

**Evaluación de un Método Basado en PWM para el Mejoramiento de la Producción
de Hidrógeno en Electrolizadores Alcalinos**

Andrés Mauricio Hernández Cáceres

Karen Alexandra Sánchez Flórez

Trabajo de Grado para Optar al Título de

Ingeniero/a Electricista

Directora

Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos

Codirectores

Ing. Diana María Villalobos Orduz

MSc. Luis Eduardo García Rodríguez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica

y de Telecomunicaciones

Bucaramanga 17 de abril

2026

Dedicatoria

A nuestro Dios que nos ha acompañado siempre en las oraciones de nuestras familias, nunca nos ha abandonado y nos ha enviado ayudas milagrosas en los momentos más difíciles de nuestras vidas. Su presencia en este proceso fue el más importante.

A nuestras familias, el núcleo y motor de nuestra convicción, quienes son el centro de nuestras aspiraciones y su futuro, nuestro más anhelado propósito.

A nuestros estimados amigos quienes nos han dado ánimo, nos han llenado de cariño y momentos felices.

A nuestra Universidad Industrial de Santander, que nos ha acogido como una madre, nos ha abierto la mente y nos ha llenado de herramientas para lograr cambiar nuestros destinos.

Karen Alexandra Sánchez Flórez

Andrés Mauricio Hernández Cáceres

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres, Luz Elena Flórez y Alexander Sánchez, quienes desde el inicio me brindaron su apoyo para comenzar mi vida profesional, la cual fui construyendo paso a paso junto a ellos.

A mi hermana, Nicol Sofía; a mi familia y a mis amigos, quienes estuvieron presentes, dándome ánimo e impulsándome en aquellos momentos en los que más necesitaba motivación.

Adicionalmente, agradezco a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a sus profesores, quienes me guiaron a lo largo de mi formación profesional, compartiendo sus conocimientos y experiencias. Gracias a ello, fue posible llegar a esta etapa final que culmina con la realización de esta tesis de grado.

Karen Alexandra Sánchez Flórez

Agradezco a Dios, este logro solo es posible gracias a su ayuda, por darme a la mejor familia, y la mejor enseñanza en la vida. Solo el dueño de la naturaleza es quien puede hacer que sus hijos en Cristo podamos descubrir sus bondades y usarlas para buscar un bien mayor.

Agradezco a mis madres, La Santísima Virgen María, Carmen Rosa Cáceres, Flor de María Cáceres mis madres que Dios me ha dado, para cuidarme, enseñarme y hacerme crecer como persona. A ellas, mi mayor amor y agradecimiento. Por tanta paciencia y amor que se me han conferido espero algún día ser su merecedor.

Agradezco a mis profesores, María Alejandra Mantilla, Diana Villalobos, Gabriel Ordoñez, entre tantos otros que no aparecen aquí, pero estarán siempre en mis oraciones, gracias por abrir mi mundo y llevar a los límites mis capacidades.

Al ingeniero Luis Eduardo García, quien siempre creyó en mí y en este proyecto, gracias a él, este avance fue posible, poder ser el aprendiz de su maestría ha sido un gran milagro en mi vida.

A mis amigos de la infancia, y de la juventud quienes siempre han creído en mí y han sido un gran apoyo en los momentos difíciles.

Andrés Mauricio Hernández Cáceres

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Referencial.....	14
3. Método	16
3.1 Preparación de Pruebas.....	17
3.1.1 Caracterización de Materiales.....	17
3.1.1.1 Electrodo.....	17
3.1.1.2 Electrolito.....	18
3.1.1.3 Electrolizador.....	19
3.1.1.4 Equipos de Protección Personal (EPP).....	21
3.1.2 Caracterización de Equipos Eléctricos Usados.....	22
3.1.2.1 Fuentes de Energía.....	22
3.1.2.2 Equipos de Medida.....	23
3.1.2.3 Interpolador.....	25
3.1.3 Disposición Física de Componentes	26
3.2 Pruebas en Corriente Continua (DC).....	26
3.2.1 Consideraciones Previas	27
3.2.2 Realización de Pruebas	28
3.3 Pruebas con Cambio de Polaridad	30

3.3.1 Consideraciones Previas	30
3.3.2 Parámetros de Cambio de Polaridad	31
3.3.3 Realización de Pruebas	31
3.4 Pruebas con Modulación por Ancho de Pulso (PWM).....	35
3.4.1 Consideraciones Previas	36
3.4.2 Parámetros de Ciclo de Trabajo	36
3.4.3 Realización de Pruebas	38
3.5 Pruebas con Parámetros Combinados.....	41
3.5.1 Consideraciones Previas	41
3.5.2 Parámetros de Ciclo de Trabajo y Cambio de Polaridad	42
3.5.3 Realización de Pruebas	43
4. Análisis de Resultados	44
4.1 Evaluación de Producción de Hidrógeno.....	44
4.2 Análisis de Desempeño Energético	46
4.3 Análisis de Mejora en la Estabilidad Térmica	48
4.4 Análisis de Resultados Visibles	49
4.5 Discusión.....	51
5. Conclusiones.....	52
6. Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Datos en Corriente Continua.....	28
Tabla 2 Resultados en Pruebas de Cambio de Polaridad.....	33
Tabla 3 Resultados en Pruebas de Modulación por Ancho de Pulso.....	38
Tabla 4 Pruebas con Operación Óptima PWM.....	39
Tabla 5 Producción de Hidrógeno	45
Tabla 6 Evaluación de Desempeño Energético	47

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Configuración del Electrodo.....	18
Figura 2 Accesorios del Electrodo.....	18
Figura 3 Hidróxido de Potasio KOH	19
Figura 4 Electrolizador	20
Figura 5 Válvula Antirretorno del Electrolizador.....	21
Figura 6 Equipos de Protección Personal	22
Figura 7 Fuentes de Corriente Continua Utilizadas.....	23
Figura 8 Equipos de Medida.....	24
Figura 9 Interpolador	25
Figura 10 Disposición Física y Esquemática de Componentes	26
Figura 11 Curva de Prueba DC.....	27
Figura 12 Comparación Electrodo en DC.....	29
Figura 13 Forma de Onda Pruebas de Cambio de Polaridad.....	32
Figura 14 Resultados Visibles en Electrodo Prueba en Cambio de Polaridad.....	34
Figura 15 Forma de Onda Pruebas de PWM	37
Figura 16 Resultados Visibles en pruebas PWM.....	40
Figura 17 Forma de Onda Pruebas Combinadas.....	41
Figura 18 Nivel de Temperatura al Final de Pruebas	48
Figura 19 Resultados Visibles al Final de las Pruebas	49

Resumen

Título: Evaluación de un Método Basado en PWM para el Mejoramiento de la Producción de Hidrógeno en Electrolizadores Alcalinos.*

Autor: Andrés Mauricio Hernández Cáceres, Karen Alexandra Sánchez Flórez.**

Palabras clave: Hidrógeno verde, electrolizador, electrodo, modulación por ancho de pulso.

Descripción: Los sistemas alcalinos de producción de hidrógeno enfrentan limitaciones como la degradación acelerada de los electrodos por corrosión y la pérdida de eficiencia debido a la acumulación de burbujas de gas en las superficies activas y el sobre calentamiento del electrolito. En este estudio se aplicaron técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM) y variaciones periódicas de polaridad para evaluar empíricamente el efecto de la frecuencia, ciclo de trabajo e inversión de polaridad sobre electrodos en electrolizadores alcalinos (AEL). Estas estrategias contribuyen a mejorar las condiciones de operación, disminuir el desgaste acelerado de los electrodos y optimizar el proceso de producción de hidrógeno. El uso de señales PWM permite un control preciso de la energía que fluye por los electrodos, lo que reduce el sobrecalentamiento del electrolito y favorece la formación de burbujas más pequeñas que se desprenden rápidamente, disminuyendo así la resistencia eléctrica del sistema. Para la realización de estas pruebas, se construyó un electrolizador especial diseñado para fijar algunas variables de las pruebas. Se evaluó el comportamiento del acero inoxidable como electrodo activo para cuantificar las mejoras en el rendimiento. Los resultados incluyen un incremento en la eficiencia energética superior al 10 % y la potencial prolongación de la vida útil de los electrodos. Esta estrategia representa una solución de bajo costo de implementación que busca reducir los gastos operativos y la frecuencia de mantenimientos, impulsando la competitividad y masificación del hidrógeno.

* Evaluación de un Método Basado en PWM para el Mejoramiento de la Producción de Hidrógeno en Electrolizadores Alcalinos.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos. Codirectores Ing. Diana María Villalobos Orduz, MSc. Luis Eduardo García Rodríguez

Abstract

Title: Evaluation of a PWM-Based Method for Improving Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers. *

Author: Andrés Mauricio Hernández Cáceres, Karen Alexandra Sánchez Flórez.**

Key Words: Green Hydrogen, Electrolyzer, Electrode, Pulse Width Modulation.

Description: Alkaline hydrogen production systems face limitations such as accelerated electrode degradation due to corrosion and efficiency loss caused by the accumulation of gas bubbles on active surfaces and overheating of the electrolyte. In this study, pulse width modulation (PWM) techniques and periodic polarity reversals were applied to empirically evaluate the effect of frequency, duty cycle, and polarity reversal on electrodes in alkaline electrolyzers (AEL). These strategies contribute to improving operating conditions, reducing accelerated electrode wear, and optimizing the hydrogen production process. The use of PWM signals allows for precise control of the energy flowing through the electrodes, which reduces electrolyte overheating and promotes the formation of smaller bubbles that detach quickly, thereby decreasing the system's electrical resistance. To conduct these tests, a special electrolyzer was constructed, designed to set certain test variables. The performance of stainless steel as an active electrode was evaluated to quantify improvements in performance. The results include an increase in energy efficiency of over 10% and the potential extension of electrode lifespan. This strategy represents a low-cost implementation solution seeks to reduce operating costs and maintenance frequency, boosting the competitiveness and widespread adoption of hydrogen.

* Evaluation of a PWM-Based Method for Improving Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos. Codirectores Ing. Diana María Villalobos Orduz, MSc. Luis Eduardo García Rodríguez

Introducción

La electrólisis del agua es una tecnología con más de dos siglos de desarrollo. Sus primeros antecedentes se remontan a los trabajos de Deiman y Troostwijk en 1789, seguidos por Volta, Carlisle y Nicholson en 1800 ([De Levie, s.f.](#)). A inicios del siglo XX ya existían más de 400 unidades industriales en operación ([Conker, 2019](#)), y posteriormente avances como la patente de Hall y Héroult en 1886 ([Beck, 2014](#)) impulsaron el desarrollo de celdas electrolíticas modernas y configuraciones de mayor escala ([Xianxi, 2021](#)). Durante el siglo XX, la electrólisis alcalina (AEL) se consolidó como la tecnología más madura; sin embargo, fue desplazada parcialmente por métodos basados en combustibles fósiles.

En la actualidad, se reconocen cuatro tecnologías principales de electrólisis: la electrólisis alcalina (AEL), la electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM), la electrólisis con membrana de intercambio aniónico (AEM) y las celdas de óxido sólido (SOEC). La electrólisis alcalina consiste en la disociación de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de corriente eléctrica. El proceso se desarrolla en una celda electroquímica compuesta por un ánodo, un cátodo y un electrolito, que puede ser líquido o sólido.

Los sistemas PEM, por su parte, alcanzan eficiencias superiores al 80 % y ofrecen respuesta dinámica rápida frente a fuentes renovables intermitentes; sin embargo, su costo es elevado debido al uso de metales preciosos como platino e iridio. La tecnología AEM surge como alternativa híbrida que combina el bajo costo del entorno alcalino con el desempeño electroquímico de los sistemas PEM. Finalmente, las SOEC operan a temperaturas elevadas (500–1000 °C), logrando altas eficiencias termodinámicas, aunque aún se encuentran en fase de desarrollo y validación experimental.

Aun así, con su trayectoria en la historia la AEL presenta desafíos asociados a la degradación por corrosión y a la acumulación de burbujas gaseosas sobre la superficie de los electrodos, fenómenos que incrementan la resistencia eléctrica y disminuyen la eficiencia del proceso (David et al., 2019). Estos factores constituyen aún desafíos relevantes para la optimización de la tecnología alcalina, lo que evidencia la necesidad de estrategias que mejoren su desempeño sin implicar rediseños estructurales complejos ([Dobó y Palotás, 2016](#); [Shaaban, 1994](#)).

La operación común de la electrólisis alcalina es en corriente continua (DC). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que el comportamiento electroquímico del sistema puede modificarse significativamente cuando se altera la forma de onda de alimentación.

De manera complementaria, estudios posteriores han propuesto el uso de modulación por ancho de pulso (PWM) como mecanismo para controlar la temperatura de operación y mejorar el desempeño energético. [Conker, \(2019\)](#) evidenció que la implementación de señales moduladas permite reducir el sobrecalentamiento y mejora la calidad del gas producido.

En consecuencia, resulta pertinente desarrollar estudios experimentales que evalúen de forma sistemática la influencia de parámetros eléctricos dinámicos sobre la producción de hidrógeno y el desgaste de los electrodos. El presente proyecto se enmarca en esta línea de investigación y propone la optimización empírica del proceso de electrólisis alcalina mediante la variación controlada de parámetros eléctricos como la frecuencia de modulación, el ciclo de trabajo y la frecuencia de inversión de polaridad. El desempeño del sistema se evalúa a través de métricas de eficiencia energética, cuantificación volumétrica de hidrógeno producido y análisis físico del desgaste superficial de electrodos de acero inoxidable bajo condiciones eléctricas controladas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar un sistema basado en la técnica PWM y cambio de polaridad para mejorar la producción de hidrógeno y extender la vida útil de los electrodos en electrolizadores alcalinos.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar los parámetros óptimos obteniéndolos a partir del método de optimización empírica de periodo y ancho de pulso que incrementen la vida útil de los electrodos, considerando los retos del desgaste por corrosión.

Sistematizar el proceso de recolección de datos sobre la eficiencia del electrodo en relación con la variación de polaridad, midiendo su rendimiento bajo diferentes condiciones operativas.

Cuantificar la cantidad de hidrógeno producido, analizando la eficiencia eléctrica en comparación con un electrolizador convencional, identificando así las mejoras introducidas por el uso de PWM.

2. Marco Referencial

La electrólisis del agua consiste en la descomposición de la molécula de H₂O en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) mediante corriente eléctrica, transformando energía eléctrica en energía química almacenada en forma de hidrógeno. En electrolizadores alcalinos, se emplean electrolitos líquidos con soluciones de KOH (25–30%) o NaOH, y catalizadores no nobles como hierro y níquel, además de membranas poliméricas o cerámicas. La tecnología de electrólisis alcalina (AEL) es la más madura, con más de un siglo de desarrollo, vida útil superior a 15 años y costos relativamente bajos, representando más del 60 % de la capacidad instalada mundial de electrolizadores para producción de hidrógeno ([Morgan et al., 2013](#); [Sebbahi et al., 2024](#)).

A pesar de su madurez, la AEL presenta limitaciones operativas bajo condiciones variables, especialmente en entornos relacionados a energías renovables: incremento de la resistencia interna por acumulación de burbujas, degradación progresiva de electrodos por corrosión y cavitación, y reducción de la eficiencia con el tiempo.

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles ha revalorizado el hidrógeno como vector estratégico, proyectándose que para 2050 cubrirá cerca del 18 % del consumo energético mundial ([Mikhaylov et al., 2020](#)), contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂ ([Yang et al., 2018](#)). En este contexto, la producción eficiente de hidrógeno mediante electrólisis adquiere un papel central.

El potencial reversible mínimo para la disociación del agua es 1.23 V ([Shaaban, 1994](#)), aunque en sistemas reales el voltaje de operación es mayor debido a pérdidas por sobrepotenciales de activación, pérdidas óhmicas y disminución de conductividad, lo que afecta la eficiencia energética y el comportamiento dinámico de la celda. Investigaciones como la de [Shaaban \(1994\)](#) sobre corriente pulsada reportan resultados contradictorios, en las cuales surgen fenómenos de

despolarización durante los periodos de apagado, las cuales favorecen la desorción de burbujas y limitan el sobrecalentamiento del sistema, sin embargo, poniendo en duda el rendimiento energético del sistema, en estas investigaciones se sugiere mayor investigación sobre la dinámica interfacial bajo cargas no estacionarias. [Dobó y Palotás \(2016\)](#) demostraron que la forma de onda aplicada (senoidal, cuadrada, diente de sierra) influye en la eficiencia, aunque fluctuaciones excesivas reducen el rendimiento frente a corriente continua. [Conker \(2019\)](#) propuso el uso de PWM para controlar condiciones térmicas en sistemas AEL, mostrando que el ciclo útil limita el sobrecalentamiento y mejora la estabilidad operativa.

Otros estudios señalan que la combinación de modulación temporal con cambios periódicos de polaridad favorece la desorción de burbujas adheridas, disminuye la resistencia interfacial y extiende la vida útil de los electrodos entre un 20 % y 30 % ([Shaaban, 1994](#); [Xia et al., 2023](#)). Asimismo, [Xia et al. \(2023\)](#) evidenciaron que la regulación dinámica del campo eléctrico permite seguir el punto máximo de potencia en sistemas renovables intermitentes, duplicando la eficiencia en operación al 15 % de carga nominal y extendiendo el rango operativo de 30–100 % a 10–100 %. Estos hallazgos confirman que la variación controlada de parámetros eléctricos puede mejorar significativamente la eficiencia sin modificar la estructura física del electrolizador.

Del análisis de antecedentes se desprenden tres aspectos clave. En primer lugar, la eficiencia de la electrólisis alcalina depende en gran medida de la forma de onda aplicada. En segundo lugar, las señales pulsadas modifican fenómenos interfaciales, aunque sus efectos no están completamente caracterizados. Por último, la operación dinámica bajo condiciones no estacionarias puede mejorar la eficiencia sin rediseños estructurales.

Sin embargo, ningún estudio aborda de manera experimental la combinación de modulación por pulso y cambio de polaridad sobre la desorción de burbujas, la resistencia de contacto, el desgaste físico de electrodos metálicos y la eficiencia energética bajo condiciones controladas. En consecuencia, se evidencia la necesidad de evaluar empíricamente cómo la variación controlada de parámetros eléctricos dinámicos puede optimizar simultáneamente la eficiencia energética y la durabilidad de los electrodos en electrólisis alcalina.

El presente proyecto se orienta en esta línea, proponiendo un análisis experimental del efecto del PWM y la variación periódica de polarización sobre el desempeño electroquímico y la degradación superficial de electrodos de acero inoxidable.

La optimización de parámetros eléctricos como la frecuencia de modulación, el ciclo útil y la frecuencia de inversión de polaridad constituye un enfoque experimental aplicado que busca sistematizar datos sobre el comportamiento de materiales ante variaciones controladas, con el objetivo de mejorar la transferencia de carga y reducir la resistencia de contacto. Se espera que la implementación exitosa de estas técnicas contribuya a la reducción del costo por kilogramo de hidrógeno producido, facilitando su adopción masiva en sectores como el transporte pesado y la industria, y mejorando la rentabilidad de las plantas de energía renovable al ofrecer una solución de almacenamiento de excedentes ([Dobó & Palotás, 2016](#)).

3. Método

En este apartado se tratarán los temas de la disposición de materiales, herramienta y la metodología usada para la realización de los experimentos y su respectiva toma de datos.

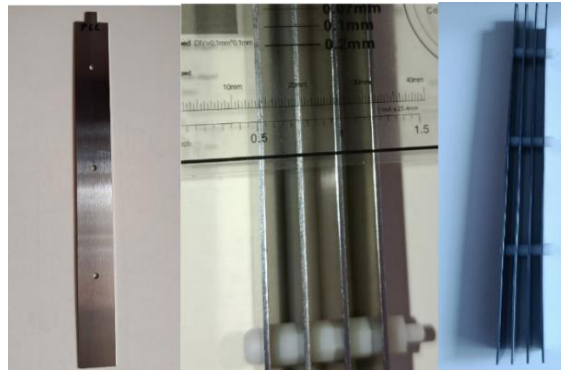
3.1 Preparación de Pruebas

Se presenta a continuación una descripción de la caracterización de materiales y del procedimiento de preparación de las pruebas, con el objetivo de facilitar la validación y replicabilidad de esta investigación.

3.1.1 Caracterización de Materiales

Los materiales e insumos utilizados en los experimentos son caracterizados en esta subsección con el fin de realizar ensayos de laboratorio reproducibles por pares.

3.1.1.1 Electrodo. El electrodo empleado para la conducción de la energía eléctrica consiste en una placa de acero inoxidable SAE 304 con dimensiones de 200 mm × 20 mm × 1 mm, estas dimensiones fueron definidas para que el electrodo cupiera en la cámara del electrolizador y para que su tamaño sea una constante uniforme y medible en caso de requerir una corroboración de los datos en futuros experimentos. Previo a su uso, los electrodos son sometidos a un proceso de pulido con compuesto abrasivo de 3M y posteriormente limpiados con una mezcla de agua y glicol al 50 % para eliminar las impurezas superficiales. El conjunto experimental está formado por cuatro placas de acero inoxidable separadas por tres separadores de nailon M3 × 5 mm, alojados en perforaciones de 3 mm de diámetro para asegurar un espaciado constante entre electrodos (véase figura 1); y son conectadas a las terminales tipo banana 4mm (1200 V 10 A) de la cámara del electrolizador por medio de cableado de cobre calibre 12 AWG (THHN 30 A) y terminales 12-10 (12 AWG 30 A) recubiertas de aislante termo-retráctil a las protuberancias de las placas (véase figura 2).

Figura 1*Configuración del Electrodo*

Nota. En esta figura se evidencia la forma y disposición del electrodo que se encuentra dentro de la cámara del electrolizador, es su componente activo y sujeto de estudio de esta investigación.

Figura 2*Accesorios del Electrodo*

Nota. En esta figura se evidencian los accesorios que conectan y mantienen la separación de los electrodos.

3.1.1.2 Electrolito. El electrolito que se ha usado comúnmente es el agua mezclada con hidróxido de potasio (KOH) (véase figura 3), también conocido como potasa caustica en una

proporción porcentual de peso (wt %) del 30 % de KOH. Según [Sebbahi et al. \(2024\)](#), la proporción entre el 20 – 40 % de KOH es vital para mantener optimo el flujo de campo en el electrolizador y un pH entre 13-14 . Por lo tanto, se eligió la concentración del 30 % en peso para hacer los experimentos, esta condición permaneció invariable en cada experimento, y se calculó de la siguiente manera:

$$wt \% = \left(\frac{\text{masa del soluto (KOH)}}{\text{masa del solvente (Agua) + masa del soluto (KOH)}} \right) \times 100$$

Estimando una masa de 1000g de agua, y que la cantidad porcentual de soluto será del 30 % y despejando la masa del soluto en la ecuación se obtiene:

$$0.30 = \frac{x}{x + 1000} \therefore x = \frac{300}{0.70} \approx 428.57g$$

Donde “x” es la masa del soluto KOH. Por lo tanto, por cada kg de Agua (lo que equivale a 1L para los experimentos), se agregaron 428.57g de KOH.

Figura 3

Hidróxido de Potasio KOH



3.1.1.3 Electrolizador. La cámara para este electrolizador se preparó a partir de dos carcasas de filtro de agua, referencia HF3-10WHWH12 de 3" de diámetro por 10" de profundidad,

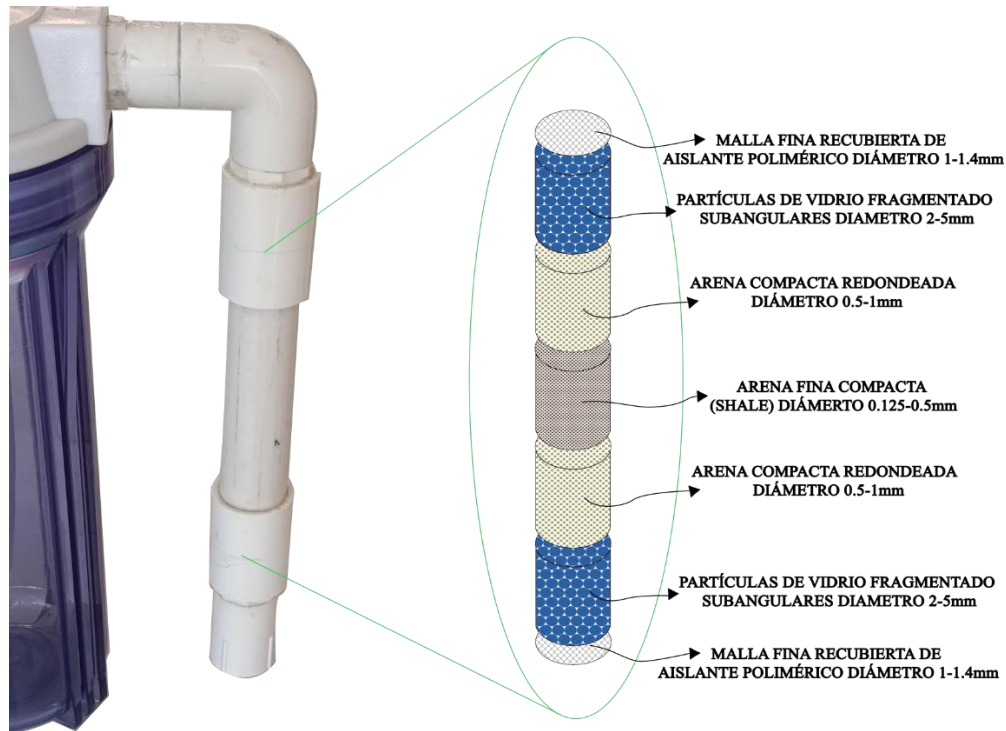
aproximadamente 1.20L de capacidad volumétrica y con una resistencia a la presión de 75 PSI máxima. Una con el fin de confinar el electrodo y la otra como “cámara de purificación” y control del gas de salida (burbujeador); unidos por medio de tuberías de presión de agua de PVC de 1/2” con resistencia a la presión de 315 PSI máxima (véase figura 4). A sus extremos se encuentran tuberías de PVC de 1/2”, en el extremo de la cámara del electrodo una tubería por la cual se inyecta el electrolito con el fin de no interrumpir el proceso de electrólisis, en el extremo de la cámara de purificación, se adecuó una válvula antirretorno con el propósito de proteger al electrolizador de una gran presión provocada por una posible combustión del gas a la salida de este; este dispositivo está compuesto de capas simétricas con características mostradas en la figura 5.

Figura 4

Electrolizador



Nota. En la imagen se evidencia el electrolizador construido con sus componentes anteriormente descritos.

Figura 5*Válvula Antirretorno del Electrolizador*

Nota. En la imagen se evidencia la composición de la válvula antirretorno, diseñada para la seguridad de las cámaras del electrolizador ante combustiones externas del gas hidrógeno.

3.1.1.4 Equipos de Protección Personal (EPP). Para este trabajo, se definieron estándares de seguridad y protección física durante la realización de cada prueba, así como en la preparación de las pruebas. Estos parámetros de seguridad parten del hecho de que se trabajó con gases altamente combustibles, y elementos químicos peligrosos. En ese sentido, los EPP se usaron en los siguientes momentos, al preparar el electrolito, y siempre que se manipuló y se puso en operación el electrolizador. Estos EPP se compusieron de: guantes de nitrilo, elemento esencial para la preparación del electrolito ya que este material protege de manera eficiente las manos de posibles salpicaduras del electrolito compuesto por la solución al 30 % de KOH, altamente corrosivo; lentes de protección ocular, esto con el fin de proteger los ojos de esquirlas en una

posible combustión; y por ultimo overol de algodón ignífugo, el cual en caso de una combustión protege el cuerpo del operador frente a flamas (véase figura 6).

Figura 6

Equipos de Protección Personal



Nota. En la imagen se evidencia la composición de los equipos de protección personal utilizados por el operario del electrolizador, y a la izquierda sus componentes.

3.1.2 Caracterización de Equipos Eléctricos Usados

Los equipos eléctricos ya sea de control, medición o las fuentes usadas son equipos que necesitan ser caracterizados de una manera explícita para que las pruebas sean reproducibles. En esta subsección se hará una descripción de los equipos usados en este trabajo.

3.1.2.1 Fuentes de Energía. En los ensayos realizados se usaron dos fuentes de corriente continua (DC): la fuente de la marca FNIRSI modelo DPS-150, la cual posee un rango de funcionamiento de 0-30VDC y 0-5ADC y una potencia máxima de 150W, vea sus detalles técnicos en el Manual de Características Fuente FNIRSI DPS-150. Por otro lado, también se usó la fuente HCAMS modelo FDC99, la cual posee dos salidas de DC, una con rango de 1.2-12VDC y 0-9ADC

con potencia máxima de 300W basada en el módulo XL4016; y la otra con rangos de 10-60VDC y 0.2-15ADC con potencia máxima de 400W basado en el módulo TL494 (véase figura 7).

Figura 7

Fuentes de Corriente Continua Utilizadas



FNIRSI DPS150

HCAMS FDC99

Nota. En la imagen se evidencian las dos fuentes de corriente directa usadas en los experimentos.

3.1.2.2 Equipos de Medida. Los equipos que fueron utilizados para la medición de las variables eléctricas y físicas, pertenecientes a los elementos medibles de los experimentos y relevantes para el análisis de las variables y condiciones del sistema durante y después de los ensayos, fueron los siguientes (véase figura 8).

- **Multímetro con cámara termográfica ZOYI ZT-R02:** Este dispositivo fue usado para medir variables de tensión y corriente consumida por el electrolizador en sus terminales del electrodo, también se usó para la medición de la permitividad en la cámara de purificación; y su utilidad principal fue el uso de su cámara termográfica de luz infrarroja usada para detectar la temperatura en los electrodos. Su información técnica detallada se encuentra en el manual de usuario del Multímetro

Termográfico ZOYI ZT-R02. Este equipo se configuró con una constante de emisividad “ ϵ ” (épsilon) del 91 %, el cual es el recomendado para la superficie de los plásticos y los circuitos eléctricos.

- **Multímetro electrónico UNI-T UT33C+:** Este multímetro fue usado para medir las variables eléctricas anteriormente descritas y poderlas contrastar con la medición del multímetro termográfico. Sus detalles técnicos se encuentran en el manual de usuario del Multímetro Electrónico UNI-T UT33C+.
- **Microscopio Digital Hayve 1600X:** Este microscopio se usó como apoyo visual para comparar el estado físico inicial de los electrodos al inicio y al final de cada prueba y para hacer una comparación del estado final comparativo de las pruebas. Este microscopio permite una calidad de imagen de 1920*1080 pixeles y un aumento de entre 50-1600 veces. Se usó una grilla transparente comparativa con una separación de 0.1mm para determinar la cantidad de aumento en cada toma.

Figura 8

Equipos de Medida



3.1.2.3 Interpolador. Éste es el aparato eléctrico encargado de convertir la potencia de entrada (en corriente continua) en potencia modulada en ancho de pulso PWM y de cambiar la polaridad en las placas del electrodo, con tres modos de operación: PWM, cambio de polaridad, y modo combinado de las dos anteriores. Se trata de un dispositivo programable que permite una modulación del 0-100 % del ciclo de trabajo, puede conmutar en un rango de 0 hasta 1kHz, es decir, con un periodo de hasta a 1ms ya sea en PWM o en cambio de polaridad. Este dispositivo permite trabajar con 600VDC y hasta 30ADC. El dispositivo cuenta con una interfaz práctica que permite su sencilla programación manual y un tiempo desde 5 minutos hasta 25 días continuos de operación automática. El dispositivo interpolador hace parte de un proyecto el cual se encuentra en fase de patentado, por lo tanto, la información declarada sobre él está limitada en este trabajo (véase figura 9).

Figura 9

Interpolador



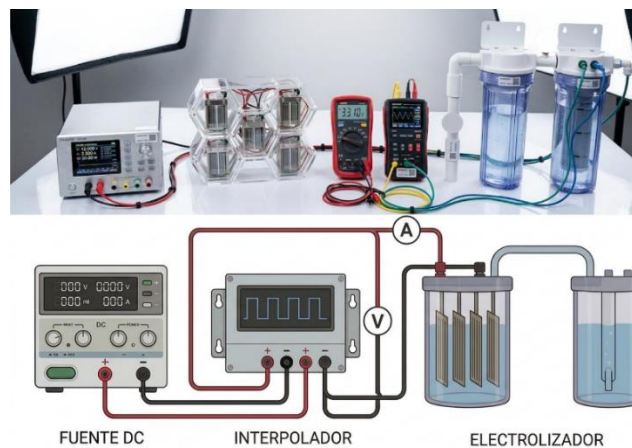
Nota. En la imagen se evidencia el dispositivo con el cual se programa la variación del ciclo de trabajo y de la frecuencia a la entrada del electrolizador. Para una mejor observación de su funcionamiento, se recomienda visualizar el video de demostración de pruebas propuesto en la [página destinada al proyecto de grado](#).

3.1.3 Disposición Física de Componentes

En esta subsección se describe la disposición física de los componentes utilizados en los experimentos, véase la figura 10, la cual permite visualizar la interconexión de los elementos del sistema, tanto en su configuración eléctrica como en su organización física.

Figura 10

Disposición Física y Esquemática de Componentes



Nota. En la imagen se evidencian la conexión real y su representación esquemática, la cual fue usada para estos ensayos.

3.2 Pruebas en Corriente Continua (DC)

De cara a una referencia o base de comparación en este trabajo, se realizaron pruebas en corriente continua DC, con el fin de tener una base clara del proceso clásico de obtención de hidrógeno con electrolizadores alcalinos. En la industria, para electrolizadores AEL los rangos de tensión en la cámara están siempre entre 1.8 V a 2.4 V por celda en DC.

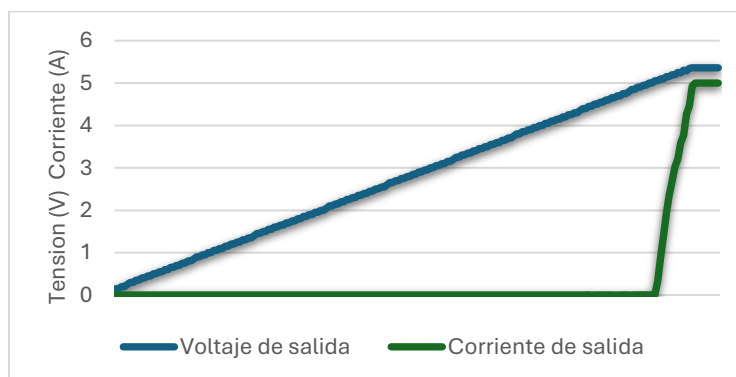
3.2.1 Consideraciones Previas

Previo a estos ensayos, se tuvo en cuenta la seguridad antes descrita y se siguieron las normas para el uso y manipulación de electrolitos altamente corrosivos y la naturaleza explosiva del hidrógeno, NFPA 2 y OSHA 29 CFR 1910.1200. Esto es básico para todos los experimentos.

Estas pruebas, consideradas como referencia para la investigación, consistieron en variar el nivel de tensión dentro de un rango de 0 a 60 VDC, con el propósito de identificar el punto de operación en el que la potencia suministrada al sistema alcanza su valor máximo. Dicho punto se utilizó como condición de referencia para las pruebas posteriores, manteniendo constante la tensión y garantizando así la máxima potencia disponible en los experimentos. El procedimiento se llevó a cabo mediante la aplicación computacional de control de la fuente FNIRSI, la cual permitió enviar una señal de tensión progresiva para determinar la corriente máxima de operación. Como resultado, se definió un funcionamiento de la fuente a 5,36 V con una salida de 5 A, y en la cámara del electrolizador una tensión de 2,21 V con una corriente de 5,39 A la diferencia entre estas dos mediciones se debe a la conexión del interpolador entre estas dos (fuente y cámara del electrolizador), la cual provoca una pérdida de potencia por efecto de este aparato. La evidencia de esta prueba se presenta en la figura 11.

Figura 11

Curva de Prueba DC



Nota. En esta gráfica se representan los valores registrados por la interfaz de control de la fuente FNIRSI, procesados directamente desde el equipo.

3.2.2 Realización de Pruebas

Una vez definido el nivel de tensión de operación en corriente continua, se determinó la condición óptima de funcionamiento, correspondiente a la operación en frío de la cámara. Se observó que las pérdidas asociadas a la disipación calorífica y la resistencia de las burbujas generan variaciones en los parámetros de tensión requeridos para suministrar la máxima potencia. Con el propósito de disponer de datos representativos, se realizó la conexión integral de equipos de medida y se estableció un periodo de adquisición de 24 horas. Los resultados obtenidos, que incluyen valores de tensión (V), corriente (I) y temperatura operativa (Top), se presentan en la tabla siguiente y fueron considerados significativos para el análisis comparativo del rendimiento.

Tabla 1

Datos en Corriente Continua

Temperatura ambiente (°C)	Tiempo de operación (h)	Datos en fuente			Datos en electrolizador		
		V _f (V)	I _f (A)	Top _f (°C)	V _e (V)	I _e (A)	Top _e (°C)
25	0	5.36	5	37	2.21	5.39	25.0
27	1	5.36	5	36	2.22	5.39	32.7
26	5	5.36	5	37	2.23	5.37	33.5
27	7	5.36	5	38	2.35	5.34	34.0
27	10	5.37	5	38	2.34	5.34	35.0
26	15	5.37	5	37	2.40	5.31	36.0
25	24	5.37	5	36	2.44	5.30	36.2

Nota. En esta tabla se evidencian los datos tomados, en los cuales los parámetros fueron medidos considerando la planeada tensión de entrada capaz de suplir la máxima potencia, donde el

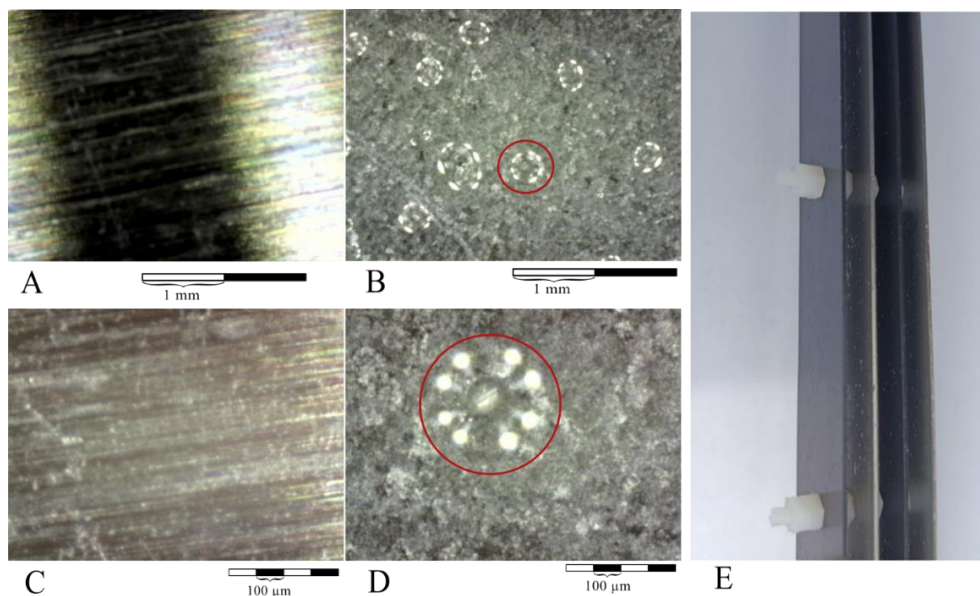
subíndice “f” corresponde a los datos tomados de la fuente y los datos con subíndice “e” corresponden a los datos en el electrolizador.

Otros datos significativos tomados son los datos del desgaste y la oxidación en los electrodos. Estos fueron evidenciables a partir de la séptima hora de operación, tal como se observa en la figura 12. Mediante el microscopio Hayve se evidencia este cambio en las placas con una resolución de 100 μm y 1 mm por división.

En esta prueba se obtuvo un resultado atípico, pequeñas partículas traslúcidas se depositaron en la superficie de los electrodos, además del óxido que se esperaba, estas partículas invisibles a simple vista por sus tamaños inferiores a 1mm y por su característica de translucidez, son indetectables mientras están sumergidas en el electrolito. En las imágenes se encierra en un círculo rojo para una mejor apreciación, se intuye que pueden ser fragmentos de potasio en estado sólido, que quedaron atrapados en la superficie de los electrodos y no se decantaron al fondo de la solución.

Figura 12

Comparación Electrodo en DC



Nota. En las imágenes A y C, se evidencia el electrodo a dos resoluciones distintas antes de iniciar las pruebas, en B y D, se observa, el electrodo con una capa de óxido (cátodo polo negativo de la fuente) en diferentes resoluciones y con los posibles fragmentos de potasio atrapados en su superficie, encerrados en círculos rojos.

Si bien la reacción de oxidación tiene lugar en el ánodo, se evidenció la formación de una capa de óxido sobre la superficie del cátodo. Este fenómeno puede atribuirse a la disposición electromagnética del sistema, la cual induce la migración y atracción de los productos de reacción hacia el electrodo de polaridad contraria.

3.3 Pruebas con Cambio de Polaridad

Considerando la oxidación evidenciada en las pruebas realizadas con corriente directa, y reconociendo que en los sistemas generadores de hidrógeno la limpieza o sustitución de electrodos implica detener la producción para intervenir la cámara del electrolizador, se exploró una estrategia distinta. A diferencia de los electrolizadores alcalinos tradicionales, que mantienen separados el ánodo y el cátodo para asegurar la separación de los gases producidos, nuestro diseño integra ambos electrodos en una sola cámara por motivos previamente justificados. Bajo este esquema, las pruebas se enfocaron en la hipótesis de una limpieza in situ de los óxidos y demás depósitos presentes en los electrodos ([Sánchez, 2019](#)), evitando la necesidad de suspender la producción o desarmar el electrolizador, con el objetivo de disminuir los tiempos de mantenimiento y las paradas operativas.

3.3.1 Consideraciones Previas

Para alcanzar este objetivo, se establecieron parámetros de frecuencia para el cambio de polaridad, asegurando así la inyección de la máxima potencia al sistema. Al no operar en corriente

directa, las mediciones se efectuaron en corriente alterna mediante el multímetro ZOYI, equipado con la función TRUE RMS. Esta característica proporciona una medición precisa y confiable en señales no sinusoidales, lo que garantiza la validez de los datos obtenidos.

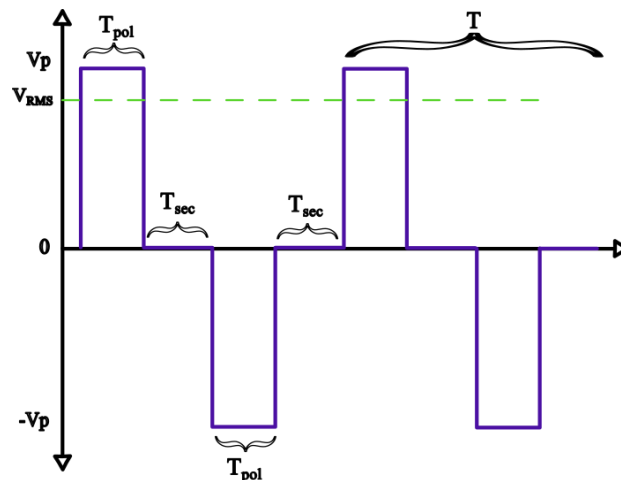
En estas pruebas se tuvieron en cuenta los principios de este tipo de ondas simétricas, las cuales se componen de un valor pico y una componente RMS, la cual es la cantidad de energía real enviada al sistema. En este estudio esa componente es esencial para los cálculos de producción de masa de hidrogeno y la eficiencia energética de la reacción.

3.3.2 Parámetros de Cambio de Polaridad

Con el propósito de efectuar una limpieza eficiente de la superficie de los electrodos y de las micropartículas de potasio presentes al concluir la prueba en corriente continua, se definieron parámetros de frecuencia extremos: un valor elevado de 1 kHz (límite máximo programable en el interpolador) y un valor reducido de 0,1 Hz el mínimo programable. La comparación de la potencia máxima entregada al sistema en ambos casos permitió aproximar gradualmente los valores hasta determinar el punto de operación óptimo. Este procedimiento, denominado método de bisección empírica, posibilitó establecer las condiciones óptimas de frecuencia, tensión y corriente, a partir de las cuales se evaluó el tiempo requerido para la limpieza de los electrodos previamente oxidados en la prueba con corriente directa.

3.3.3 Realización de Pruebas

Para esta prueba se tuvieron en cuenta las restricciones del sistema de modulación y el interpolador, ya que este último presenta una disposición especial para su programación debido a la necesidad de modelar comportamientos no lineales en tiempo real. En la figura 13, se observa esta disposición en la verdadera forma de onda programable en el interpolador, la cual es fundamental para calcular variables críticas como la eficiencia de Faraday.

Figura 13*Forma de Onda Pruebas de Cambio de Polaridad*

Nota. En esta imagen se evidencia la forma de onda entregada por el Interpolador, tanto de tensión y corriente, en la cual se aprecian los parámetros de V_{RMS} , (valor eficaz); V_p , Valor pico, medidos en las pruebas esta forma de onda representa tensiones y corrientes en las que su amplitud V_p se diferencia en cada onda. T_{pol} , parámetro que define el ancho del pulso positivo y negativo por igual, T_{sec} , parámetro no a escala usado para que el cambio de polaridad no sobrecaliente el circuito de potencia del Interpolador, este es constante y equivale a 10 milisegundos. Por último, se aprecia el parámetro T que representa el periodo de la onda.

Con esta forma de onda el cálculo del periodo y frecuencia está dado por:

$$T = 2T_{pol} * 10^{-3} + 0.02$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Donde T es el periodo de la onda, f la frecuencia y T_{pol} la variable programable en milisegundos.

Teniendo en cuenta la anterior información se realizaron las pruebas, donde se obtuvieron los siguientes datos representativos.

Tabla 2*Resultados en Pruebas de Cambio de Polaridad*

Tpol. (ms)	Frecuencia (f) (Hz)	Datos en fuente		Datos en electrolizador			
		V _f (V)	I _f (A)	f _e (Hz)	V _e (V)	I _e (A)	CV
1	45.45	10.59	0.92	45.48	0.38	3.78	NO
5	33.33	9.00	2.03	33.26	0.78	4.38	NO
10	25.00	8.00	2.79	24.85	0.91	4.73	NO
20	16.66	7.08	3.50	16.61	1.13	5.13	SI
40	10.00	6.33	4.11	10.00	1.15	5.47	SI
80	5.55	5.83	4.50	5.55	1.24	5.78	SI
150	3.13	5.64	4.74	3.12	1.25	8.35	SI
300	1.61	5.30	5.00	1.64	2.06	5.46	SI
490	1.00	5.36	5.00	1.00	2.07	5.48	SI
1000	0.50	5.35	5.00	0.50	2.05	5.49	SI
2000	0.25	5.36	5.00	0.25	2.04	5.48	SI

Nota. En esta tabla se evidencian los datos tomados de tensiones (V), corrientes (I) donde el subíndice “f” corresponde a los datos tomados de la fuente (valores en DC) y los datos con subíndice “e” corresponden a los datos en el electrolizador (valores RMS en ac), CV se refiere a si hay algún cambio visible en los electrodos, Tpol el valor en milisegundos programado en el Interpolador y “f” la frecuencia real a la que corresponde ese valor.

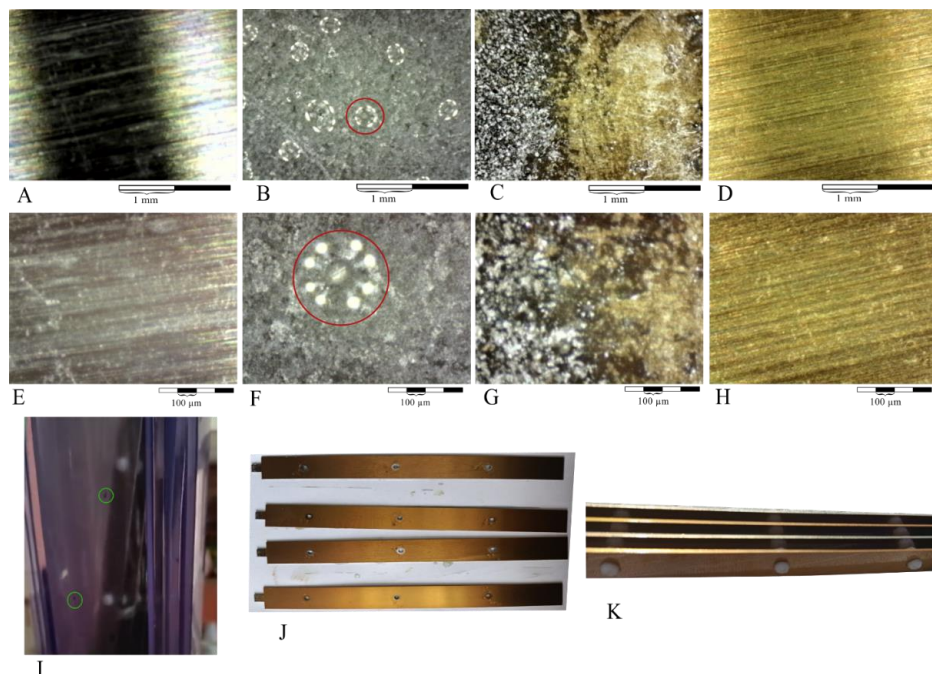
El parámetro de Cambio Visible (CV) explica la nula producción de hidrógeno a altas frecuencias, debido a que la tensión no logra superar el umbral mínimo de arranque o polarización (>1 V) sin inducir corrientes que exceden la capacidad de los equipos. Adicionalmente, en este régimen de frecuencia, el sistema presenta una inestabilidad por resonancia y corrientes inversas que compromete la operación.

Gracias a estos datos y lo que se evidenció de manera visual, el mejor parámetro para la limpieza de los electrodos es claramente el parámetro operado entre 490 milisegundos el cual corresponde a 1Hz, y 1000 milisegundos correspondiente a 0.5 Hz. Este parámetro a 1 Hz, es el que envía la máxima potencia al sistema, 26.8 W en fuente y 11.3436 W en la cámara del electrolizador. Se evidenció que con este parámetro el electrodo permeado de óxido se limpia en aproximadamente 1 minuto dejando disueltas en el electrolito las partículas de óxido.

Los resultados de esta prueba revelaron un comportamiento inesperado en los electrodos. Si bien se logró la remoción de la capa de óxido presente en el cátodo, se detectó la formación de una electrodeposición en ambos electrodos (ánodo y cátodo), la cual consistió en una sustancia que les otorgó una apariencia dorada y brillante. Este fenómeno se muestra en la figura 14. Sin embargo, al operar estos electrodos de nuevo en DC, este electro depósito desaparece dejando el ánodo en su estado de “limpieza” inicial pero susceptible a adquirir de nuevo una capa de óxido.

Figura 14

Resultados Visibles en Electrodos Prueba en Cambio de Polaridad



Nota. En este gráfico se evidencian en las imágenes A y E, el electrodo a dos resoluciones distintas del ánodo antes de iniciar las pruebas, en B y F el electrodo con una capa de óxido (cátodo polo negativo de la fuente), en C y G como se ocasiona el proceso de eliminación de la capa de óxido y la electrodeposición de la capa de protección, en D y H el electrodo limpio y con su capa protectora completa, en I se evidencian las partículas de óxido arrancadas de los cátodos en plena operación y por último en las imágenes J y K se evidencian los electrodos bañados por esta capa. Estas imágenes presentadas en diferentes resoluciones.

Para comprobar la limpieza de este electrodo se repitió una prueba en DC con los parámetros base óptimos 5.36 V y 5 A en la fuente, la cual mostró una tensión de 2.06 V y una corriente de 5.50 A en el electrolizador por lo cual se puede inferir una restauración de su capacidad operativa óptima. Mas que eso, le dio una mejor capacidad de conducción ya que en principio los parámetros registrados al iniciar esa prueba fueron de 2.21 V y 5.39 A.

Para simular la producción en caso de que se plantee usar este tipo de forma de onda para operar un sistema industrial, se realizó una prueba usando este parámetro óptimo durante 2 horas, el cual dio por resultado una tensión de 5.35 V con 5 A en la fuente y una tensión de 1.99 V con 5.52 A en el electrolizador a 30.8 °C. Para comparar el rendimiento de este sistema “limpio” se realiza de nuevo una puesta en marcha en DC con los parámetros óptimos en la fuente y por resultado en el electrolizador se obtuvo una tensión de 1.99 V con 5.51 A, comprobando así que este sistema ha recuperado su conductividad y ha mejorado aún más su eficiencia.

3.4 Pruebas con Modulación por Ancho de Pulso (PWM)

Una de las grandes causas de la pérdida de eficiencia en las cámaras de electrolisis son la generación de burbujas de gran tamaño de gas que ocupan el espacio entre los electrodos y generan una resistencia mayor al paso de la corriente, lo cual produce calentamientos en las cámaras

industriales de hasta 105°C ([Conker, 2019](#)); esta corriente es directamente proporcional a la producción de hidrógeno según la ley de Faraday. Estas pruebas se enfocan en minimizar estos efectos mitigando el tamaño de estas burbujas.

3.4.1 Consideraciones Previas

Como se pudo observar en las pruebas de cambio de polaridad, el sistema a altas frecuencias suele no reaccionar y no entrar en operación hasta cierto nivel de frecuencia, esto debido a que la tensión a altas frecuencias no supera el umbral mínimo de entrada en operación de más de 1 V.

En estas pruebas se tuvieron en cuenta los efectos energéticos que suponen enviar una onda cuadrada y modulada a una carga, estos efectos comprenden la existencia de dos componentes en los valores medibles de tensión y de corriente entregada al sistema, el valor RMS, y el valor DC, inherentes a la utilización de ondas no simétricas (no tienen simetría en el eje horizontal). Por tanto, a las 2 mediciones que se hicieron a la onda por cada parámetro de tensión y corriente medidos se les computó con la siguiente ecuación.

$$V_{RMS\text{tot}} = \sqrt{V_{RMS}^2 + V_{DC}^2}$$

Donde $V_{RMS\text{tot}}$, representa el valor total de tensión o corriente entregada al electrolizador, V_{RMS} , el valor eficaz de tensión o corriente medido en la cámara del electrolizador con la función TRUE RMS del multímetro ZOYI el cual solo pertenece a la componente de rizo AC, y V_{DC} , el valor medido con la función de DC del multímetro.

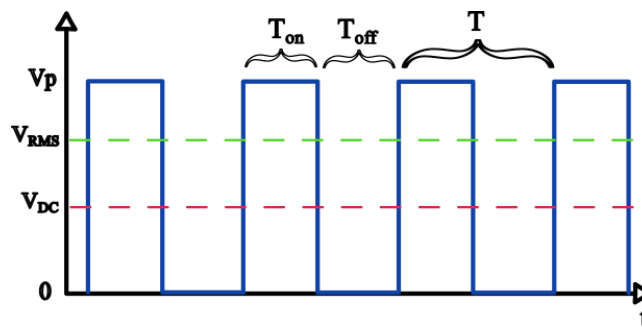
3.4.2 Parámetros de Ciclo de Trabajo

La forma de onda que se puede programar en este modo de trabajo es la representada en la figura 15, donde se indican las variables que se utilizaron en estas pruebas, donde el ancho de pulso (relacionado con el ciclo de trabajo) fue la variable manipulada con tal de disminuir el

tamaño de las burbujas y la tensión se manipuló para entregar la máxima potencia posible en los electrodos de la cámara del electrolizador. Hay que tener en cuenta que el periodo es una consecuencia de modificar el ancho de pulso modificado hasta encontrar el punto óptimo de los parámetros T_{on} , T_{off} , su relación y su periodo, con los cuales estas burbujas se disocian mejor.

Figura 15

Forma de Onda Pruebas de PWM



Nota. En esta imagen se evidencia la forma de onda entregada por el Interpolador, tanto de tensión y corriente, en la cual se aprecian los parámetros de V_p , valor pico, también V_{RMS} , valor eficaz, V_{DC} , valor en DC, los cuales representan en forma de onda tanto a la tensión como a la corriente, mas no en su amplitud, T_{on} y T_{off} parámetros que definen el ancho del pulso encendido y apagado, respectivamente. Por último, se observa el parámetro T que representa el periodo de la onda.

El parámetro de ciclo de trabajo es un índice porcentual conformado por la siguiente relación entre T_{on} y T_{off} .

$$D(\%) = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} * 100$$

Dónde D representa el ciclo de trabajo porcentual programado.

3.4.3 Realización de Pruebas

Con toda la anterior información tenida en cuenta, se realizaron las respectivas pruebas dando por resultado los siguientes datos:

Tabla 3

Resultados en Pruebas de Modulación por Ancho de Pulso

Ciclo de Trabajo D %	Frecuencia de onda f Hz	Ton ms	Toff ms	Datos en Fuente		Datos en Electrolizador		
				V _f (V)	I _f (A)	V _{tot} (V)	I _{tot} (A)	Potencia (W)
50.00	500.00	1	1	7.16	4.32	1.93	7.22	13.95
66.66	333.33	2	1	6.98	4.57	2.05	6.69	13.74
33.33	333.33	1	2	8.15	3.02	1.55	6.59	10.26
75.00	250.00	3	1	6.24	4.68	2.11	6.39	13.48
50.00	250.00	2	2	7.40	3.53	1.78	6.29	11.18
80.00	200.00	4	1	6.07	4.74	2.07	6.23	12.89
83.33	166.66	5	1	5.93	4.79	2.10	6.09	12.77
90.91	90.91	10	1	5.68	4.89	2.15	5.78	12.40
83.33	83.33	10	2	6.03	4.51	2.12	5.71	12.13
25.00	250.00	1	3	8.51	2.29	1.23	5.68	6.99
80.00	66.67	12	3	6.18	4.28	2.06	5.59	11.53
88.24	29.41	30	4	5.83	4.54	2.14	5.54	11.84
75.00	50.00	15	5	6.41	3.98	2.00	5.46	10.93
80.00	40.00	20	5	6.21	4.15	2.04	5.44	11.07
83.33	16.66	50	10	6.06	4.26	2.04	5.36	10.95
50.00	50.00	10	10	7.53	2.73	1.64	5.09	8.34

Nota. En esta tabla se evidencian los datos tomados de tensiones (V), corrientes (I) donde el subíndice “f” corresponde a los datos tomados de la fuente y los datos con subíndice “tot” corresponden a los datos en el electrolizador, calculados como se indicó para obtener su valor real. La frecuencia de la señal “f”, el ciclo de trabajo (D) y los parámetros programados de T_{on} y T_{off}, en Hz, %, y milisegundos respectivamente.

El análisis de los datos más representativos, organizados de forma ascendente según la corriente medida, revela que la relación de 1:1 ms ($T_{on} : T_{off}$, correspondientes a 500 Hz) aunque entrega la mayor intensidad de corriente no es la más eficiente para la producción de hidrógeno. Experimentalmente se observó que esta configuración genera una tasa de burbujeo muy lenta (8 segundos por burbuja) en comparación con los 3 segundos registrados en el método convencional de corriente directa (DC). No obstante, al ajustar el tiempo de encendido a una relación de 4:1 ms (200 Hz), se optimizó el sistema alcanzando una tasa de 4 s/burbuja y manteniendo una corriente robusta de 6.23 A. Debido a este equilibrio entre el flujo eléctrico y la generación efectiva de gas, la frecuencia de 200 Hz 4:1 ms, se estableció como el parámetro óptimo para la operación del electrolizador.

Con este parámetro definido se realizó una prueba con el fin de comparar una operación con esta señal, y contrastarla con la operación en DC. En la tabla 4, se evidencian los resultados con este parámetro.

Tabla 4

Pruebas con Operación Óptima PWM

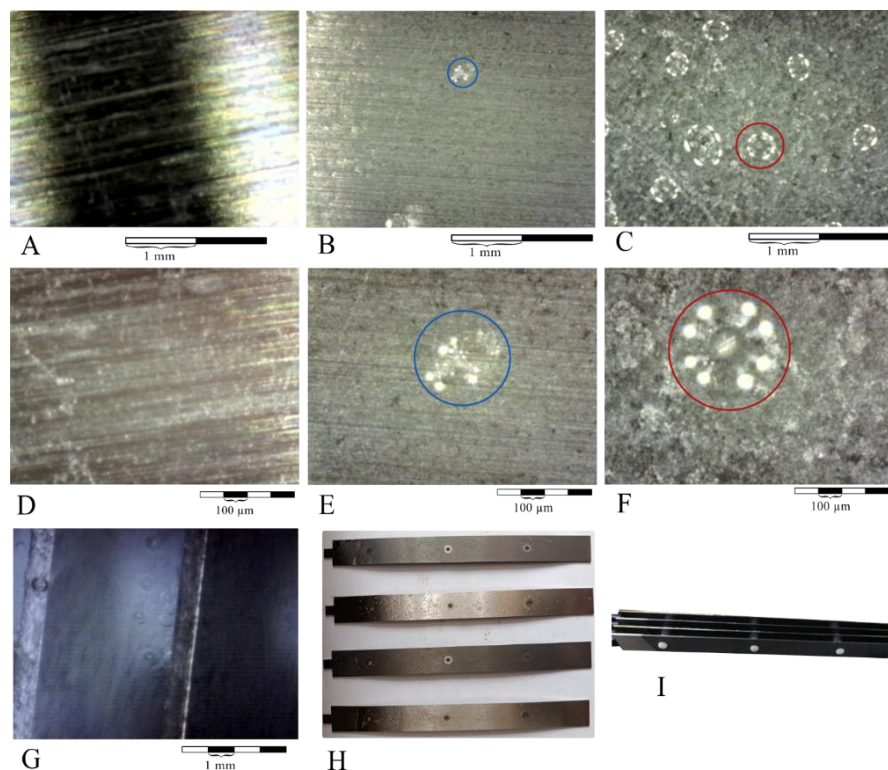
Temperatura ambiente (°C)	Tiempo de operación (h)	Datos en fuente			Datos en electrolizador		
		V_f (V)	I_f (A)	Top_f (°C)	V_{tot} (V)	I_{tot} (A)	Top_e (°C)
25	0	6.07	4.744	38	2.0698	6.2294	25.0
27	1	6.07	4.744	38	2.0698	6.2294	28.0
26	5	6.07	4.736	40	2.0607	6.2295	30.1
27	7	6.06	4.734	39	2.1042	6.2391	32.1
25	10	6.06	4.733	37	2.1215	6.2840	32.4
25	15	6.05	4.728	37	2.1510	6.3090	31.6
27	24	6.06	4.723	39	2.2230	6.1963	32.0

Nota. En esta tabla se evidencian los datos tomados de tensiones (V), corrientes (I) donde el subíndice “f” corresponde a los datos tomados de la fuente y los datos con subíndice “tot” corresponden a los datos en el electrolizador, calculados como se indicó para obtener su valor real, obtenidos en la operación con el valor considerado óptimo a 200Hz y un ciclo de trabajo del 80 %.

En la figura 16, se hace una comparación física en el desgaste del electrodo al cual se le deposita el óxido de la reacción visto en las pruebas DC (en el cátodo polo negativo de la fuente) y como se comportó ese oxido en esta prueba.

Figura 16

Resultados Visibles en pruebas PWM



Nota. En este grafico se evidencian en las imágenes A y D, el electrodo a dos resoluciones distintas antes de iniciar las pruebas, en B y E el electrodo con una capa de óxido (en el cátodo polo negativo de la fuente), al final de la prueba en PWM, en C y F la comparación con el estado

final de la capa de oxido en las pruebas de DC, en G el estado de las burbujas con el parámetro óptimo configurado, en H los electrodos dispuestos en la operación y por último en la imagen I los electrodos en su disposición operativa.

3.5 Pruebas con Parámetros Combinados

Teniendo en cuenta las bondades potenciales en el uso de estos métodos, en esta sección se tomaron datos operando con la combinación óptima de estos dos tipos de ondas en estudio, con la finalidad de averiguar si sus efectos son aditivos.

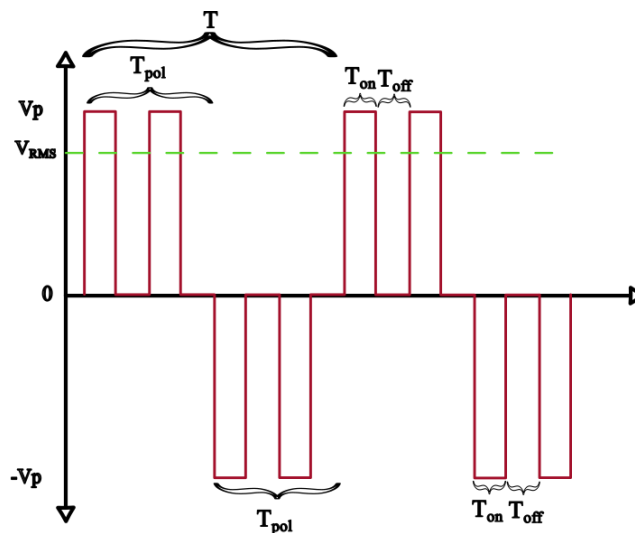
3.5.1 Consideraciones Previas

Teniendo ya consolidados los valores óptimos tanto en cambio de polaridad y en ancho de pulso, y sus efectos, se infirió la posibilidad de que sus efectos positivos se combinen.

La forma de onda programable en el Interpolador para esta prueba se puede observar en la figura 17.

Figura 17

Forma de Onda Pruebas Combinadas



Nota. En esta imagen se evidencia la forma de onda entregada por el Interpolador, tanto de tensión y corriente, en la cual se aprecian los parámetros de V_{RMS} , (valor eficaz) medido en las pruebas, V_p valor pico, T_{pol} , parámetro que define el ancho semiciclo positivo y negativo por igual. T_{on} y T_{off} parámetros que definen el ancho del pulso de encendido y apagado respectivamente. Por último, se observa el parámetro T que representa el periodo de la onda.

Sabiendo que en este caso se estudió nuevamente una onda simétrica, y que el valor medido con la función TRUE RMS, al igual que en el caso de cambio de polaridad, es el único efecto o componente de transferencia energética presente en la reacción; se procedió a clarificar los parámetros que se usaron para la evaluación de este caso.

3.5.2 Parámetros de Ciclo de Trabajo y Cambio de Polaridad

Gracias a los resultados obtenidos en las anteriores pruebas, donde se definieron los parámetros óptimos de las variables T_{pol} , T_{on} y T_{off} , los cuales fueron 490, 4 y 1 milisegundos, respectivamente. Se determinó que la señal PWM hizo 98 ciclos antes de cambiar su polaridad para hacer nuevamente 98 ciclos, en el eje negativo de la onda. Por lo tanto, se calculó que el periodo T de esta señal será de 980 milisegundos y su frecuencia de 1.02 Hz. Este resultado difiere con la frecuencia calculada en esa prueba puesto que T_{sec} es un parámetro que en esta funcionalidad del Interpolador no estuvo presente; este parámetro no influyó en la eficiencia del sistema, ya que la eficiencia encontrada en esta prueba fue influenciada mayoritariamente por el ancho del pulso de esta y no por los valles de su ciclo.

Sin embargo, realizada una prueba inicial con estos parámetros, el sistema se desestabilizó generando de nuevo efectos de picos de arranque resonantes, observados en las pruebas con parámetros de cambio de polaridad a frecuencias altas, por lo tanto, se decidió aumentar este valor de cambio de polaridad a uno donde estos efectos se estabilicen y/o desaparezcan. Para ello se

recalcó el T_{pol} óptimo para esta prueba experimentalmente, obteniendo los parámetros de T_{pol} , T_{on} y T_{off} , los cuales fueron 4 segundos, 4 y 1 milisegundos respectivamente. No obstante, este parámetro no obligó a tener nuevamente en consideración la componente en DC de la onda.

3.5.3 Realización de Pruebas

La implementación de ondas simétricas no sinusoidales constituye una estrategia eficaz de limpieza en línea, diseñada para mitigar la acumulación de burbujas gaseosas y la pasivación superficial que degradan el rendimiento del sistema. Este ensayo evaluó la capacidad de restauración de eficiencia sobre electrodos degradados en etapas previas, validando un método de intervención que interrumpe el régimen PWM estándar ante caídas de rendimiento para ejecutar ciclos de inversión de polaridad. Este procedimiento favorece la desorción de gases y la renovación de la interfase electrodo-electrolito, lo que optimiza la estabilidad operativa a largo plazo y reduce significativamente los costos de mantenimiento y reposición de materiales

En principio se trataron los parámetros de la prueba para determinar en cuanto tiempo el electrodo se “limpia” y que tanto tiempo se demora en generar la capa dorada de “protección”. Para su electrodeposición se tomaron 14 segundos de operación con los parámetros T_{pol} , T_{on} y T_{off} , los cuales fueron 4 segundos, 4 y 1 milisegundos respectivamente. El resultado de esta prueba inicial es de 6.09 V con 4.73 A, en la fuente y 2.1950 V con 6.1589 A en el electrolizador, medidos usando la función de TRUE RMS del multímetro ZOYI.

Para comprobar la limpieza del electrodo se repite una prueba en DC con los parámetros base óptimos 5.36 V y 5 A, el cual mostró una tensión de 2.18 V y una corriente de 5.42 A en el electrolizador por lo cual se puede inferir una restauración de su capacidad operativa óptima.

Para comparar la producción en caso de que se plantee usar este tipo de forma de onda para operar un sistema industrial se operó de forma continua durante 2 horas con el parámetro óptimo

programado, el cual dio por resultado una tensión de 6.06 V con 4.74 A en la fuente y una tensión de 2.1965 V con 6.1247 A en el electrolizador a 33.6 °C. Este comportamiento demuestra que la modulación PWM combinada con cambio de polaridad, permiten una gestión más precisa de la energía, minimizando las pérdidas térmicas y favoreciendo la formación de burbujas más pequeñas que se desprenden de forma uniforme de la superficie activa. Para comparar el rendimiento de este sistema "limpio" se realizó de nuevo una puesta en marcha en DC con los parámetros óptimos en la fuente y por resultado en la cámara del electrolizador se obtuvo una tensión de 2.19 V con 5.41 A. La restauración de la capacidad amperimétrica evidencia la efectividad del método como una "limpieza en línea", la cual renueva las interfases electrodo-electrolito y mitiga los efectos de la pasivación superficial.

4. Análisis de Resultados

Teniendo en cuenta la información propuesta en el apartado procedimental, los parámetros usados para la realización de las pruebas, se procedió analíticamente desde cada objetivo específico, en esta sección del documento se presentan los principales hallazgos.

4.1 Evaluación de Producción de Hidrógeno

En esta subsección se estudia la producción real de hidrógeno en cada uno de los experimentos realizados, tanto en su momento inicial de operación, como al final de cada experimento; con el fin de encontrar la eficiencia lograda o pérdida, y su comparación para cada caso propuesto.

Para lograr este objetivo se plantea usar la ley de Faraday, la cual se emplea como el modelo matemático para hallar la producción puntual de hidrógeno en masa. En este caso como solo se tiene en cuenta la producción de hidrógeno, la ecuación a usar es la siguiente.

$$m_{H_2} = \frac{Q * M}{z * F} [g]$$

Donde m_{H_2} : masa del hidrógeno producido (en gramos), Q: Carga eléctrica total en Coulomb ($I * t$, donde I es intensidad en Amperios y t el tiempo en segundos), M: Masa molar del gas producido (para el hidrógeno, es aproximadamente 2.016 g/mol), z: Número de electrones transferidos por molécula (para producir una molécula de hidrógeno H_2 , se necesitan 2 electrones), y F: Constante de Faraday (96485 C/mol). Por lo tanto, esta ecuación se puede escribir como:

$$m_{H_2} = \frac{I * t * 2.016}{2 * 96485} [g]$$

Con esta ecuación es posible calcular la cantidad de hidrógeno producida en cada prueba, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5

Producción de Hidrógeno

Prueba	Corriente inicial (A)	Corriente final (A)	Generación inicial (μg/s)	Generación final (μg/s)
DC	5.39	5.30	56.31	55.37
PWM	6.23	6.20	65.09	64.77
Polaridad	5.50	5.51	57.46	57.56
Combinado	5.42	5.41	56.62	56.52

De estos datos se puede inferir que la producción óptima se obtiene cuando se aplica una onda de tipo PWM, la cual tiene una eficiencia en producción del 15.6 % al 17 % superior con respecto a la base, es decir a la producción en DC, determinada acorde a la norma [ICONTEC ISO 50001](#).

El costo de producción del hidrógeno verde hoy en día es de 4.5 USD/kg aproximadamente, teniendo en cuenta el porcentaje de mejora del 17 % en la producción por masa de hidrógeno se

puede afirmar que puede haber un ahorro potencial de 0.765 USD en costos por kg de hidrógeno verde producido reduciendo estos a 3.735 USD/kg. Esta reducción proviene del sobrevoltaje óhmico (reducción de pérdidas por calor) lograda por el método PWM.

También se puede inferir que tanto el uso de cambio de polaridad, como el uso de PWM combinado con cambio de polaridad, mejoran el sistema, ya que agregan una capa protectora al electrodo la cual les da una mayor conductividad, es decir, no solo restauran el rendimiento inicial, sino que lo aumentan, sin embargo, el uso de la combinación de las dos técnicas no representa una mejoría significativa.

4.2 Análisis de Desempeño Energético

Con esta medida de masa de hidrógeno producida por segundo, se calcula la eficiencia energética del proceso a partir del concepto del consumo específico (kWh/Nm³, kilo Watt hora de energía por metros cúbicos normales de hidrógeno), por el cual se mide la eficiencia de la reacción electroquímica en industrias productoras de hidrógeno. Sabiendo que el hidrógeno ocupa un espacio de 22.14L/mol, es decir, unos 0.0224 Nm³/mol (metros cúbicos normales por mol), y que el número de moles está dado por la siguiente expresión.

$$n = \frac{m_{H_2}}{M} [mol]$$

Donde n: número de moles producidos de hidrógeno, m_{H_2} : masa del hidrógeno producido (en gramos), M: Masa molar del gas producido (para el hidrógeno, es aproximadamente 2.016 g/mol). Con esta equivalencia Se obtiene el volumen normal de hidrógeno producido (por hora), parámetro que determina el volumen que ocupa el hidrogeno producido en condiciones de 0°C y 1 atm de presión.

Con estos datos se puede evaluar el consumo energético específico C_e , con la siguiente expresión.

$$C_e = \frac{V * I * t}{Volumen}$$

Donde V: Tensión aplicada (V), I: Corriente eléctrica (A), t: Tiempo de la prueba en horas (h), Volumen: Volumen de hidrógeno producido, medido o calculado en Nm³. Con esta información se puede hacer el análisis por cada prueba el cual se presenta en la siguiente tabla. Teniendo en cuenta la relación entre la producción por Nm³, es igual a la producción por kg multiplicada por 0.08988.

Tabla 6

Evaluación de Desempeño Energético

Prueba	Tensión final (V)	Corriente final (A)	Generación final (µg/s)	Volumen normal (Nm³)	C_e (kWh/Nm³)	C_e (kWh/kg)
DC	2.44	5.30	55.37	0.0022148	5.8389	64.96
PWM	2.22	6.20	64.77	0.0025908	5.3126	59.11
Polaridad	1.99	5.51	57.56	0.0023024	4.7624	52.99
Combinado	2.19	5.41	56.52	0.0022608	5.2406	58.31

En estos datos es importante tener en cuenta que a menor índice de consumo energético específico la eficiencia del sistema es mayor. De esto se infiere que el uso de PWM hace que el sistema aumente su eficiencia energética en aproximadamente 10 % respecto a su eficiencia en DC. Por otro lado, usando la combinación de parámetros su eficiencia es mejorada en un 11.4 % y en el uso de cambio de polaridad su eficiencia aumenta en 22.6 %, determinada acorde a la norma [ICONTEC ISO 50001](#).

Por lo tanto, usar solamente el parámetro de cambio de polaridad resulta altamente atractivo ya que supone una eficiencia energética muy alta, sin embargo, para aplicaciones

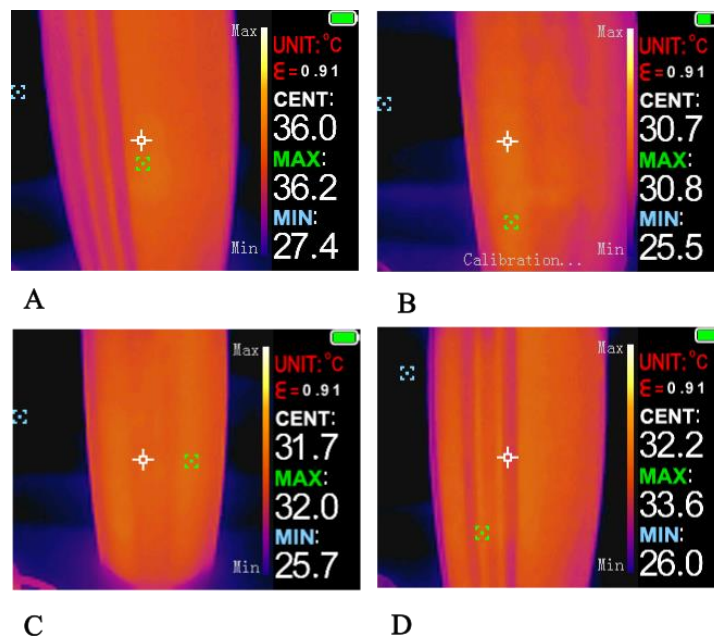
industriales este modelo no es tan factible ya que necesitaría una inversión en CAPEX superior para efectos de la separación de los gases de hidrógeno y oxígeno.

4.3 Análisis de Mejora en la Estabilidad Térmica

Una de las variables que disminuye la eficiencia de la reacción es la generación de calor en las cámaras, producidas por efectos resistivos tanto del material de los electrodos, así como del tamaño de las burbujas generadas. En esta sección se evalúa este parámetro, medido directamente de la cámara al final de cada prueba. En la siguiente figura se evidencian estos datos.

Figura 18

Nivel de Temperatura al Final de Pruebas



Nota. En esta imagen se evidencian las capturas con la cámara infrarroja del multímetro termográfico ZOYI ZT-R02, tomadas al final de cada prueba. La imagen A muestra la prueba de operación en DC; la B, en cambio de polaridad; la C, en modulación por ancho de pulso y D, en la de parámetros combinados.

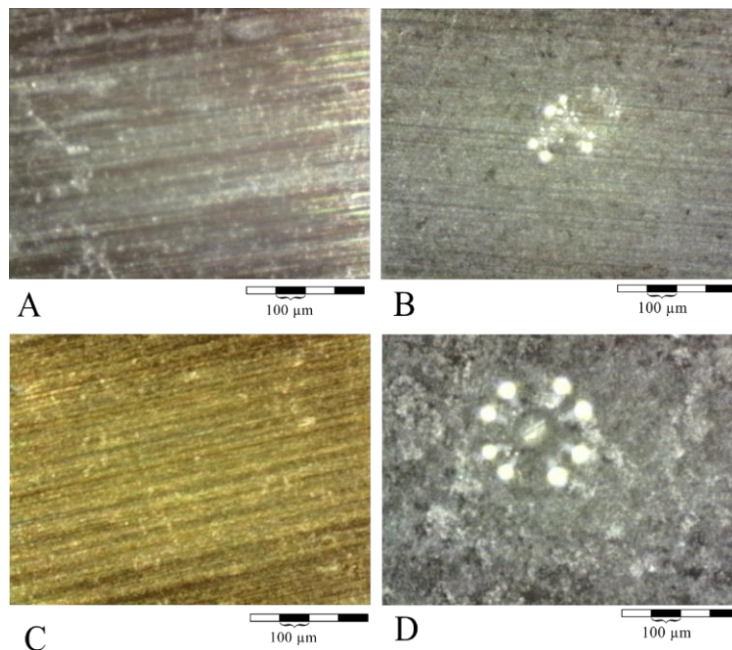
La evaluación termográfica evidenció que el método de cambio de polaridad es el más efectivo para mitigar el sobrecalentamiento, este logró una reducción del calor generado en el electrolizador del 17.5 % en comparación con la operación en corriente directa. Este resultado es significativo dado que, a pesar de que la prueba PWM manejó una densidad de corriente superior y logró una mejora del 13.13 %, la mejora en la desorción de burbujas redujo la resistencia óhmica del electrolito. Esto no solo mejora la eficiencia energética global alineada con la [ISO 50001](#), sino que garantiza que el reactor opere lejos de los 90 °C, rango donde la degradación de los electrodos de acero inoxidable se acelera y la calidad del hidrógeno disminuye por exceso de humedad.

4.4 Análisis de Resultados Visibles

En esta sección se evidencian los resultados en los electrodos al final de cada prueba. Para esto se hace uso de la siguiente figura.

Figura 19

Resultados Visibles al Final de las Pruebas



Nota. En esta imagen se evidencian las capturas con el microscopio Hayve, tomadas al final de cada prueba donde la imagen A, es la captura antes de la operación; B, en la prueba de modulación por ancho de pulso; C, en cambio de polaridad y en la prueba de parámetros combinados y D, en la prueba en DC.

El costo operativo que usa técnicas de limpieza y protección del electrodo a partir de la aplicación de ciclos de cambios de polaridad es significativo y supone un ahorro en la operación y mantenimiento, este valor, aunque es completamente cualitativo, es apreciable en las imágenes del final de cada prueba, se aprecia a partir de la cantidad de óxido visible, aproximadamente 70% inferior, en la superficie del electrodo en la prueba de PWM comparada con la de la prueba en DC.

Existe una fuerte correlación entre estos estados de oxidación y su incremento de la vida útil. Estudios realizados por [Symes et al. \(2014\)](#), demostraron esta correlación por la cual se establece que a menor cantidad de óxido permeando el electrodo es mayor la capacidad conductiva, y es menor su ritmo de degradación.

Por la variación entre la eficiencia energética y el costo de los materiales, si se compara el costo del níquel (50-130 USD/kg), con el del acero inoxidable 304 (2-3USD/kg) y sus rendimientos operativos (resistencia a la corrosión), se nota la gran diferencia en CAPEX y OPEX de un sistema que no necesita de materiales costosos y goza de estas mejoras.

De estas imágenes se puede inferir claramente la diferencia ya notada en cada una de las pruebas efectuadas en comparación con el electrodo antes de iniciar la operación. Lo anterior evidencia que los resultados de eficiencia mejoran cuando el electrodo se encuentra más limpio o con la “capa dorada de protección”.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se encuentran en coherencia con investigaciones previas que han evaluado la aplicación de señales pulsadas en procesos de electrólisis. En el estudio desarrollado por [Shaaban \(1994\)](#). Se demostró que la aplicación de corriente pulsada (Pulsed DC) favorece la reducción de sobrepotenciales y mejora el desprendimiento de burbujas gaseosas, lo que disminuye la resistencia interfacial y optimiza la eficiencia energética del sistema. De manera complementaria, estudios referenciados en el trabajo de [Conker \(2019\)](#), reportan que el control dinámico del campo eléctrico en electrolizadores permite mejorar la respuesta ante condiciones variables de operación, particularmente en sistemas acoplados a fuentes renovables intermitentes. Estos antecedentes apoyan un principio fundamental de la modulación temporal de la corriente como estrategia para optimizar la transferencia de carga y mitigar fenómenos que limitan el desempeño electroquímico.

No obstante, en términos contextuales, mientras los estudios previos se centran en la mejora instantánea de la eficiencia energética o en la reducción del voltaje de celda, el presente trabajo amplía dicha perspectiva al incorporar variaciones controladas de polaridad como mecanismo de intervención sobre la degradación superficial de los electrodos. La evidencia experimental obtenida muestra que la operación en corriente continua constante favorece la formación progresiva de capas de óxido y depósitos superficiales, incrementando el voltaje requerido para mantener la misma corriente a lo largo del tiempo.

En contraste, la aplicación de modulación por ancho de pulso combinada con inversión periódica de polaridad reduce la permanencia de especies reactivas en una misma superficie activa, promoviendo la desorción de burbujas y limitando la formación de capas pasivas. En este sentido,

el trabajo no contradice los antecedentes, sino que los complementa al integrar eficiencia energética y mantenimiento electroquímico en una misma estrategia operativa.

La implementación de un esquema de alimentación eléctrica dinámica basada en PWM y cambios de polaridad, constituye una mejora incremental técnicamente viable que, sin requerir un rediseño estructural de la celda, supera al método convencional al demostrar una eficiencia energética entre el 10 % y el 22 % y una potencial extensión de la vida útil de los electrodos, validando la hipótesis de reducción de estrés electroquímico bajo señales moduladas.

Este avance permite un ahorro proyectado de 0.765 USD/kg, situando el costo de producción en 3.735 USD/kg, lo cual eleva la competitividad del hidrógeno verde en el marco de la [Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia](#) y alinea el sistema con los estándares de desempeño de la norma [ISO 50001](#) al reducir las fugas energéticas por calor. No obstante, la mejora de solo un 11.4 % obtenida con parámetros combinados revela una posible interferencia en la dinámica de desprendimiento gaseoso por falta de sincronización frecuencial, la cual define una línea de investigación futura crucial para optimizar los periodos de conmutación y maximizar la estabilidad operativa en aplicaciones industriales a largo plazo.

5. Conclusiones

La investigación confirma que la transición de un control de corriente estático a uno dinámico, mediante la implementación de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) y cambios periódicos de polaridad, constituye un método efectivo para optimizar la electrólisis alcalina. Los resultados experimentales demostraron que la técnica de cambio de polaridad es la más eficiente para mitigar el sobrevoltaje óhmico, logrando un consumo energético de 4.76 kWh/Nm³, lo que representa una mejora del 22.6 % respecto a la operación convencional en corriente directa (DC),

debido a un resultado inusual en el cual una capa que aumentó la conductividad del electrodo apareció como producto. Sin embargo, por la disposición física de los electrolizadores actuales este método puede no llegar a usarse industrialmente, adicionalmente, la implementación del método PWM, el cual tiene un consumo de 5.31 kWh/Nm³, y supone una mejora en el 10 % de la productividad, conlleva a una gran mejora en la producción con bajo costo de implementación.

En cuanto a la estabilidad operativa, el uso de PWM resultó superior en la gestión térmica del reactor al reducir la generación de calor en un 13.13 %, permitiendo manejar densidades de corriente más altas (hasta 6.20 A) sin sobrepasar los límites de temperatura crítica. Este fenómeno se atribuye a que la modulación favorece la formación de burbujas gaseosas más pequeñas, lo que disminuye la resistencia interna del electrolito y mejora la transferencia de carga. Además, la inversión de polaridad actúa como un mecanismo de "limpieza en línea" que, según las proyecciones, puede extender la vida útil de los electrodos hasta en un 30 %, y tiene una potencial disminución de efecto térmico del 17,5 %.

Finalmente, el impacto socioeconómico del proyecto se refleja en un ahorro potencial de 0.765 USD por cada kilogramo de hidrógeno producido, situando el costo proyectado en 3.735 USD/kg. Esta reducción de costos operativos (OPEX) alinea el sistema con los estándares de desempeño de la norma [ISO 50001](#) y los objetivos de la [Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia](#), favoreciendo la competitividad del hidrógeno verde frente a los combustibles fósiles. No obstante, se concluye que la combinación de ambas técnicas presenta interferencias en la dinámica de burbujas, lo que sugiere que futuros trabajos deben centrarse en la sincronización precisa de las frecuencias de conmutación.

6. Recomendaciones

Este trabajo propone tres modalidades de intervención con base en los hallazgos. La primera corresponde a su uso en celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), dispositivos electroquímicos en los cuales el hidrógeno se oxida en el ánodo, generando protones y electrones. Los electrones circulan a través de un circuito externo produciendo energía eléctrica, mientras que los protones atraviesan la membrana electrolítica hasta el cátodo, donde reaccionan con oxígeno para formar agua como subproducto. Este proceso permite la conversión directa de energía química en energía eléctrica con alta eficiencia y bajas emisiones contaminantes.

La segunda modalidad corresponde al uso del hidrógeno como combustible directo, ya sea en procesos de combustión controlada o en aplicaciones industriales de alta demanda térmica. En este caso, el hidrógeno reacciona con oxígeno liberando energía térmica, generando vapor de agua como único producto de reacción. Esta alternativa representa una opción viable para sustituir progresivamente combustibles fósiles, contribuyendo a la descarbonización del sector energético.

En tercera instancia, el uso de este energético como insumo para la producción de productos químicos como el amoníaco y los fertilizantes. En la industria química, es un recurso esencial para la producción de amoníaco y metanol, permitiendo transitar hacia procesos industriales más limpios y eficientes. Específicamente, su aplicación en la fabricación de fertilizantes y urea renovable es crucial para reducir la dependencia de los hidrocarburos y minimizar la huella de carbono del sector agroquímico. De este modo, la integración del hidrógeno verde no solo optimiza la rentabilidad en sectores como la refinación de petróleo y la siderurgia, sino que también impulsa la creación de infraestructuras que fortalecen la competitividad en mercados internacionales.

En relación con la implementación del método de modulación por ancho de pulso (PWM) y el cambio periódico de polaridad, es importante considerar las implicaciones operativas asociadas a la producción de gases. La inversión de polaridad provoca que la generación de hidrógeno y oxígeno alterne entre los electrodos, lo cual introduce una complejidad adicional en el sistema de recolección y almacenamiento si se requiere la separación estricta de gases. Desde una perspectiva industrial, esto implicaría la incorporación de válvulas de conmutación o sistemas automáticos de direccionamiento del flujo gaseoso sincronizados con la señal de control. No obstante, en el marco de esta investigación, la inversión de polaridad se contempla principalmente como una estrategia de mantenimiento electroquímico para reducir la formación de capas pasivas y depósitos sobre los electrodos, favoreciendo su autolimpieza y prolongando su vida útil.

Adicionalmente, es pertinente destacar que los fenómenos de corrosión y degradación no se limitan a los electrolizadores alcalinos. En los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM), la degradación de electrocatalizadores basados en metales nobles como platino (Pt), iridio (Ir) o rutenio (Ru) constituye uno de los principales factores que limitan la durabilidad del sistema y elevan significativamente los costos de operación. La aplicación de señales PWM podría contribuir a reducir el estrés electroquímico continuo sobre los materiales catalíticos y las membranas, al evitar condiciones prolongadas de sobrepotencial constante. Esta estrategia podría mitigar fenómenos como la sobre oxidación, la disolución de catalizadores y la aglomeración de partículas, favoreciendo una mayor estabilidad estructural y eficiencia operativa, especialmente en entornos altamente corrosivos o en condiciones ácidas.

Desde el punto de vista financiero, la implementación de un sistema de alimentación basado en PWM no requeriría modificaciones estructurales significativas en electrolizadores de gran escala. La intervención principal recaería en la etapa de potencia y control, es decir, en la

sustitución o adaptación de la fuente de alimentación convencional por un convertidor capaz de suministrar corriente modulada. Esto representa una inversión comparativamente baja frente al costo total de una planta de electrólisis, particularmente si se considera el potencial incremento en eficiencia energética, reducción de mantenimiento y prolongación de la vida útil de los electrodos. Por tanto, se recomienda realizar un análisis costo–beneficio detallado que contemple variables como ahorro energético, reducción de paradas por mantenimiento y aumento en la durabilidad de los componentes, con el fin de cuantificar el impacto económico real de la implementación del método propuesto.

Referencias Bibliográficas

- Beck, T. R. (2014). *ECS Classics: Hall and Heroult and the Discovery of Aluminum Electrolysis*. Interface Magazine, 23(2), 36-37. <https://doi.org/10.1149/2.F01142if>
- Conker, Ç. (2019). *A Novel Fuzzy Logic Based Safe Operation-oriented Control Technique for Driving HHO Dry Cell Systems Based on PWM Duty Cycle*. International Journal of Hydrogen Energy, 44(20), 9718–9725. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.243>
- De Levie, R. (1999). *The Electrolysis of Water*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 476, 92–93. <https://hofstedesterreschans.nl/wp-content/uploads/2023/11/The-electrolysis-of-water.pdf>
- Dobó, Z., y Palotás, A. B. (2016). *Impact of the Voltage Fluctuation of the Power Supply on the Efficiency of Alkaline Water Electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 41(28), 11849–11856. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.132>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Sistemas de Gestión de la Energía*. Requisitos con orientación para su uso (NTC-ISO 50001:2019)
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). *Global Climate Change and Greenhouse Effect*. Entrepreneurship and Sustainability Issues, 7(4), 2897–2913. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia*. https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Morgan, E. R., Manwell, J. F., & McGowan, J. G. (2013). *Opportunities for Economies of Scale with Alkaline Electrolyzers*. International Journal of Hydrogen Energy, 38(36), 15903–15909. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.116>

- Sánchez, C., & Amores, E. (2019). *Advances in Alkaline Water Electrolyzers: A review*. Journal of Energy Storage, *23*, 392-403. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>
- Sebbahi, S., Assila, A., Alaoui Belghiti, A., Laasri, S., Kaya, S., Hlil, E. K., Rachidi, S., & Hajjaji, A. (2024). *A Comprehensive Review of Recent Advances in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production*. International Journal of Hydrogen Energy, 82, 583–599. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.428>
- Shaaban, A. H. (1994). *Pulsed DC and Anode Depolarization in Water Electrolysis for Hydrogen Generation*. Air Force Civil Engineering Support Agency]. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA297375.pdf>
- Symes, D., Taylor-Cox, C., Holyfield, L., Al-Duri, B., & Dhir, A. (2014). *Feasibility of an oxygen-getter with nickel electrodes in alkaline electrolyzers*. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 3(2), Article 27. <https://doi.org/10.1007/s40243-014-0027-4>
- Xia, Y., Cheng, H., He, H., & Wei, W. (2023). *Efficiency and Consistency Enhancement for Alkaline Electrolyzers Driven by Renewable Energy Sources*. Communications Engineering, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00070-7>
- Xianxi, W. (2021). *Inert Anodes for Aluminium Electrolysis*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28913-3>
- Yang, B., Zhang, R., Shao, Z., & Zhang, C. (2023). *The Economic Analysis for Hydrogen Production Cost Towards Electrolyzer Technologies: Current and future competitiveness*. International Journal of Hydrogen Energy, 48(37), 13767–13779. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.204>