 12 % en las configuraciones asistidas por batería; sin embargo, este indicador se elevó hasta el 43 % en el régimen de acoplamiento directo debido a la variabilidad e intermitencia de la irradiancia solar.
- Por su parte, el consumo energético obtenido, situado en un rango de 59–70 kWh/kg H_2 , se encuentra dentro del intervalo reportado en la literatura para electrolizadores

alcalinos de baja potencia (55–75 kWh/kg H_2), lo que valida el diseño y la manufactura del prototipo frente a las referencias académicas vigentes.

- En síntesis, el sistema presenta viabilidad técnica a escala prototipo, con una eficiencia máxima situada entre el 66 % (en acoplamiento directo con KOH al 30 % bajo condiciones de nubosidad) y el 67 % (con KOH al 25 % bajo alta irradiancia). Este rendimiento se encuentra condicionado principalmente por la concentración del electrolito (debido al balance entre conductividad y viscosidad) y por la intermitencia de la irradiancia solar. Finalmente, el consumo energético específico alcanza 59 kWh/kg H_2 obtenido en el punto óptimo ratifica la consistencia del prototipo respecto a los estándares de la tecnología alcalina a baja escala.
- Se determinó y validó la configuración de la instalación fotovoltaica, estructurada a partir de un módulo solar de 150 W. La selección de este y otros componentes auxiliares se fundamentó en criterios técnicos rigurosos, garantizando un suministro energético coherente con la demanda eléctrica del electrolizador.

8. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones orientadas a maximizar la eficiencia conductiva, se sugiere realizar ensayos operando con concentraciones de KOH entre el 25 % y el 30 %. Sin embargo, es fundamental advertir que escalar a estos valores en operaciones continuas requerirá, posiblemente, la integración de un sistema de refrigeración activa para gestionar el incremento en la disipación térmica y proteger la integridad de las tapas de acrílico y los empaques.
- Implementación de convertidores DC/DC con MPPT: La inclusión de un convertidor Buck-Boost con algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking) podría permitir que el panel trabaje siempre en el punto de máxima potencia que se identifica en las curvas I-V de las Figuras 27 y 28. El convertidor tendría la función de adaptar la tensión a los 10 V que demanda el electrolizador, previniendo caídas descontroladas y aumentando la producción diaria de hidrógeno aproximadamente un 30 % en días nublados.
- Ampliación de las ventanas de tiempo experimental realizando pruebas continuas en periodos de 30 a 60 minutos permitiría evaluar la resistencia de las tapas de acrílico y los empaques de neopreno ante el calentamiento por efecto Joule el cual menciona la posibilidad de ablandamiento o pérdidas de torque en la tornillería y la separación de gases que sugiere rediseñar las placas neutras de acero AISI 304 incorporando canales de flujo independientes y colectores separados en el ánodo y el cátodo. Ello permitiría obtener H_2 con pureza menor al 99 % y O_2 como subproducto.
- Se hace imperativo mantener un protocolo estricto de seguridad industrial durante la manipulación y purga del electrolito alcalino. Dado el alto poder corrosivo del hidróxido de potasio, es obligatorio el uso continuo de equipo de protección personal especializado (guantes de nitrilo, gafas de seguridad de sellado total y batas de laboratorio) para mitigar cualquier riesgo de quemaduras químicas severas.

- En caso de proyectar el escalamiento del sistema para incluir el almacenamiento presurizado del hidrógeno producido, se aconseja confinar los tanques en zonas aisladas, distantes de fuentes térmicas y del propio *stack* de electrólisis. El hidrógeno posee una energía de ignición excepcionalmente baja y una amplia ventana de inflamabilidad, por lo que su acopio exige normativas de seguridad, ventilación e instrumentación antideflagrante muy superiores a las de otros combustibles.
- Dado que el presente prototipo validó la efectividad operativa de los burbujeadores, se recomienda preservar y perfeccionar el uso de estos sellos hidráulicos en futuros rediseños. Estos dispositivos demostraron ser una barrera de seguridad indispensable; en caso de una ignición en la línea de salida, la trampa de agua interrumpe el retroceso de la llama, evitando catastróficamente que alcance la celda electroquímica.
- Contando con una mayor disponibilidad de recursos financieros para futuras iteraciones, se propone evaluar la sustitución del acero inoxidable AISI 304 por electrodos de Níquel puro o aleaciones con recubrimiento de este metal. Esta transición materialográfica reduciría significativamente los sobrevoltajes de activación anódica y catódica, disminuyendo el consumo energético total y elevando la eficiencia electroquímica del sistema.

Referencias

- Acciona. (2024). *Hidrógeno verde*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde>
- Agencia Internacional de Energía. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Arias García, R. M., & Pérez Abril, I. (2018). Nueva metodología para determinar los parámetros de un módulo fotovoltaico [New methodology for obtain the parameters of a photovoltaic module] [Recepción: 01 Octubre 2016. Aprobación: 01 Julio 2017.]. *Ingeniería Energética*, 39(1), 38-47.
- Bayat, A., Das, P. K., Saha, G., & Saha, S. C. (2025). Proton Exchange Membrane Electrolysis Revisited: Advancements, Challenges, and Two-Phase Transport Insights in Materials and Modelling. *Eng*, 6(4), 72. <https://doi.org/10.3390/eng6040072>
- BBC News Mundo. (2021, 25 de octubre). *Qué es el hidrógeno verde y por qué se habla de él como el combustible del futuro*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59013521>
- Caffarena Funcia, B. (2022, 1 de julio). *Diseño y simulación de un controlador predictivo multivariable para un electrolizador alcalino* [Treball de Fi de Grau]. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI) [Director: Carlos Ocampo-Martínez. Convocatòria: 06/2022].
- Chaparro Pérez, C. A., & Suarez Botello, J. F. (2025). *Banco experimental didáctico para la evaluación de la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico en función de su ángulo de inclinación con sistema de control programable* [Trabajo de grado]. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomécanicas, Escuela de Ingeniería Mecánica [Director: Carlos Fidel Amarís Castilla (PhD). Codirector: Yennifer Yuliana Ríos Díaz (PhD).].

- Diario del Puerto. (2024, 17 de abril). *Europa aprueba ayudas estatales de 1.400 millones para el uso del hidrógeno en el transporte*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.diariodelpuerto.com/logistica/europa-aprueba-ayudas-estatales-de-1400-millones-para-el-uso-del-hidrogeno-en-el-transporte-JM19730797>
- Esteban Torres López, M. D., & Gutiérrez Jiménez, N. (2021). *Diseño de una celda de generación de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua* [Tesis de maestría, Universidad EIA] [Trabajo de grado. Modalidad: Exploratorio. Director: Edgar Virgilio Rincón Gil, MSc. Asesora: Sandra Adela Torijano Gutiérrez].
- GEMBAKAIZEN. (2026). ¿Qué es CAPEX y OPEX? Ejemplos y estrategias. *Kaizen Institute*. <https://kaizen.com/es/insights-es/opex-ejemplos-estrategias/>
- Godula-Jopek, A. (2015). *Hydrogen production: by electrolysis* (1.^a ed.). Wiley-VCH.
- González Besa, Y. (2016). *Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica: análisis de sensibilidad de parámetros de diseño* [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería] [Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Industrial. Tutor: Francisco Javier Pino Lucena. Departamento de Ingeniería Energética].
- Guilbert, D., & Vitale, G. (2021). Dynamic emulation of an alkaline water electrolyzer: Parameter estimation and experimental validation. *Energies*, 14(18), 5828.
- Herraiz Cardona, I. (2012). *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/16804>
- HyTechTools. (2025, enero). Cómo calcular la energía de la electrólisis con base termodinámica. <https://www.hytechtools.es/science/energia-electrolisis-hidrogeno-calculo-termodinamica/>
- Iberdrola. (2026). Sentando las bases del hidrógeno verde. *Iberdrola S.A.* <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/sentando-bases-hidrogeno-verde>

- Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., Moure, M. J., & Valdés, M. D. (2020). *Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda* [Trabajo académico]. Universidad de Vigo, Departamento de Tecnología Electrónica [Contacto: ramiro.iglesias@uvigo.es].
- La República. (2024, 15 de abril). *La producción de hidrógeno renovable subió en 2024 y llegó a 416 toneladas por año*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.larepublica.co/economia/la-produccion-de-hidrogeno-renovable-subio-en-2024-y-llego-a-416-toneladas-por-ano-4095093>
- Laboratories, S. N. (2024). *Single Diode Equivalent Circuit Models* [PV Performance Modeling Collaborative]. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/single-diode-equivalent-circuit-models/>
- Latinus. (2026, 19 de abril). *Conflicto en Irán: precio del petróleo se dispara tras nuevo cierre del estrecho de Ormuz*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://latinus.us/mundo/2026/4/19/conflicto-en-iran-precio-del-petroleo-se-dispara-tras-nuevo-cierre-del-estrecho-de-ormuz-170203.html>
- Martín Martín, A. (2023). *Diseño y control de un sistema de generación de hidrógeno* [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales] [Trabajo de grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática. Tutor: Enrique Baeyens Lázaro. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática].
- Méndez Muñiz, J. M. (s.f.). *Energía solar fotovoltaica* [Información sobre tipos de paneles monocristalinos y policristalinos]. Fundación Confemetal.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Colombia: riqueza hídrica del mundo*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.minambiente.gov.co/colombia-riqueza-hidrica-del-mundo/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021, 28 de octubre). *Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf

- Ministerio de Minas y Energía. (2026, 19 de abril). *Colombia como uno de los líderes latinoamericanos en energía hidroeléctrica le apuesta a la aplicación de un estándar mundial de sostenibilidad*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-como-uno-de-los-l%C3%ADderes-latinoamericanos-en-energ%C3%ADa-hidroel%C3%A9ctrica-le-apuesta-a-la-aplicaci%C3%B3n-de-un-est%C3%A1ndar-mundial-de-sostenibilidad-con-el-apoyo-de-la-cooperaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-y-desarrollo-seccional-suiza-y-la-asociaci%C3%B3n-internacional-de-energ%C3%ADa/>
- Miranda Millacoy, M. F. (2022, abril). *Diseño, fabricación y caracterización de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Universidad de O'Higgins.
- MonSolar. (2024). *Cómo afecta la temperatura a una placa solar* [Consultado en abril de 2026]. <https://www.monsolar.com/blog/como-afecta-la-temperatura-a-una-placa-solar-2/>
- Ordúz Ríos, S., & González Mantilla, L. A. (2023). *Generación de hidrógeno verde en campo petrolero colombiano: estudio de viabilidad y beneficios* [Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos] [Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Páez, M.Sc. Codirector: Raúl Villamizar Durán, M.Sc.].
- Organización de las Naciones Unidas. (2024). *Causas y efectos del cambio climático*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Repsol. (2024). *Electrolizador*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/electrolizador/index.cshtml>

- Retema. (2024). *Qué es la electrólisis y para qué sirve*. Consultado el 19 de abril de 2026, desde <https://www.retema.es/actualidad/que-es-la-electrolisis-y-para-que-sirve>
- Sánchez, M., Amores, E., Rodríguez, L., & Clemente-Jul, C. (2017). Modelado y simulación de sistemas de producción de hidrógeno vía electrólisis alcalina a partir de energías renovables [Autores afiliados: Centro Nacional del Hidrógeno, Universidad Europea de Madrid, ETSI Minas y Energía (UPM)]. *Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Pilas de Combustible*, 183.
- Sánchez, M., Amores, E., Rodríguez, L., & Clemente-Jul, C. (2020). Semi-empirical model and experimental validation for a zero-gap alkaline water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8198-8211.
- Senza Hydrogen. (2024). *Understanding PEM electrolyzer components* [Consultado en abril de 2026]. <https://www.senzahydrogen.com/es/understanding-pem-electrolyzer-components/>
- Soto Alegre, O. E. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada* [Memoria de grado]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica [Profesor guía: Patricio Andrés Mendoza Araya. Comisión: Jorge Silva Sánchez, Rodrigo Moreno Vieyra].
- Sundén, B. (2019). *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. Academic Press.
- Sun-Earth. (2018). Poly-Crystalline Solar Panel TPB156×156-36-P [Información técnica del fabricante Sun-Earth sobre paneles policristalinos]. <https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Crystalline/5b2c8cc10a7b7.pdf>
- SunFields. (2024). *Parámetros de los paneles solares* [Consultado en abril de 2026]. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/parametros/>
- Ulleberg, Ø. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(7), 743-754. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00141-4)

University of Southampton. (2026, enero). *Variance, Standard Deviation and Standard Error*. <https://library.soton.ac.uk/variance-standard-deviation-and-standard-error>

Wikipedia contributors. (2024). *Celda electrolizadora de óxido sólido* [Consultado en abril de 2026]. https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_electrolizadora_de_%C3%B3xido_s%C3%B3lido

Apéndice A

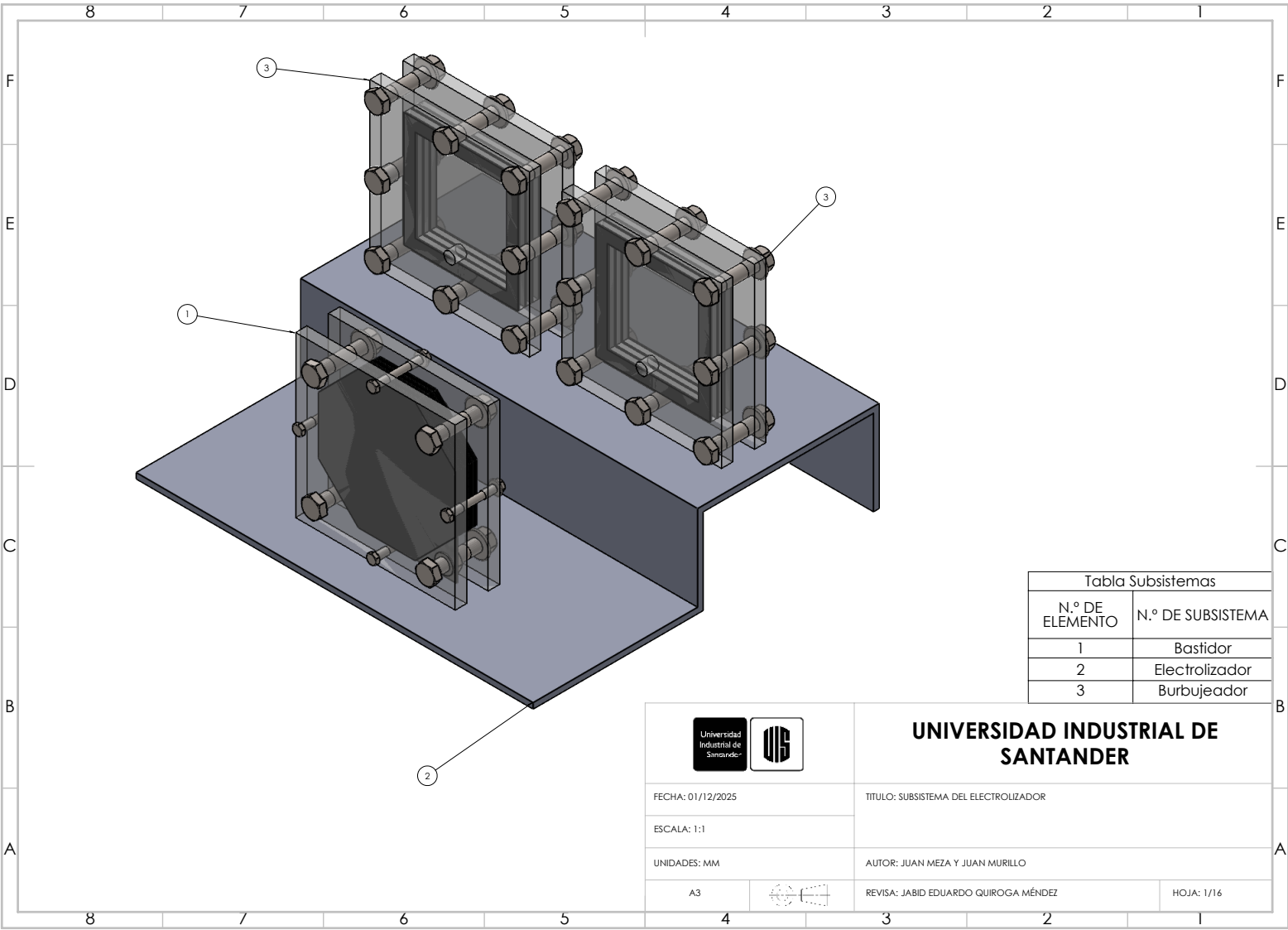
Datos experimentales del electrolizador

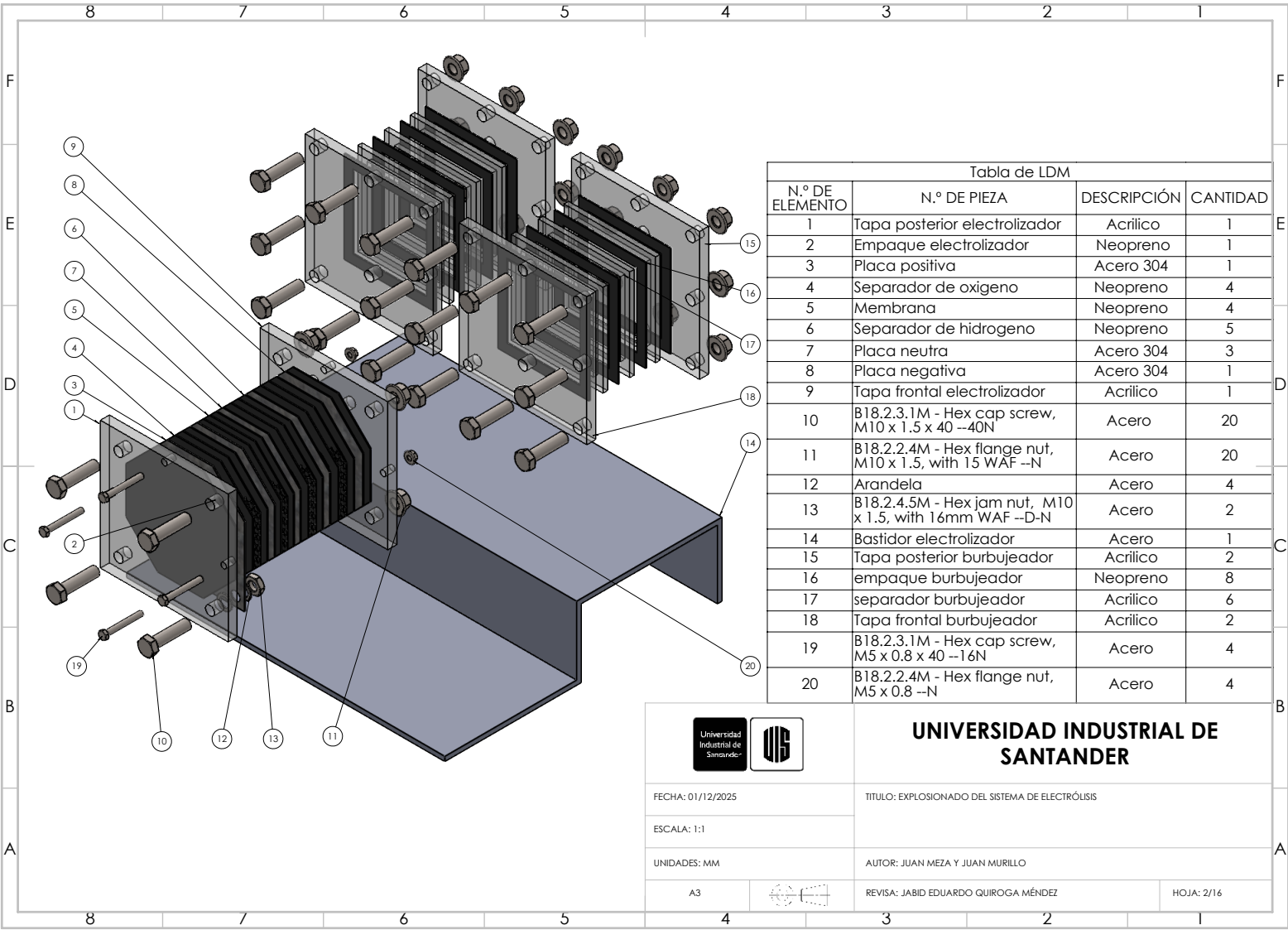
Configuración	Vol. (ml)	Tiempo (s)	Q (ml/s)	Q (Lpm)	I (A)	V (V)	Pot. Eléc. (W)	V (L/s)	Moles H_2	Pot. H_2 (W)	Efic. (%)
BAT-20 %	79	60	1,317	0,079	2,051	10	20,514	0,0013	$3,59 \times 10^{-5}$	10,258	50
	89	60	1,483	0,089	2,050	10	20,499	0,0015	$4,04 \times 10^{-5}$	11,554	56
	90	60	1,500	0,090	2,058	10	20,583	0,0015	$4,09 \times 10^{-5}$	11,684	57
BAT-25 %	83	60	1,383	0,083	2,143	10	21,433	0,0014	$3,77 \times 10^{-5}$	10,775	50
	103	60	1,717	0,103	2,137	10	21,372	0,0017	$4,68 \times 10^{-5}$	13,371	63
	99	60	1,650	0,099	2,111	10	21,107	0,0016	$4,49 \times 10^{-5}$	12,852	61
BAT-30 %	89	60	1,483	0,089	2,095	10	20,950	0,0015	$4,04 \times 10^{-5}$	11,554	55
	87	60	1,450	0,087	2,239	10	22,394	0,0015	$3,95 \times 10^{-5}$	11,294	50
	85	60	1,417	0,085	1,795	10	17,950	0,0014	$3,86 \times 10^{-5}$	11,035	61
PF-20 %	24	60	0,400	0,024	0,853	8,5	7,252	0,0004	$1,09 \times 10^{-5}$	3,116	43
	25	60	0,417	0,025	0,861	8,5	7,321	0,0004	$1,13 \times 10^{-5}$	3,245	44
	32	60	0,533	0,032	0,904	8,5	7,685	0,0005	$1,45 \times 10^{-5}$	4,154	54
PF-25 %	56,5	60	0,942	0,057	1,212	9	10,904	0,0009	$2,56 \times 10^{-5}$	7,335	67
	24	60	0,400	0,024	0,608	9	5,469	0,0004	$1,09 \times 10^{-5}$	3,116	57
	62	60	1,033	0,062	1,723	9	15,503	0,0010	$2,81 \times 10^{-5}$	8,049	52
PF-30 %	14	60	0,233	0,014	0,326	9	2,930	0,0002	$0,64 \times 10^{-5}$	1,817	62
	12	60	0,200	0,012	0,262	9	2,358	0,0002	$0,54 \times 10^{-5}$	1,558	66
	14	60	0,233	0,014	0,357	9	3,212	0,0002	$0,64 \times 10^{-5}$	1,817	57

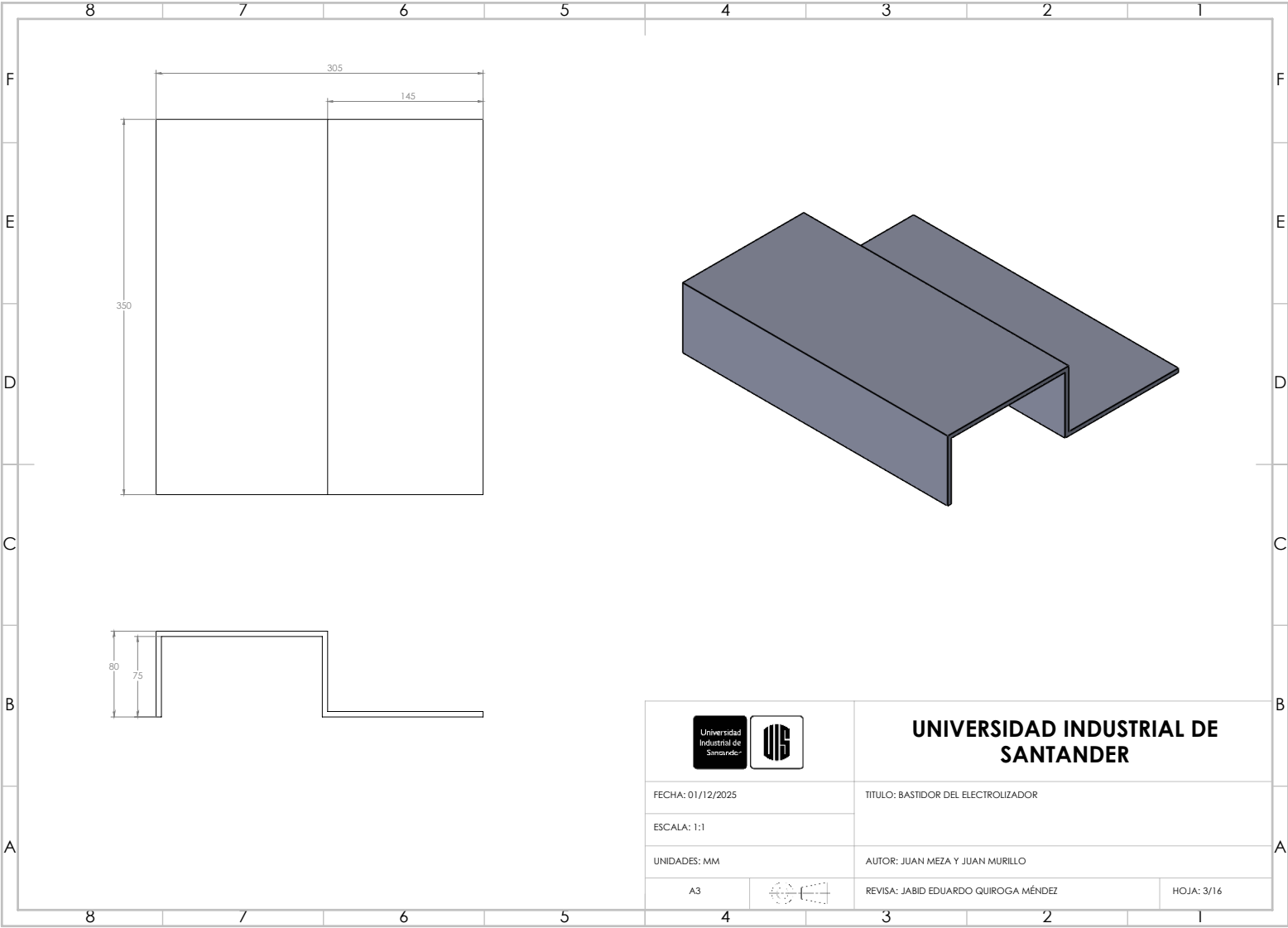
Nota. BAT corresponde a las pruebas con alimentación por batería, mientras que PF corresponde a la alimentación directa por panel fotovoltaico. Los caudales y moles de hidrógeno fueron estimados a partir de la producción estequiométrica del oxihidrógeno. Elaboración propia.

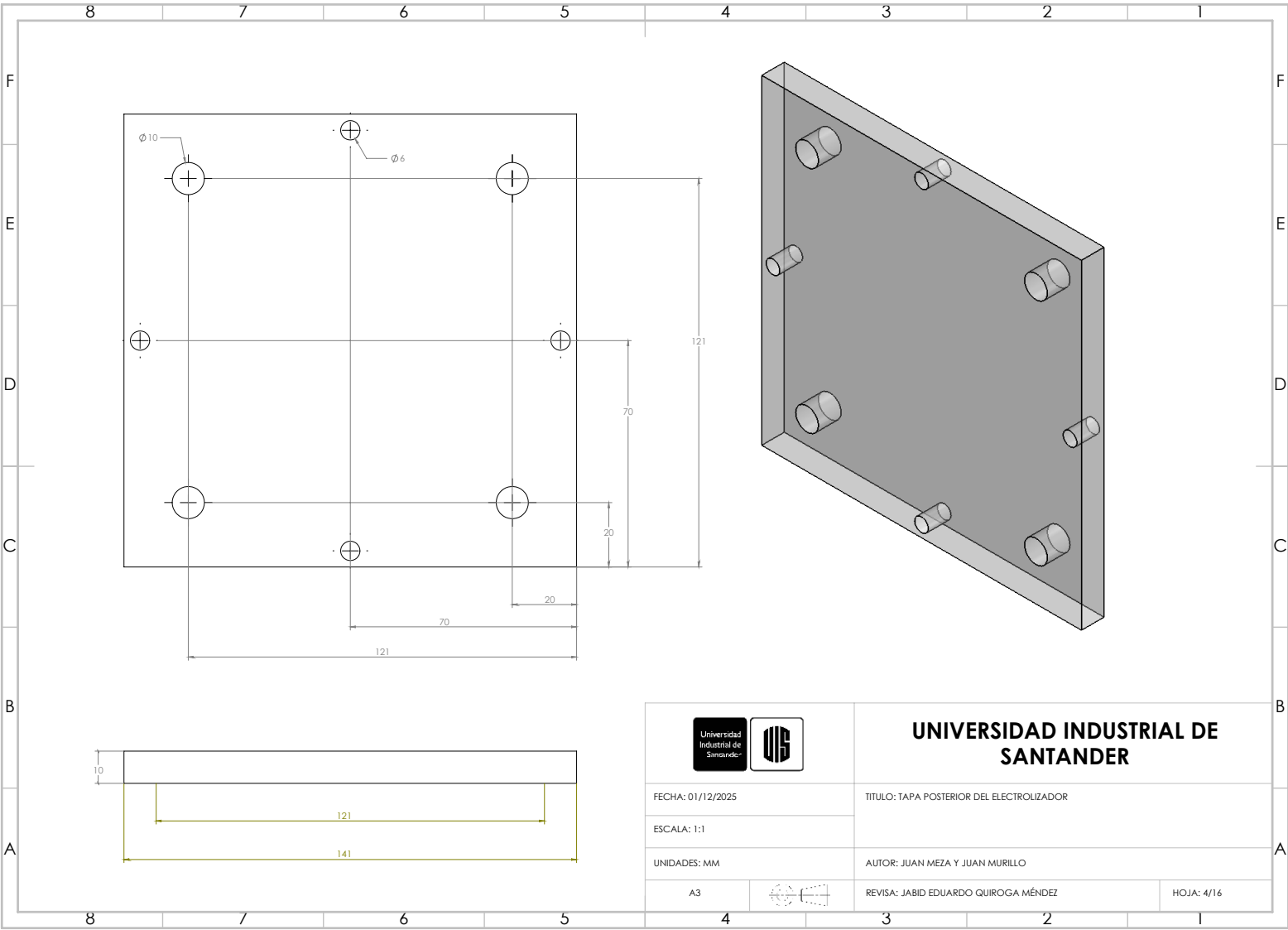
Apéndice B

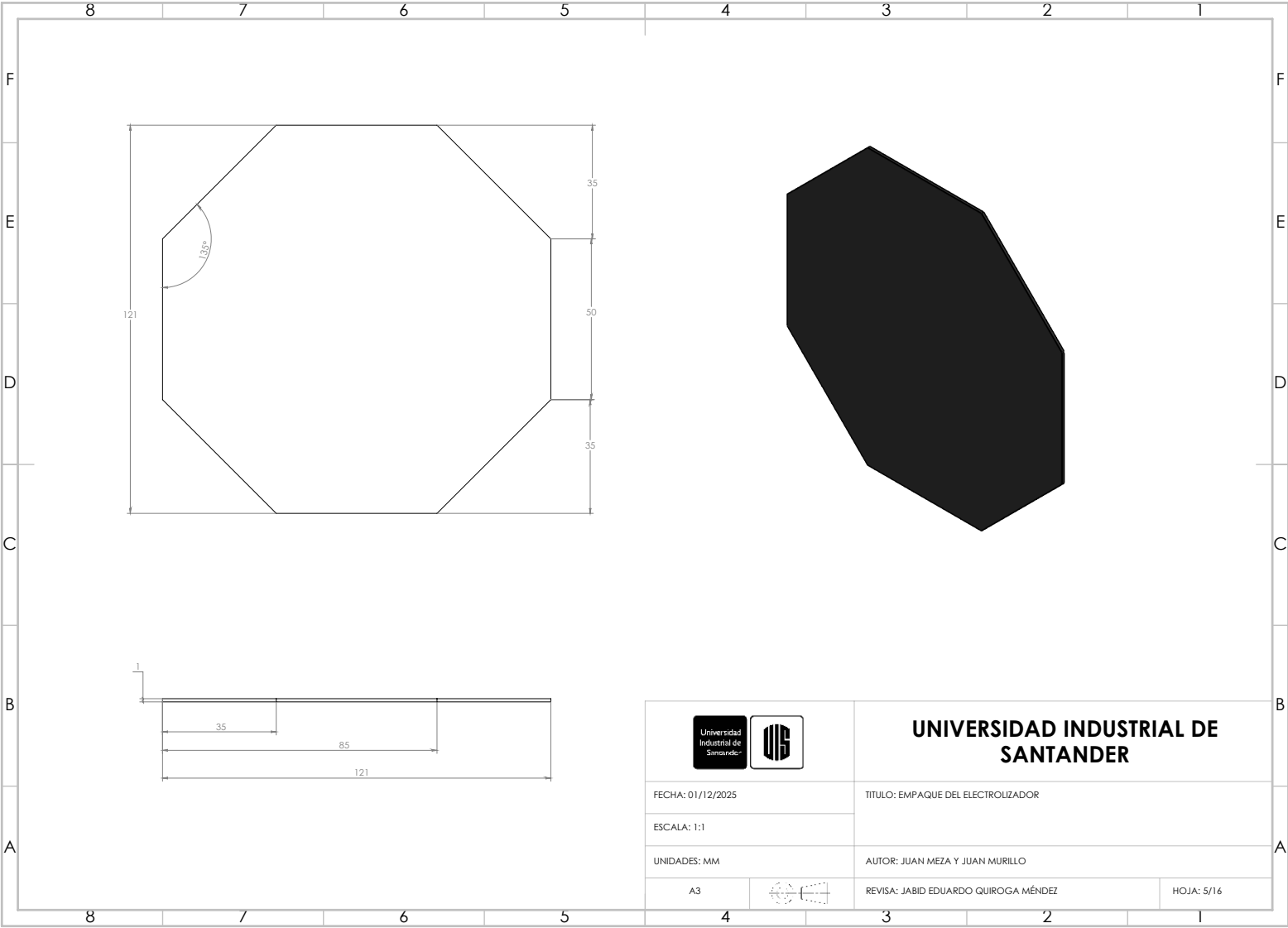
Planos del electrolizador



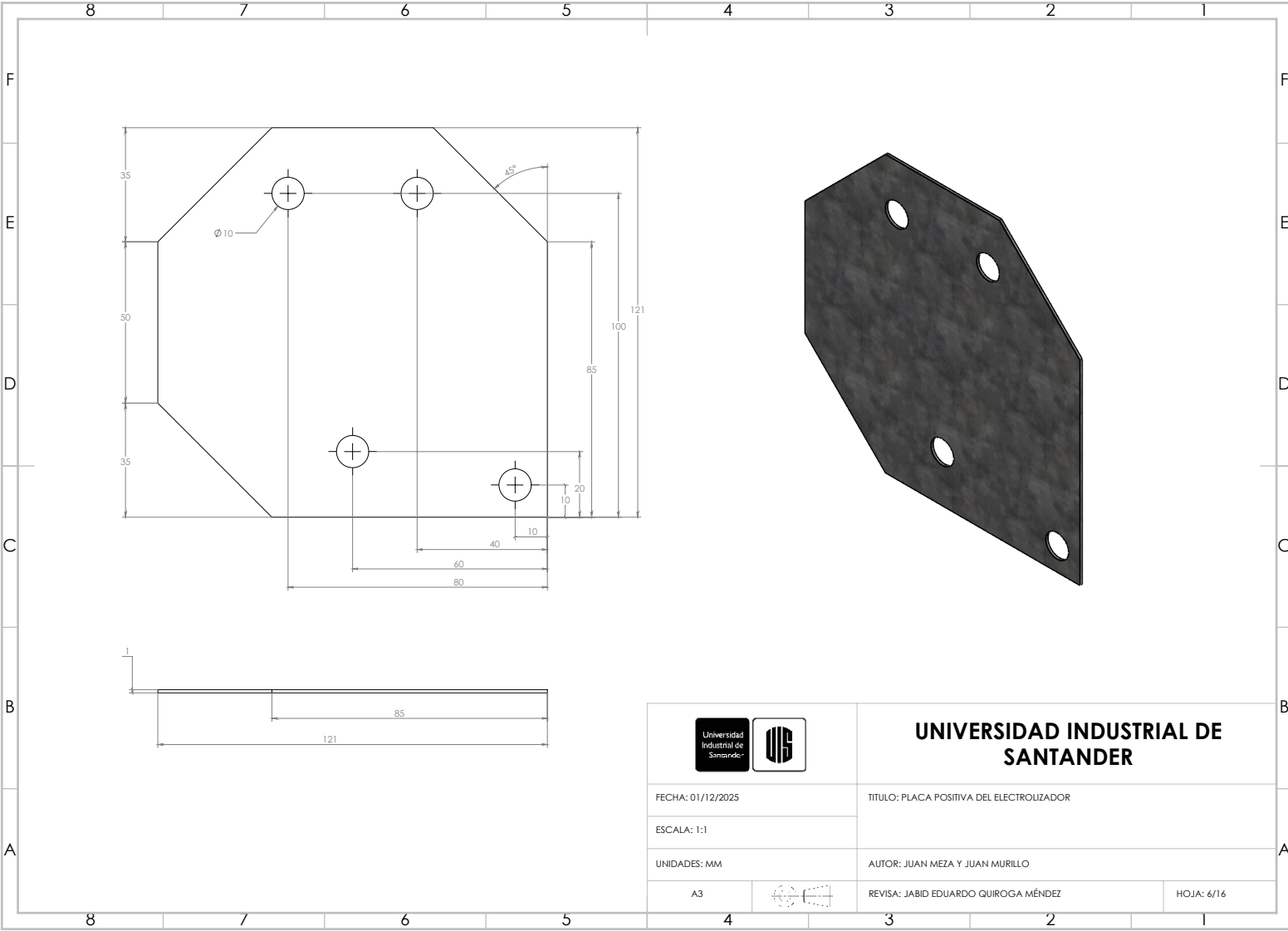




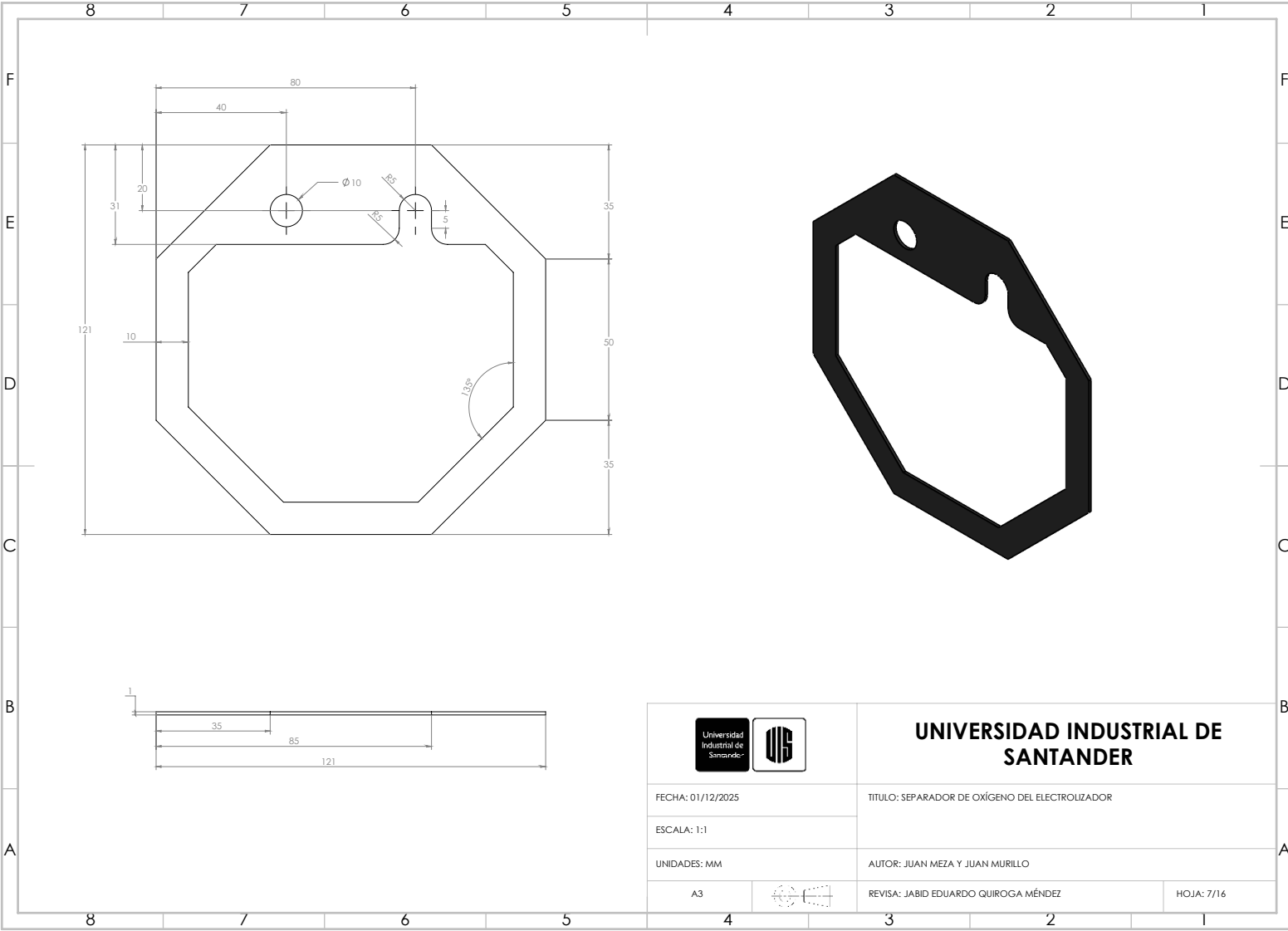




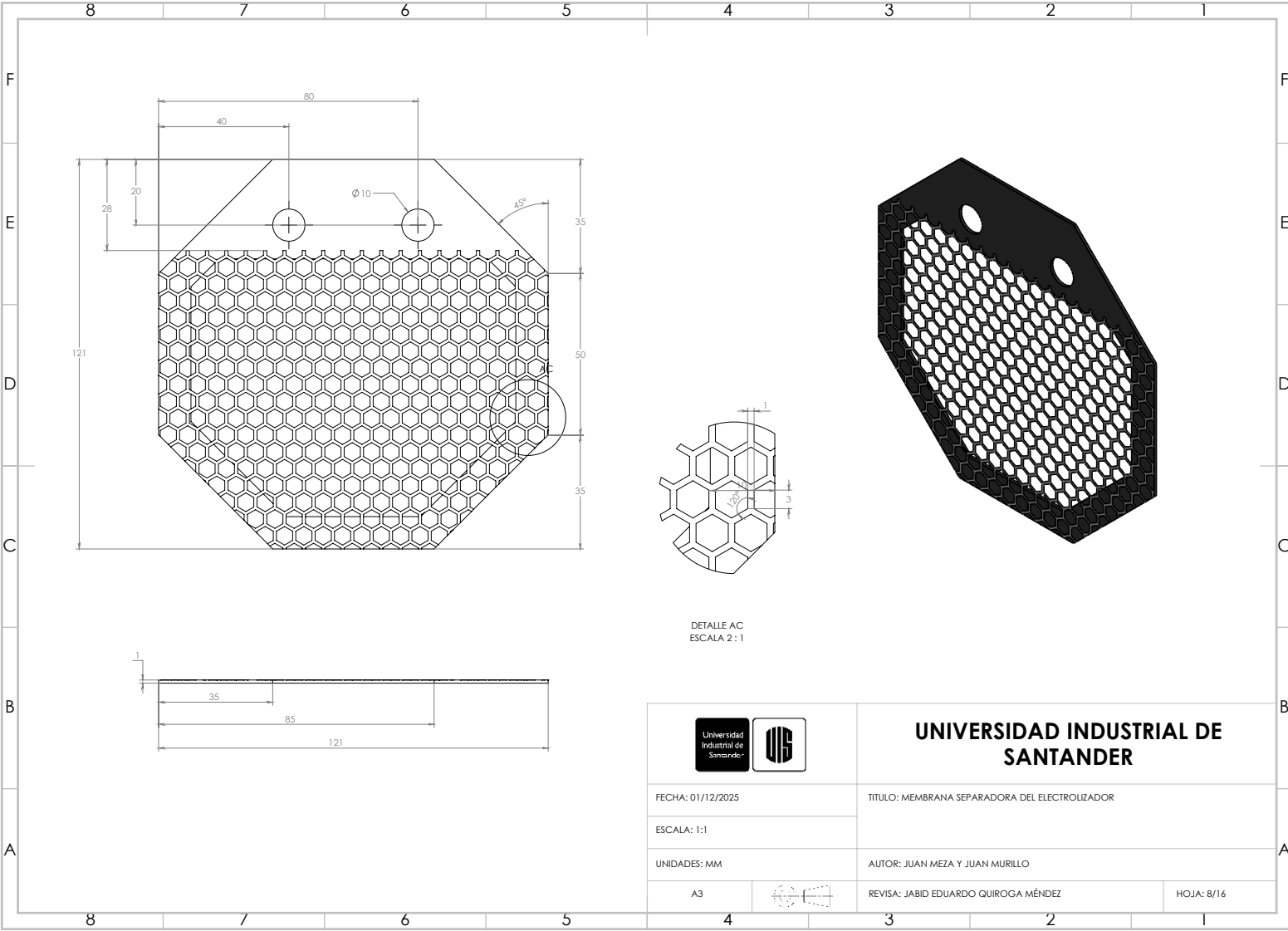
Universidad Industrial de Santander 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: EMPAQUE DEL ELECTROLIZADOR	
ESCALA: 1:1			
UNIDADES: MM		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
A3		REVIS: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	HOJA: 5/16



Universidad Industrial de Santander 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: PLACA POSITIVA DEL ELECTROLIZADOR	
ESCALA: 1:1			
UNIDADES: MM		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
A3		REVISÁ: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	HOJA: 6/16

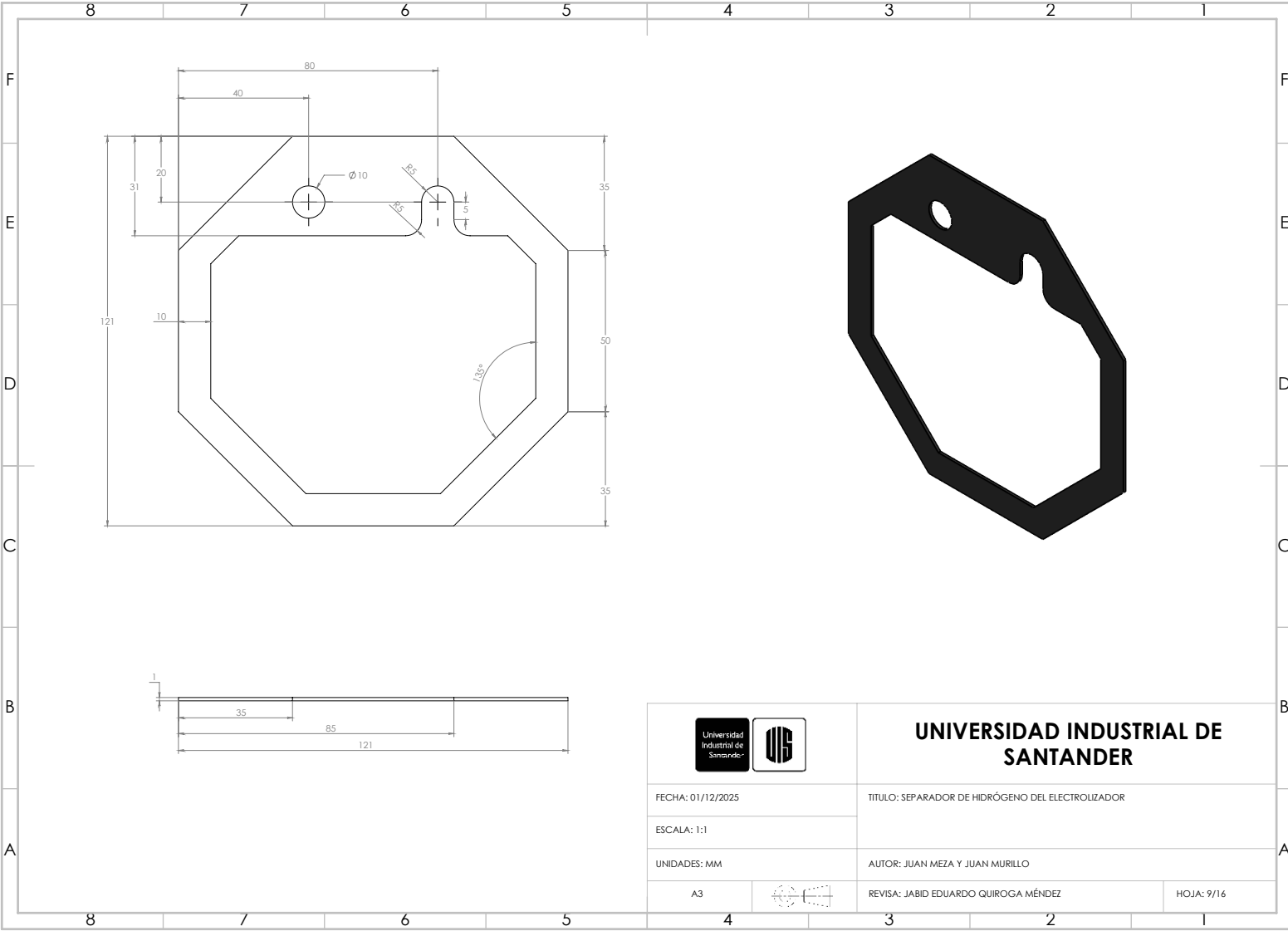


Universidad Industrial de Santander 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				
FECHA: 01/12/2025		TITULO: SEPARADOR DE OXÍGENO DEL ELECTROLIZADOR				
ESCALA: 1:1						
UNIDADES: MM		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO				
A3		REVISÁ: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ			HOJA: 7/16	
4		3		2		1

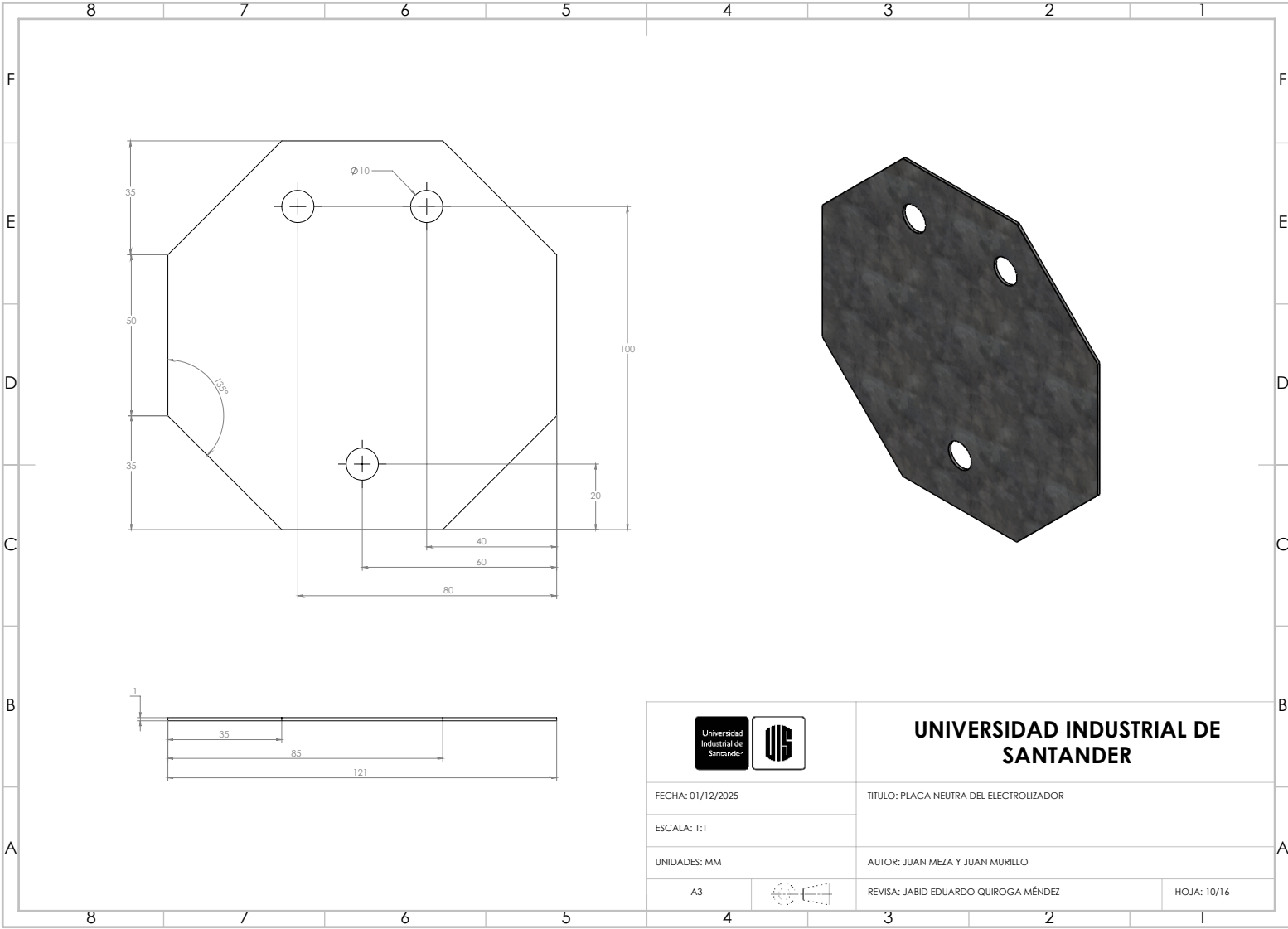


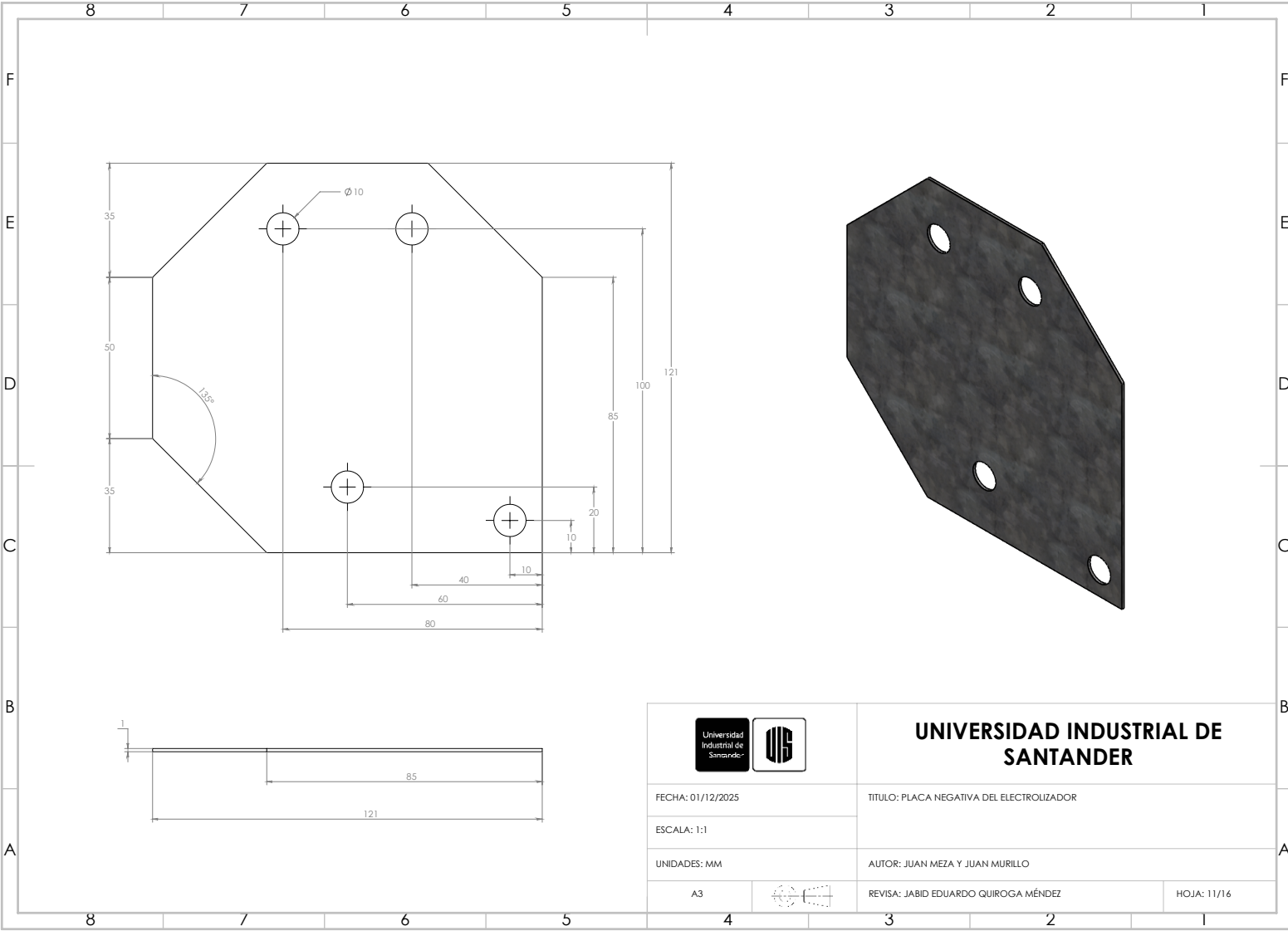
DETALLE AC
ESCALA 2 : 1

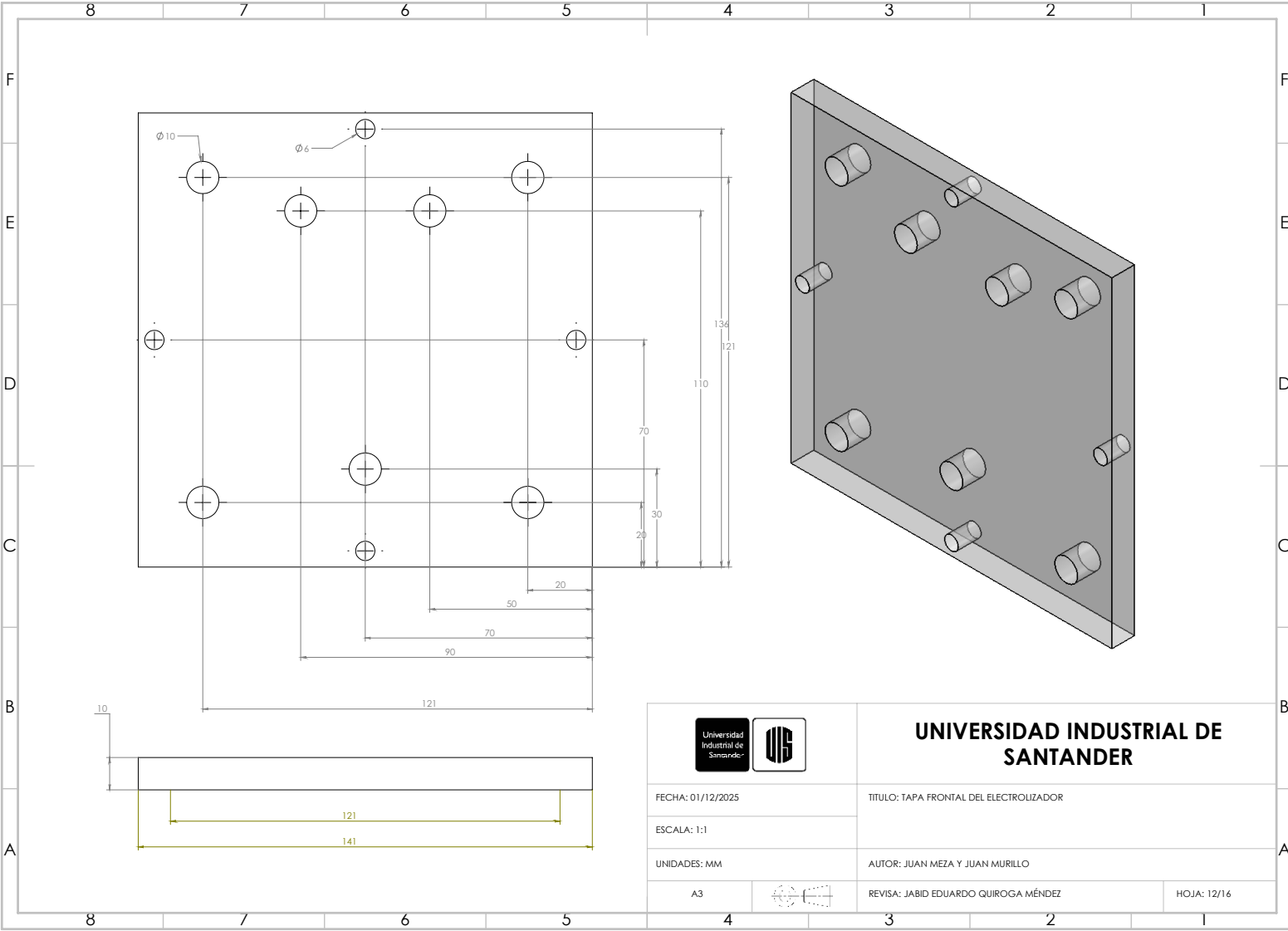
Universidad Industrial de Santander 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: MEMBRANA SEPARADORA DEL ELECTROLIZADOR	
ESCALA: 1:1			
UNIDADES: MM		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
A3		REVIS: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	HOJA: 8/16



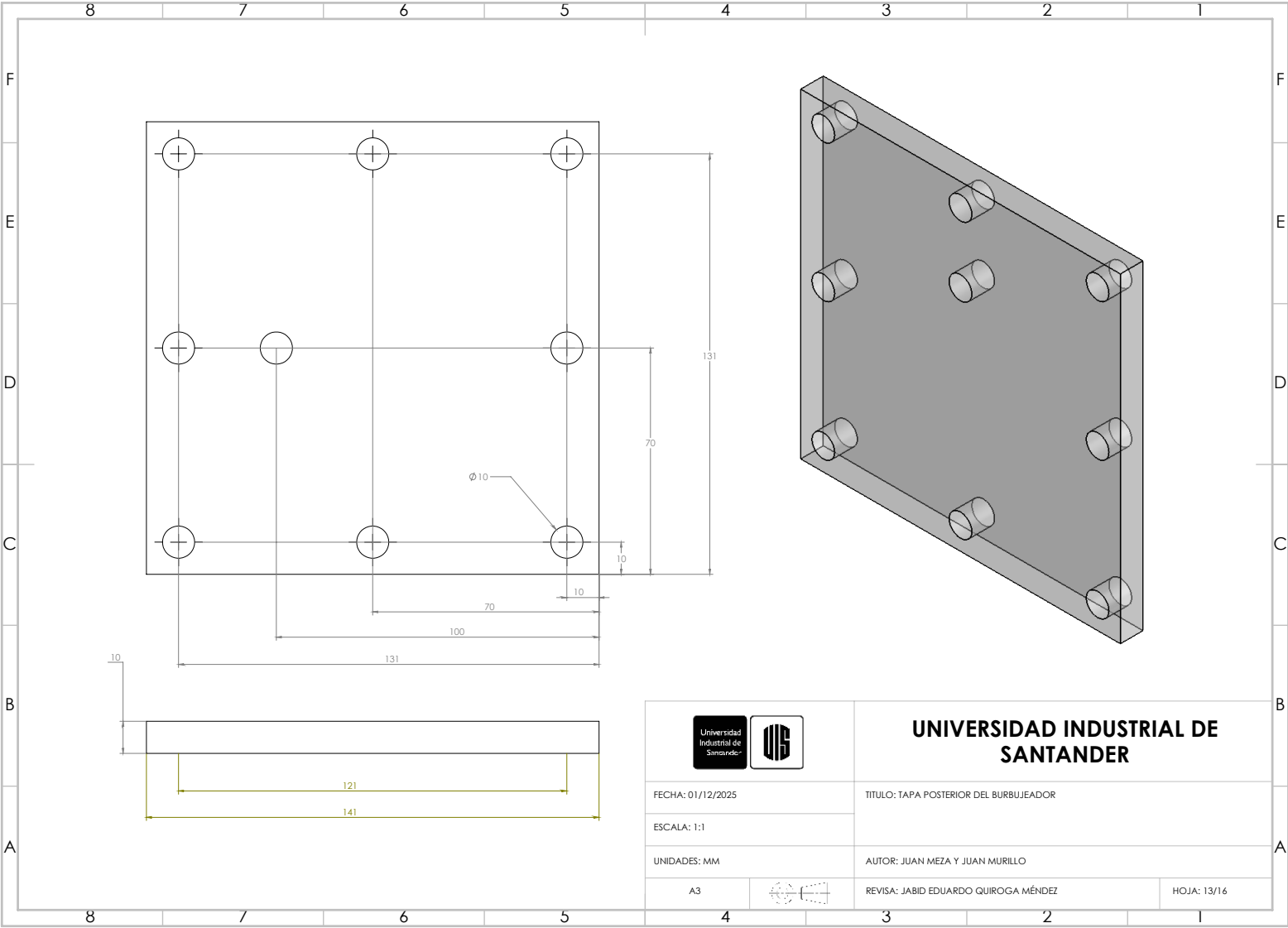
Universidad Industrial de Santander 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: SEPARADOR DE HIDRÓGENO DEL ELECTROLIZADOR	
ESCALA: 1:1			
UNIDADES: MM		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
A3		REVISÁ: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	HOJA: 9/16

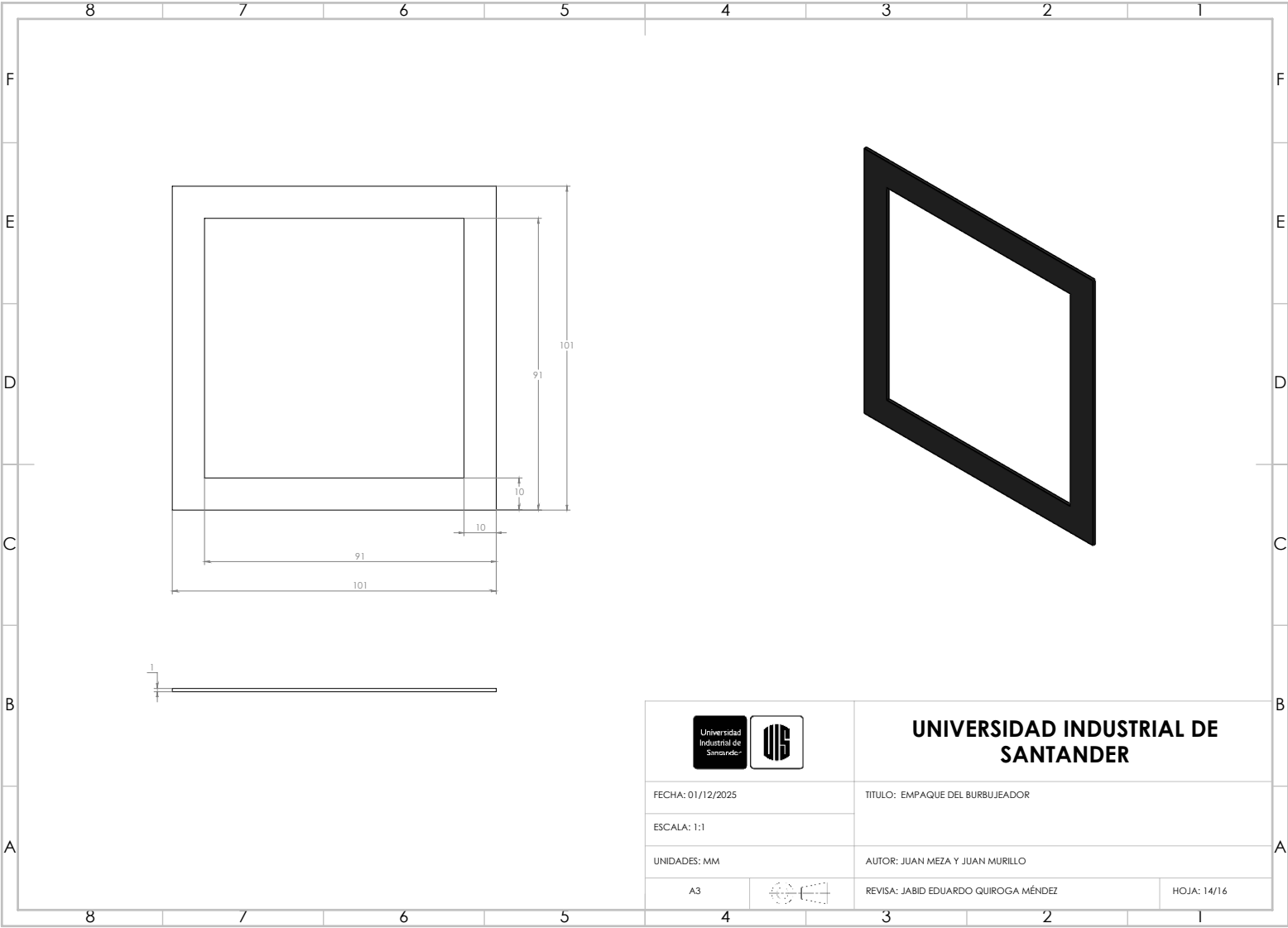


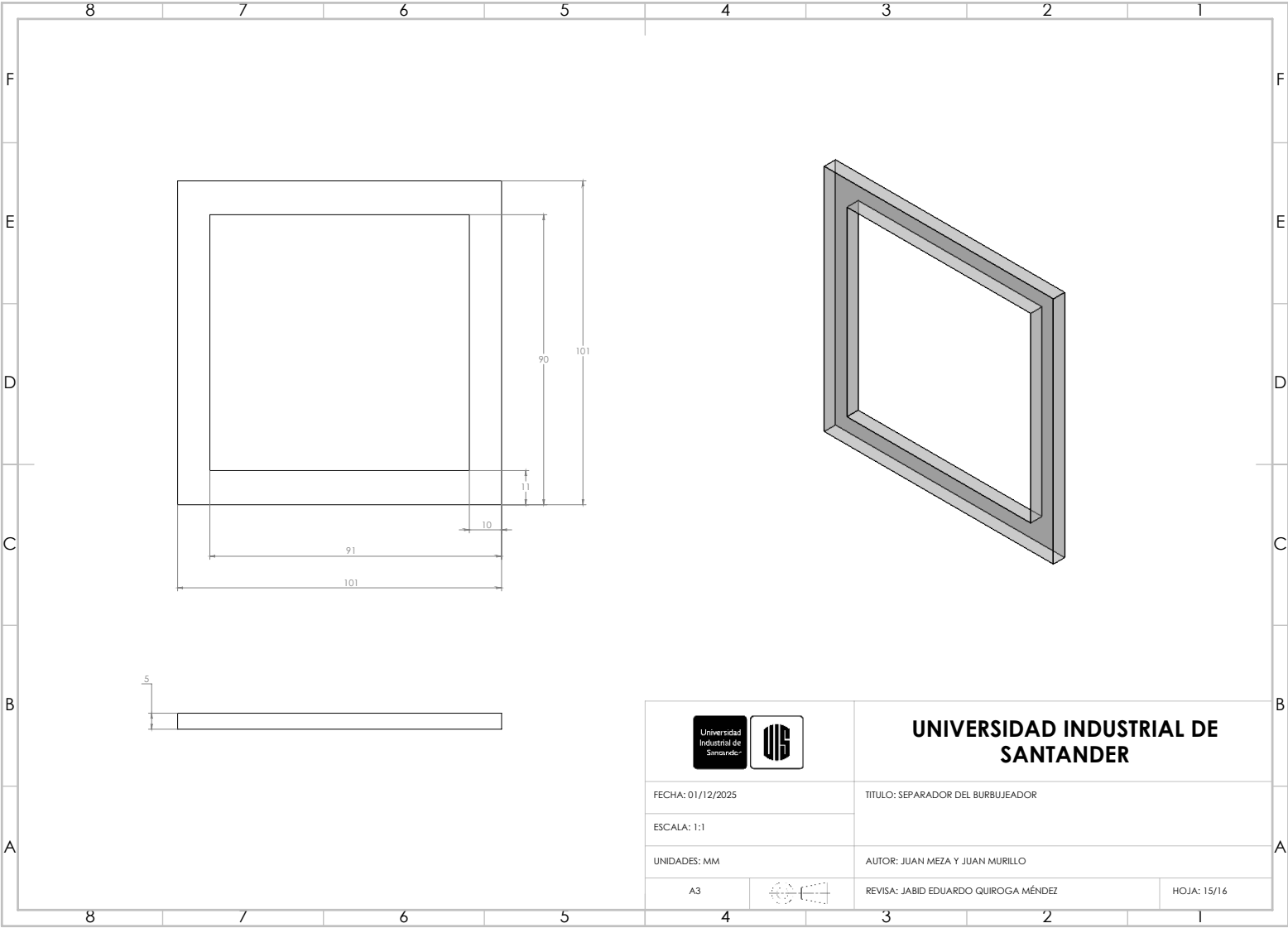


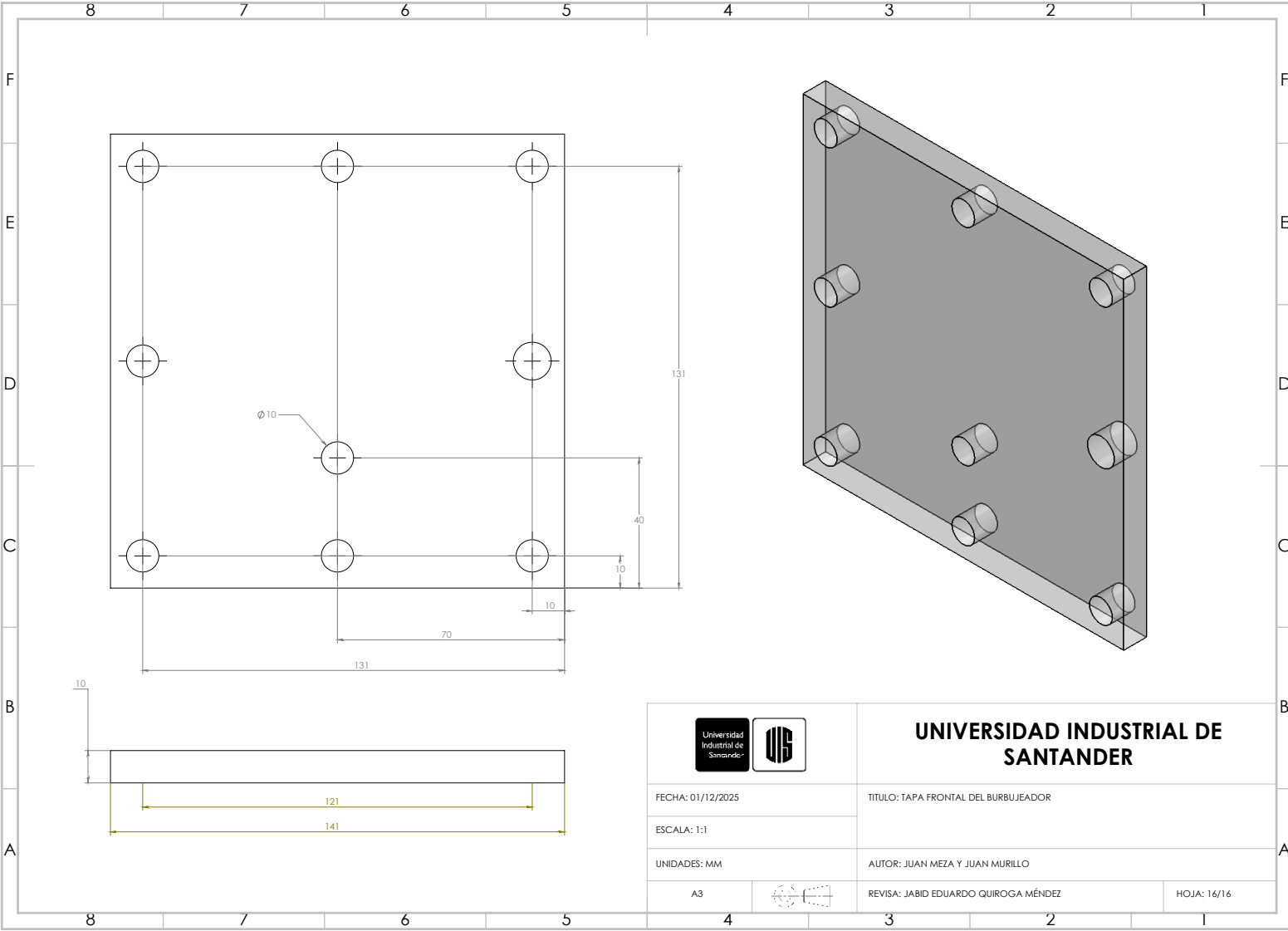


Universidad Industrial de Santander UIS		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: TAPA FRONTAL DEL ELECTROLIZADOR	
ESCALA: 1:1		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
UNIDADES: MM		REVIS: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	
A3		HOJA: 12/16	









Universidad Industrial de Santander UIS		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/12/2025		TITULO: TAPA FRONTAL DEL BURBUJEADOR	
ESCALA: 1:1		AUTOR: JUAN MEZA Y JUAN MURILLO	
UNIDADES: MM		REVIS: JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ	
A3		HOJA: 16/16	