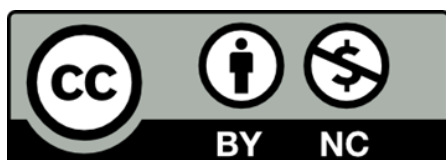


EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE
MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA CON ELECTRODOS DE BAJO COSTO



ARIADNA MARTÍNEZ VÁSQUEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2024

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE
MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA CON ELECTRODOS DE BAJO COSTO

ARIADNA MARTÍNEZ VÁSQUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Ing. JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

El presente proyecto y logro va dedicado a mí familia, en especial mí hijo y mi pareja quienes fueron la principal motivación para no desistir durante todo el proceso académico, mi mami y mi abuelito a quienes les prometí que me verían cumplir este gran sueño de ser Ingeniera Ambiental; también a Dios por darme salud, paciencia y todo lo que necesité para cumplir este logro. Gracias por siempre estar apoyándome y sobre todo por creer en mí, los amo con el alma.

Agradecimientos

Gracias Dios por tener destinado para mí este logro tan anhelado. También agradezco a cada uno de los docentes que apoyaron el proceso con dedicación de tiempo, mensajes de apoyo y motivacionales, con cada una de sus explicaciones para poder entender mejor y sobre todo paciencia para lograr aprobar cada una de las asignaturas. Para mis compañer(a)s, que siempre estaban cuando se presentaban dificultades y me ayudaron siempre a solucionar, gracias.

De antemano y con el corazón, agradezco a mi mami, mi hijo y mi pareja, por el apoyo financiero, motivacional y el amor paciente que tienen hacia mí, para que todo el proceso se diera más práctico y menos agobiante. Madrecita de mí vida hoy puedo decir que lo logramos, porque siempre me enseñaste que lo que se comienza se termina y a su tiempo. Amor mío, gracias por el tiempo dedicado para explicarme, por el acompañamiento en la universidad, gracias por cada granito de arena que brindaste en ese largo camino, y ti hijo, siempre gracias porque las ganas de siempre superarme y tener una mejor calidad de vida han sido por ti.

¡Los amo con mi alma!

Contenido

Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
1.1 Formulación del Problema	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Antecedentes	15
4. Marco Teórico	17
4.1 Marco Conceptual	18
4.2 Marco Legal	20
5. Metodología	22
5.1 Fase 1: Revisión Bibliográfica	23
5.2 Fase 2: Cuantificación de H₂	23
5.3 Fase 3: Análisis estadísticos	24
6. Resultados y discusión	26
6.1 Fase 1: Revisión Bibliográfica	26
6.2 Fase 2: Cuantificación de H₂	28
6.3 Fase 3: Análisis estadísticos	31
7. Impacto social y humanístico	38
8. Conclusiones	39
9. Recomendaciones	40
10. Referencias Bibliográficas	41

Lista de tablas

Tabla 1. Marco legal que rige el enfoque de la investigación.....	20
Tabla 2. Marco legal que rige el enfoque de la investigación.....	21
Tabla 3. Número de artículos encontrados de acuerdo con la base de datos consultada.	26
Tabla 4. Selección de electrolitos y electrodos para la investigación.	28
Tabla 5. Medidas de los tubos de ensayo.....	30
Tabla 6. Cuantificación de producción de H ₂ con diferentes configuraciones de celda.....	30

Lista de Figuras

Figura 1. Tonos de color de hidrógeno y su tecnología, costo y CO ₂	12
Figura 2. Aparato para electrólisis del agua a baja escala.	17
Figura 3. Montaje de celda para electrólisis del agua.....	20
Figura 4. Diagrama visual de la metodología.....	22
Figura 5. Artículos publicados entre 2004-2024 en la plataforma Scopus.....	27
Figura 6. Artículos publicados en cada uno de los países.	28
Figura 7. Fotografía de cada uno de los electrodos utilizados.....	29
Figura 8. Construcción de las soluciones de cada electrolito soporte.	29
Figura 9 Boxplot	32
Figura 10 Prueba de Shapiro-Wilk	33
Figura 11 Mapa de calor de correlación de Spearman.....	34
Figura 12 Feature Importance.....	35
Figura 13 Robust linear model regresión results	36

Resumen

El presente estudio se enfocó en la evaluación de la eficiencia de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, utilizando electrodos de bajo costo. Para lograr este objetivo, se plantearon tres objetivos específicos: establecer las configuraciones de celda más comúnmente utilizadas, cuantificar la producción de hidrógeno verde en estas configuraciones y determinar estadísticamente las variables que más influyen en la producción de hidrógeno. La metodología del estudio se dividió en tres fases principales. En la primera fase, se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica para identificar las configuraciones de celda más frecuentes para la electrólisis. Esta revisión proporcionó una base sólida para la selección de electrodos y electrolitos para los experimentos posteriores. Se encontró que las combinaciones de electrodos de grafito y acero, junto con electrolitos como el hidróxido de potasio y el hidróxido de sodio, eran las más utilizadas en la literatura. En la segunda fase, se realizó la cuantificación de la producción de hidrógeno en diferentes configuraciones de celda. Se seleccionaron tres electrolitos soporte (KOH, NaOH y amoníaco) y cuatro materiales de electrodos (grafito, acero, aluminio y cobre) para la experimentación. Se observó que las configuraciones de celda con electrodos de grafito y electrolito de hidróxido de sodio con $6,45 \text{ cm}^3$ e hidróxido de potasio con $3,85 \text{ cm}^3$ produjeron la mayor cantidad de hidrógeno verde, destacándose por su eficiencia en la generación de gas hidrógeno. En la tercera fase, se llevó a cabo un análisis estadístico para determinar las variables más influyentes en la producción de hidrógeno. Se aplicaron pruebas de normalidad, correlación de Spearman, análisis de bosques aleatorios y modelo de regresión múltiple. Los resultados revelaron que la corriente eléctrica fue la variable más influyente en la producción de hidrógeno, seguida por el tipo de electrolito utilizado. Esto sugiere la importancia de controlar y optimizar estos parámetros para mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis.

En conclusión, este estudio proporciona evidencia sólida sobre la eficiencia de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con electrodos de bajo costo. Las configuraciones de celda con electrodos de grafito y electrolitos de hidróxido de potasio mostraron los mejores resultados en términos de producción de hidrógeno. Además, se identificó la corriente eléctrica como la variable más influyente en el proceso de electrólisis, destacando la importancia de controlar este parámetro para optimizar la producción de hidrógeno verde.

Palabras Clave: *Hidrógeno Verde, Electrólisis del agua, Electrodos de bajo costo.*

Abstract

This study aimed to evaluate the efficiency of green hydrogen production through electrolysis using low-cost electrodes. To achieve this goal, three specific objectives were outlined: to establish the most commonly used cell configurations, quantify green hydrogen production in these configurations, and statistically determine the variables that most influence hydrogen production. The methodology of the study was divided into three main phases. In the first phase, an exhaustive literature review was conducted to identify the most frequently used cell configurations for electrolysis. This review provided a solid basis for selecting electrodes and electrolytes for subsequent experiments. Combinations of graphite and steel electrodes, along with electrolytes such as potassium hydroxide and sodium hydroxide, were found to be the most commonly used in the literature. In the second phase, the production of hydrogen was quantified in different cell configurations. Three support electrolytes (KOH, NaOH, and ammonia) and four electrode materials (graphite, steel, aluminum, and copper) were selected for experimentation. It was observed that cell configurations with graphite electrodes and potassium hydroxide electrolyte produced the highest amount of green hydrogen, standing out for their efficiency in hydrogen gas generation. In the third phase, a statistical analysis was conducted to determine the most influential variables in hydrogen production. Normality tests, Spearman correlation, random forest analysis, and multiple regression modeling were applied. The results revealed that electrical current was the most influential variable in hydrogen production, followed by the type of electrolyte used. This suggests the importance of controlling and optimizing these parameters to improve the efficiency of the electrolysis process.

In conclusion, this study provides solid evidence on the efficiency of green hydrogen production through electrolysis with low-cost electrodes. Cell configurations with graphite electrodes and potassium hydroxide electrolytes showed the best results in terms of hydrogen production. Additionally, electrical current was identified as the most influential variable in the electrolysis process, highlighting the importance of controlling this parameter to optimize green hydrogen production.

Keywords: *Green Hydrogen, Water Electrolysis, Low-cost Electrodes.*

1. Introducción

La demanda y el consumo mundial de energía ha aumentado debido al crecimiento poblacional y al nivel de vida de las personas, además de la extensión industrial de los países en desarrollo conduciendo a una enorme cantidad de emisiones de CO₂; de acuerdo con el informe de la Agencia Internacional de Energía para el año 2019, el suministro mundial de energía primaria fue de 14.410 Mte (IEA, 2019).

Hasta la fecha, más del 95% de esta enorme demanda de energía se satisface mediante el uso de combustibles fósiles; sin embargo, el uso de estos combustibles libera una alta concentración de emisiones de gases de efecto invernadero, aumentando en consecuencia el calentamiento global y la contaminación ambiental, por lo tanto, el rápido desarrollo de tecnologías alternativas de energía verde, es esencial para satisfacer las demandas energéticas globales y el desarrollo sostenible (IEA, 2023). En este contexto, La lucha contra el calentamiento global, impulsada por la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), es una preocupación internacional, el Acuerdo de París de 2015 busca limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C, priorizando incluso un límite de 1,5°C. Colombia se compromete a reducir sus emisiones en un 51% para 2030, con miras a alcanzar la carbono-neutralidad hacia mediados de siglo, según su Contribución Determinada a Nivel Nacional (Minienergía, 2024).

Muchos países se han centrado en introducir políticas energéticas respetuosas con el medio ambiente para un medio ambiente sostenible y la descarbonización, por ejemplo, Corea del Sur anunció el Segundo Plan Maestro de Respuesta al Cambio Climático en 2019 para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de 709,1 millones de toneladas en 2017 a 536 millones de toneladas para 2030 para una sociedad verde sostenible y baja en carbono, Además, el gobierno de Corea del Sur planeó suministrar el 20% de la energía mediante recursos energéticos renovables para 2030, denominado "Plan de Energía Renovable 3020" (Lee, Lee, Byun, & Lim, 2020).

A nivel mundial varias instituciones/organizaciones de investigación han avanzado hacia el desarrollo de tecnologías innovadoras que pueden utilizar fuentes renovables para generar energía y combustibles verdes, el hidrógeno es uno de esos prometedores portadores de energía renovable respetuosos con el medio ambiente y es el elemento más abundante en el universo (Vincent & Bessarabov, 2018).

El átomo de hidrógeno está compuesto por un protón y un electrón, convirtiéndose en el elemento más ligero del universo con propiedades únicas como alta densidad de energía (120 MJ/kg) y menor densidad de energía volumétrica (8 MJ/L); Sin embargo, no está disponible directamente en la Tierra, sino en formas químicamente combinadas de agua, combustibles fósiles y biomasa; por tanto, el principal desafío es separar el hidrógeno de los compuestos naturales de manera eficiente y económica (Kumar & Lim, 2022).

El hidrógeno se clasifica en varios tonos de color según su tecnología de producción, fuente de energía e impacto ambiental, el hidrógeno azul se produce a partir de gas natural con captura de CO₂, aunque las fugas y el impacto a largo plazo del almacenamiento son inciertos, por otro lado el hidrógeno gris se produce de manera similar, pero sin captura de CO₂; el hidrógeno marrón se deriva de materias primas ricas en hidrocarburos, liberando grandes cantidades de CO₂; el hidrógeno negro proviene de la gasificación del carbón y finalmente, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis de agua con electricidad renovable, sin emisiones de carbono (Kumar & Lim, 2022).

Figura 1. Tonos de color de hidrógeno y su tecnología, costo y CO₂.

Hydrogen Color	Technology	Source	Products	Cost (\$ kg/H ₂)	CO ₂ emissions
Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (Lignite)	H ₂ + CO ₂	1.2–2.1	High
Black Hydrogen	Gasification	Black coal (Bituminous)	H ₂ + CO ₂	1.2–2.1	High
Grey Hydrogen	Reforming	Natural gas	H ₂ + CO ₂ (Released)	1–2.1	Medium
Blue Hydrogen	Reforming + carbon capture	Natural gas	H ₂ + CO ₂ (Captured 85-95%)	1.5–2.9	Low
Green Hydrogen	Electrolysis	Water	H ₂ + O ₂	3.6–5.8	Minimal

Nota, adaptado de: (Kumar & Lim, 2022).

El creciente interés en las tecnologías de electrólisis del agua se debe a que la producción de hidrógeno verde es crucial para la descarbonización global; sin embargo, su producción está mayormente restringida a proyectos de demostración debido a limitaciones económicas, por ello, el objetivo general de este trabajo es la evaluación de la eficiencia de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con electrodos de bajo costo, en el cual, se plantearon objetivos

específicos, I) Establecer configuraciones de celda más frecuentes para la electrólisis, mediante revisiones bibliográficas; II) Cuantificar la producción de hidrógeno verde de las diferentes configuraciones de celda; III) Determinar estadísticamente las variables de mayor influencia para la producción de hidrógeno verde dentro de la celda de electrolisis.

1.1 Formulación del Problema

¿Cuál es la influencia en la eficiencia de producción de hidrógeno verde del uso de electrodos de bajo costo?

2. Objetivos

1.2 Objetivo General

Evaluación de la eficiencia de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con electrodos de bajo costo.

1.3 Objetivos Específicos

- ✓ Establecer configuraciones de celda más frecuentes para la electrólisis, mediante revisiones bibliográficas.
- ✓ Cuantificar la producción de hidrógeno verde de las diferentes configuraciones de celda.
- ✓ Determinar estadísticamente las variables de mayor influencia para la producción de hidrógeno verde dentro de la celda de electrólisis.

3. Antecedentes

La hidrólisis empieza desde el año 1800 cuando el físico Italiano Alessandro Volta desarrolló una pila eléctrica capaz de convertir la energía química en energía eléctrica a través de un proceso químico transitorio cuyo montaje estaba compuesto por una serie de discos de zinc y cobre separados entre sí por trozos de cartón; para ese mismo año los ingleses Anthony Carlisle y William Nicholson llevaron a cabo un experimento donde implementaron la pila de Alessandro Volta conectándola a un recipiente con agua para así mejorar la conexión eléctrica de la pila; con este montaje se logró apreciar oxígeno en uno de los electrodos y en el otro hidrógeno, llegando así a la definición de hidrólisis en donde se produce una descomposición de las moléculas de agua, dando así paso a la generación de intereses de los distintos campos de aplicación como la física, la química y la biología, entre otros (Polanco, 2018).

De acuerdo con la investigación realizada por (Marcelo Carmo, 2013) , este proporciona una visión general detallada de la electrólisis del agua con membrana de intercambio de protones (PEM), destacando su importancia como método para la producción de hidrógeno verde ya que proporciona una solución sostenible y es muy adecuada para combinarse con fuentes de energía como la eólica y la solar además de ello, se analizan los principios fundamentales, los avances tecnológicos y los desafíos asociados con esta tecnología, lo que contribuye a la comprensión del contexto en el que se desarrolla el trabajo de investigación.

Para el año 2014 Niu, Huang, Gao, Wang y Qin, generaron hidrógeno a partir de la electrólisis de materiales compuestos de grafito molido con agua, en donde los resultados mostraron que al adicionar cloruro de sodio (se produjeron efectos favorables en la reacción del grafito con el agua, es de suma importancia resaltar la influencia de la temperatura en la producción de hidrógeno así como la mezcla de grafito con aluminio lo cual mejoró positivamente la producción de hidrógeno, determinando así que en cuanto más pequeña sea la partícula de aluminio presente en el grafito, tendrá una mejor evolución (Niu & Huang, 2014).

En el trabajo de Según (Vincent & Bessarabov, 2018), se realizó la producción de hidrógeno a bajo costo mediante la electrólisis con membrana de intercambio de aniones (AEM), de igual manera se destacan las ventajas de esta tecnología, incluyendo la posibilidad de utilizar electrodos de bajo costo y la reducción de la necesidad de metales preciosos, lo que la convierte en una opción atractiva para la producción de hidrógeno verde, también aborda los desafíos

asociados con la electrólisis con AEM, como la estabilidad de la membrana y la eficiencia energética, este contexto respalda la relevancia del trabajo de evaluación de eficiencia propuesto, ya que contribuye a comprender el estado actual y las perspectivas de la electrólisis del agua con electrodos de bajo costo.

En agosto del 2021 Yue, Lambert, Pahon, Roche, Jemei y Hissel ejercieron una revisión crítica que abarcaba una amplia gama de tecnologías relacionadas con los sistemas de energía de hidrógeno, en ella exploraron diversas aplicaciones, tendencias y desafíos asociados con la producción, almacenamiento y uso de hidrógeno como vector energético, este análisis integral ayuda a contextualizar la importancia de investigar la eficiencia de producción de hidrógeno verde y sus implicaciones en el panorama energético actual (Meiling Yue, 2021).

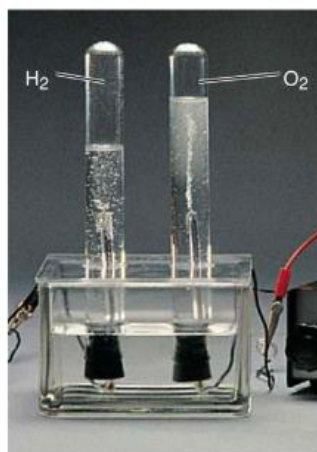
De acuerdo con (Kumar & Lim, 2022) se explora diferentes enfoques, como la electrólisis alcalina y de membrana de intercambio de protones (PEM), así como los avances en sistemas de alimentación de energía renovable, esta investigación discute los principios básicos de cada tecnología, sus ventajas y desventajas, así como los desafíos y oportunidades para la implementación a gran escala, además, destaca la importancia de la electrólisis del agua como una ruta prometedora para la producción de hidrógeno verde y su papel en la transición hacia un sistema energético más sostenible.

En el año 2022 Muñoz, Beleño y Díaz realizaron un análisis del potencial de uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia, para ello, se establecieron 4 sectores con aplicabilidad en Colombia de acuerdo a su mezcla en la red de gas natural, uso en el transporte, entre otras, se implementó un modelo de electrolizador alcalino y PEM con potencias similares, determinando así la capacidad de producción de hidrógeno verde con base en el cálculo del balance de masa y energía, se consideró cada sector y se evaluó el abastecimiento de hidrógeno verde en donde se evidenció que tiene un porcentaje de reemplazo del 1% respecto al total de combustible fósil demandado en el país, de acuerdo con el análisis se identificaron reducciones de entre 3.000 y 37.000 toneladas de equivalentes, dependiendo del sector analizado (Muñoz-Fernández, 2022)

4. Marco Teórico

En la electrólisis del agua se realiza la reducción en el cátodo del ion hidronio para formar gas de hidrógeno, por otra parte, en el ánodo los iones hidroxilo se oxidan formando oxígeno gaseoso (Chang, 2002) , la reacción tanto en el cátodo como en el ánodo se pueden observar en la siguiente imagen y ecuación.

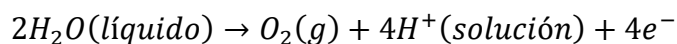
Figura 2. Aparato para electrólisis del agua a baja escala.



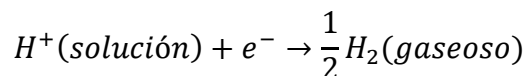
Nota, Adaptado de (Chang, 2002).

El volumen de gas de hidrógeno generado en el cátodo es dos veces la cantidad de gas de oxígeno generado en el ánodo.

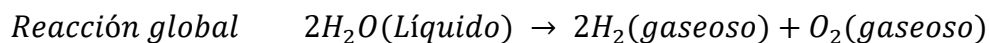
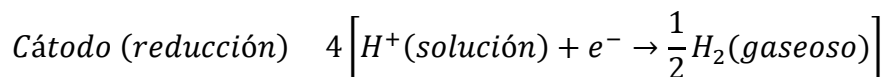
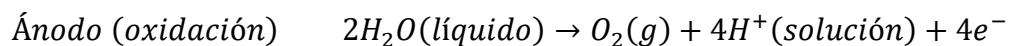
Ecuación 1. Semireacción Ánodo



Ecuación 2. Semireacción Cátodo



Ecuación 3. Reacción global



Para el cálculo del potencial de equilibrio de una reacción electroquímica se aplica la ecuación de Nernst, de tal manera que se pueda describir la relación entre la concentración de los iones que participan en la reacción y el potencial de la celda electroquímica en la que la reacción ocurre, esta ecuación permite predecir cómo cambia el potencial de una celda electroquímica a medida que cambian las concentraciones de los reactantes y productos (Guañuna, 2016), esta está expresada por:

Ecuación 4

$$E = E^{\circ} - RTnF \ln(Q)$$

En donde,

E es el potencial de la celda

E° es el potencial estándar de la celda

R es la constante de los gases ideales

T es la temperatura en kelvin

n es el número de electrones transferidos en la reacción

F es la constante de Faraday

Q es la constante de equilibrio de la reacción

Por ende, es importante aplicar la oxido-reducción (REDOX), para llevar a cabo el equilibrio por medio de la transferencia de calor, teniendo en cuenta que electrodos de carga negativa en el caso del cátodo, y positiva en el caso del ánodo, en el proceso de hidrólisis en el cátodo es donde se lleva a cabo la reducción, es decir, el agente oxidante gana electrones y en el ánodo se produce la oxidación, es decir, el agente reductor pierde electrones (Amórtegui, 2020) ; es importante que ambas tengan lugar al mismo tiempo ya que es de la única forma que se puede dar la oxido-reducción, ya que uno pierde electrones y el otro es quien gana la cantidad de electrones pérdidas de este (Vera, 2007).

Martínez, A. (2024). Evaluación de la eficiencia de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua con electrodos de bajo costo. (Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomás). Repositorio Institucional.

4.1 Marco Conceptual

El calentamiento global es un fenómeno que se refiere al aumento de las temperaturas promedio de la Tierra, causado principalmente por las actividades humanas, especialmente la

quema de combustibles fósiles, este fenómeno tiene el potencial de impactar toda la vida en la Tierra debido a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos (Kai Zeng, 2010).

Una de las principales causas del calentamiento global es la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra, estos gases, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), atrapan el calor y contribuyen al calentamiento global, la producción de estos gases ha aumentado significativamente desde la Revolución Industrial (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

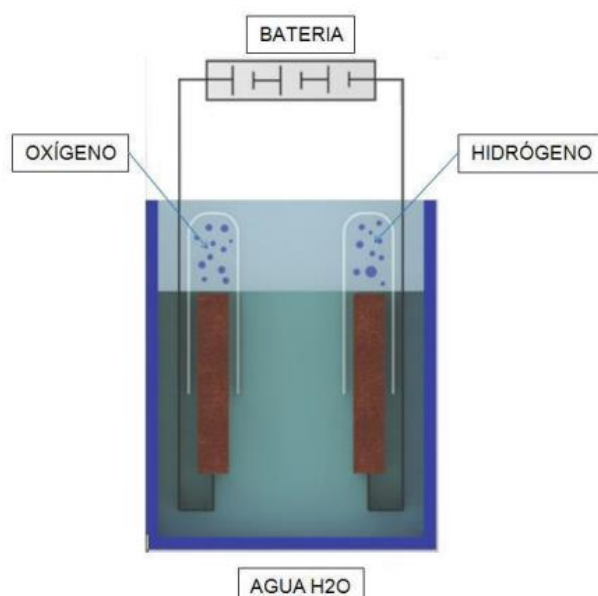
En este contexto, la combustión de hidrógeno emerge como una alternativa prometedora a los combustibles fósiles debido a su alta eficiencia energética y su capacidad para producir agua como único subproducto, sin embargo, existen desafíos técnicos y de seguridad que deben abordarse para su implementación a gran escala (Mohammad Alhuyi Nazari, 2022).

El hidrógeno verde, producido a través de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, es una solución potencial a estos desafíos, este proceso no emite gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un impacto ambiental mínimo; sin embargo, la producción de hidrógeno verde todavía enfrenta desafíos en términos de eficiencia y costos (Gorji, 2023).

La electrólisis del agua es el proceso de descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad (Lee, Lee, Byun, & Lim, 2020) Aunque este proceso es bien conocido, la investigación reciente se ha centrado en mejorar la eficiencia y reducir los costos de la electrólisis del agua (Xin Jin, 2024).

Los electrodos juegan un papel crucial en la electrólisis del agua, ya que facilitan las reacciones de oxidación y reducción (Shubhadeep Pal, 2022). La investigación reciente se ha centrado en el desarrollo de electrodos de bajo costo y alta eficiencia para la electrólisis del agua (Lee, Lee, Byun, & Lim, 2020).

Finalmente, el electrolito soporte es una componente común en los sistemas electroquímicos basados en soluciones en líquidos moleculares, este proporciona una conductividad de solución razonable y, a veces, también establece ciertos equilibrios químicos con la participación de especies reactivas (Ping Lu, 2020).

Figura 3. Montaje de celda para electrólisis del agua.

Nota, Adaptado de (Velásquez & Quiceno, 2013).

4.2 Marco Legal

Tabla 1. Marco legal que rige el enfoque de la investigación.

Norma	Descripción	Concepto
Ley 99 de 1993	Art. 5 Se encuentran las funciones del ministerio, en donde al ministerio del medio ambiente en el numeral 33 le corresponde promover junto con las entidades competentes y afines la realización de programas de sustitución de los recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energía que no sean contaminantes ni degradantes del ambiente	Su enfoque en el desarrollo sostenible y la conservación de los recursos naturales es relevante para la generación de hidrógeno verde, ya que promueve prácticas y tecnologías que minimizan el impacto ambiental y contribuyen a la mitigación del cambio climático.
Ley 1715 de 2014	Establece el marco regulatorio para el desarrollo de las energías renovables no convencionales en Colombia.	Define los lineamientos legales para promover el desarrollo y la implementación de energías renovables en el país.

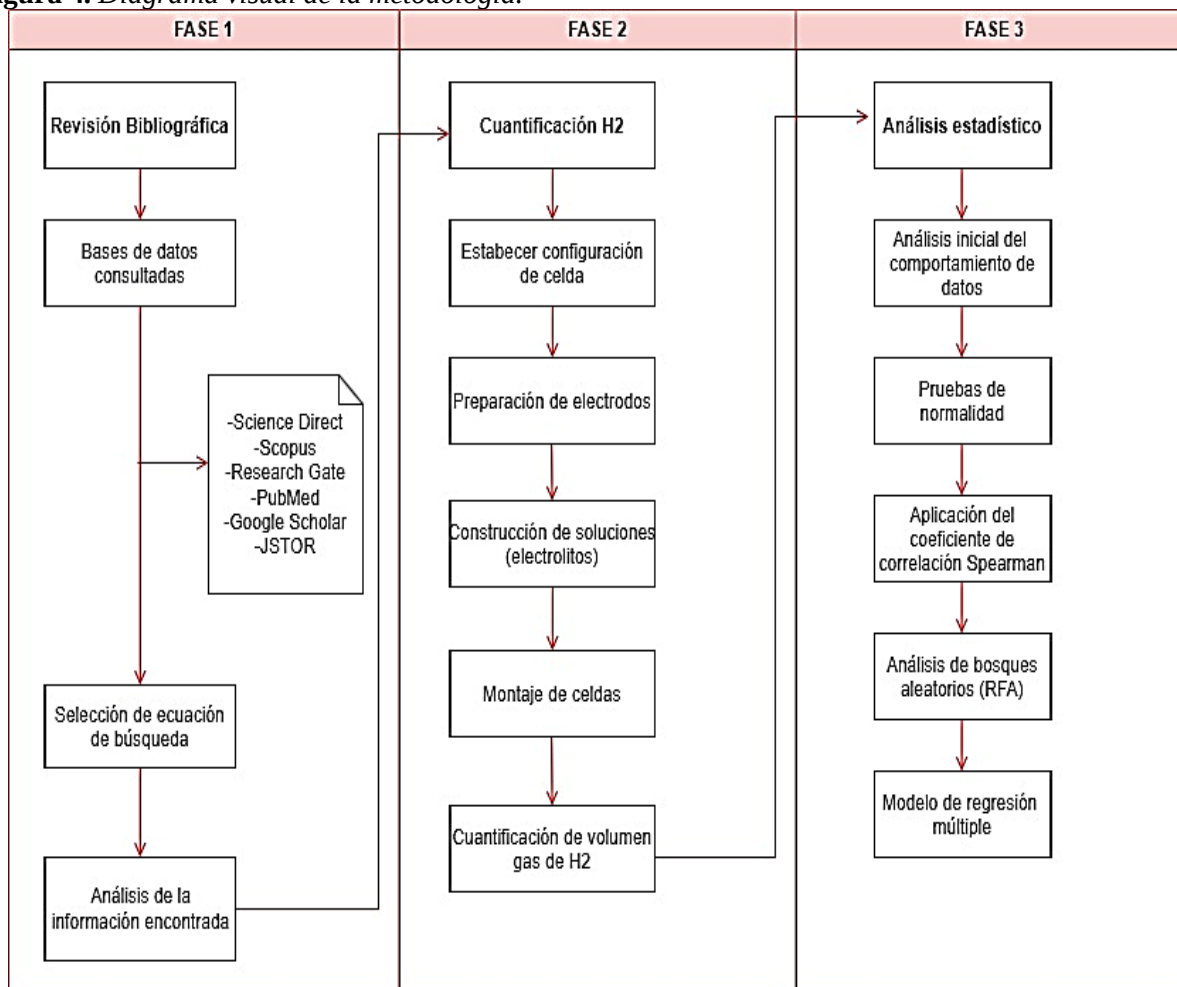
Tabla 2. *Continuación*

Norma	Descripción	Concepto
Decreto 1073 de 2015	Reglamenta la Ley 1715 y establece los procedimientos para la expedición de licencias ambientales.	Detalla los requisitos y procesos para obtener licencias ambientales en proyectos de energías renovables.
Decreto 1465 de 2019	Política de eficiencia energética y uso racional de la energía.	Establece lineamientos para promover la eficiencia energética y el uso racional de la energía en Colombia.
Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.11. Fomento a la innovación. establecerá programas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) para promover la formación de capacidades científicas, técnicas y tecnológicas para la investigación, desarrollo tecnológico, e innovación, conexas con las tecnologías vinculadas a la cadena de valor de la industria del hidrógeno.	Impulsar iniciativas que fortalezcan el conocimiento y la aplicación de la ciencia y la tecnología en el desarrollo de soluciones innovadoras para la producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno verde.

5. Metodología

En el presente estudio, se adoptó una metodología de tipo cuantitativa y exploratoria. Este enfoque permitió una comprensión detallada de los fenómenos bajo investigación, proporcionando una base sólida para el análisis cuantitativo. Los datos fueron recopilados de manera secuencial, esta estrategia secuencial de recopilación de datos aseguró que cada etapa de la investigación se construyera sobre la base de los hallazgos de las etapas anteriores, contribuyendo a la coherencia y la integridad del estudio en su conjunto. En el diagrama visual de la Figura 4, se presenta de manera gráfica la metodología empleada en este estudio, a continuación, se proporciona una explicación detallada de este proceso.

Figura 4. Diagrama visual de la metodología.



Nota. Diagrama visual elaborado por Martínez, A 2024.

5.1 Fase 1: Revisión Bibliográfica.

En la metodología de la revisión bibliográfica sobre la electrolisis del agua para la generación de hidrógeno verde, se desarrolló una ecuación de búsqueda para las bases de datos bibliográficas. Esta ecuación fue diseñada para recuperar los documentos más útiles y relevantes para la investigación y se aplicó en varias bases de datos reconocidas como Science Direct, Scopus, Research Gate, PubMed, Google Scholar y SpringerLink.

La ecuación de búsqueda fue formulada para garantizar que los documentos recuperados fueran de alta relevancia para el tema de investigación. Los términos de búsqueda incluyeron palabras clave y frases relacionadas con la electrólisis del agua y la generación de hidrógeno verde. Una vez recuperados los documentos, se aplicaron herramientas bibliométricas para el análisis de los artículos encontrados permitiendo la evaluación cuantitativa de los artículos basada en varios criterios, como el número de citas, el año de publicación, la relevancia del contenido. Se seleccionó un período de tiempo específico para la búsqueda, lo que permitió un análisis más enfocado y relevante de la información encontrada en la revisión.

En resumen, la metodología de la revisión bibliográfica empleada fue un proceso riguroso y sistemático que permitió la recopilación y el análisis de literatura relevante sobre la electrolisis del agua para la generación de hidrógeno verde. Este enfoque garantizó que la revisión fuera exhaustiva, actualizada y relevante para la investigación.

5.2 Fase 2: Cuantificación de H₂

En la segunda etapa de la metodología implementada, se llevó a cabo la cuantificación del hidrógeno producido por cada una de las configuraciones de celda. Esta fase implicó una serie de actividades detalladas a continuación:

1. **Configuración de la celda:** Basándose en la revisión bibliográfica, se seleccionaron tres electrolitos soporte y cuatro materiales de electrodos. Estos elementos fueron elegidos por su capacidad para combinarse y crear diferentes tipos de configuraciones de celda. La selección dependía de la frecuencia de uso de los electrolitos y de los electrodos en la bibliografía recuperada en la primera fase.

2. ***Preparación de los electrodos:*** A cada electrodo se le sometió a un proceso de limpieza y luego se unió a un cable de cobre para permitir la conducción eléctrica hasta la fuente de poder. Además, se garantizó que no hubiera contacto del electrodo fuera del tubo de recolección del gas para evitar errores en la cuantificación de la producción.
3. ***Construcción de soluciones (electrolito soporte):*** Se prepararon los electrolitos de acuerdo con lo establecido en la configuración de la celda. Cada electrolito se construyó con una concentración de 1 molar y se aforó con agua destilada como solvente.
4. ***Cuantificación del volumen de gas de hidrógeno:*** En el cátodo y en el ánodo se colocaron dos tubos de ensayo boca abajo, sumergidos y completamente llenos del electrolito soporte. De esta manera, cuando el gas se generaba en cada uno de los electrodos, quedaba atrapado en la parte superior del tubo de ensayo y comenzaba a desplazar el electrolito. Por lo tanto, el volumen desplazado es igual al volumen de gas generado. Para esto, solo se necesitó medir el diámetro de cada uno de los tubos de ensayo. Con este dato, se pudo calcular el área de la sección transversal del tubo. Al multiplicar esta área por la altura del gas desplazado, se obtuvo la cantidad de volumen producido. Esta fase metodológica permitió cuantificar de manera precisa la producción de hidrógeno en diferentes configuraciones de celda, proporcionando datos valiosos para el análisis y la optimización del proceso de producción de hidrógeno.

5.3 Fase 3: Análisis estadísticos

La tercera fase de la metodología consistió en un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la fase 2. Este análisis se realizó utilizando el software Spyder con Python 3.9 y comprendió los siguientes procedimientos:

1. ***Análisis inicial del comportamiento de los datos:*** Este análisis preliminar permitió obtener una visión general de los datos, identificar posibles anomalías y entender las tendencias y patrones subyacentes.
2. ***Pruebas de normalidad con boxplot y Shapiro-Wilk:*** Estas pruebas se utilizaron para verificar si los datos seguían una distribución normal, lo cual es un supuesto clave en muchas técnicas estadísticas. El boxplot proporciona una representación visual de la

distribución de los datos, mientras que la prueba de Shapiro-Wilk ofrece una medida cuantitativa de la normalidad (Shapiro, 1965).

3. ***Aplicación del coeficiente de correlación de Spearman:*** Este coeficiente se utilizó para medir la correlación entre las diferentes variables. A diferencia del coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de Spearman no asume una relación lineal entre las variables y es más robusto frente a los valores atípicos (Spearman, 1987).
4. ***Análisis de bosques aleatorios (Random Forests):*** Este método de aprendizaje automático se utilizó para identificar las variables más importantes en la predicción de la producción de hidrógeno. Los bosques aleatorios son particularmente útiles cuando se tienen muchas variables y se quiere evitar el sobreajuste (Breiman, 2001).
5. ***Modelo de regresión múltiple:*** Finalmente, se utilizó un modelo de regresión múltiple para predecir la producción de hidrógeno en función de las diferentes variables. Este modelo permite cuantificar el efecto de cada variable en la producción de hidrógeno, teniendo en cuenta el efecto de las demás variables (Andrew W. Moore, 2006). Cada una de estas pruebas y técnicas estadísticas se seleccionó por su relevancia y utilidad en el análisis de los datos obtenidos en la fase 2, y juntas proporcionaron una comprensión profunda y matizada de los factores que afectan la producción de hidrógeno.

6. Resultados y discusión

6.1 Fase 1: Revisión Bibliográfica.

Para esta revisión bibliográfica se inició construyendo la ecuación de búsqueda para limitar los resultados hasta que los mismos recuperen de las bases de datos los artículos que tuvieran en su título las palabras electrolisis o hidrólisis, y agua, e hidrógeno.

Todas las búsquedas se realizaron en inglés, al ser el lenguaje en el que se encuentran el mayor número de publicaciones en las bases de datos. Finalmente, la ecuación de búsqueda que se usó fue: TITLE ((electrolysis OR hydrolysis) AND (water) AND (hydrogen)).

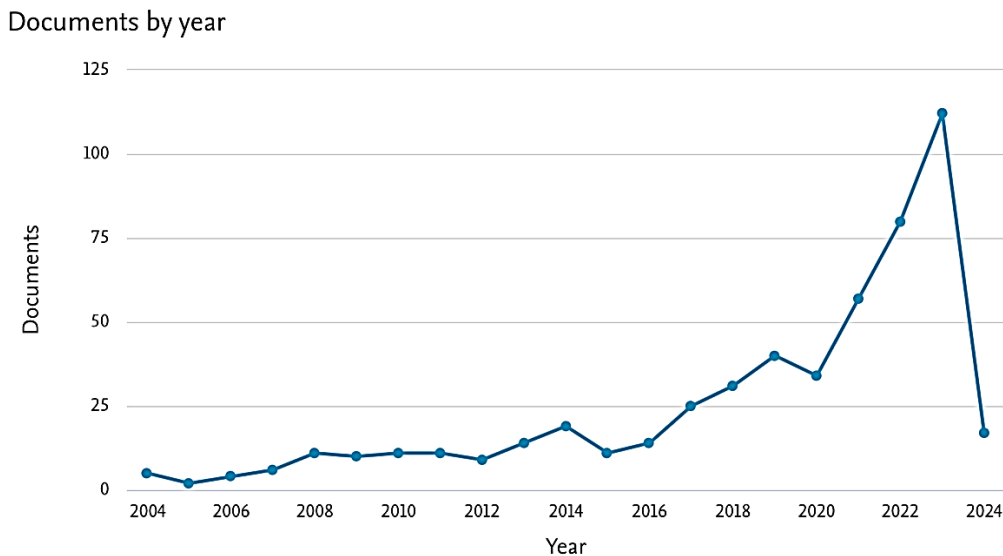
Como se ve en la ecuación anterior, solamente se hace la búsqueda de artículos científicos y artículos de revisión, teniendo como resultados para las bases de datos seleccionadas la siguiente, además se escoge un periodo de tiempo de los 20 últimos años (2004-2024).

Tabla 3. Número de artículos encontrados de acuerdo con la base de datos consultada.

BASE DE DATOS CONSULTADA	NUMERO DE ARTÍCULOS RECUPERADOS
Scopus	523
ScienceDirect	4169
ResearchGate	1010
Google Scholar	995
SpringerLink	840

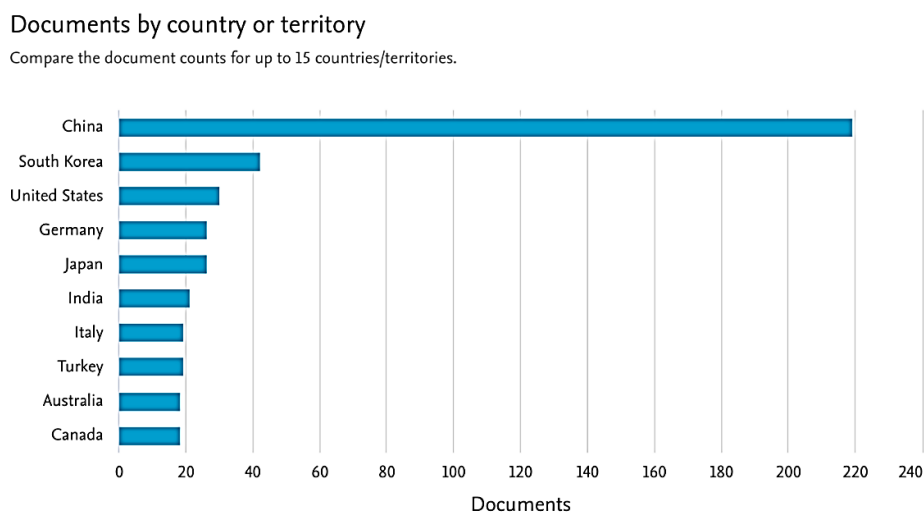
Es importante entender que plataformas como Scopus permiten delimitar mucho más la búsqueda en comparación con otras bases de datos. Algunas de estas bases de datos permiten hacer una organización de los documentos de acuerdo con varios ítems como por ejemplo el número de citas, esto permitió encontrar un artículo importante, que destaca por su número de citas, el artículo (Kai Zeng, 2010), cuenta con 2660 citaciones en Researchgate y 2469 en Scopus.

Finalmente, aprovechando las herramientas de análisis de Scopus, se realizó un análisis de la información, en la cual se pudo apreciar un incremento exponencial en el número de artículos publicados relacionados con el tema, teniendo un punto de inflexión entre el 2014 y 2016, posterior a la cumbre de Rio 2012, como se puede ver en la siguiente imagen.

Figura 5. *Artículos publicados entre 2004-2024 en la plataforma Scopus.*

Adicionalmente, cuando se revisan los documentos por fuente, se encuentra que existe una revista que predomina en sus publicaciones sobre las demás, el International Journal of Hydrogen Energy, que, en el periodo de estudio de 20 años, cuenta con 114 publicaciones, es decir un promedio por año de 6 artículos, con un pico de 18 artículos en el 2023, un CiteScore de 12.1, SJR de 1.318, SNIP 1.423, demostrando la relevancia e importancia de la revista científica.

Un dato también relevante es el número de publicaciones desarrolladas por país, donde, como se puede ver en la siguiente imagen, China tiene 219 publicaciones, superando por más 5 veces el segundo país con mayor número de publicaciones (Corea del Sur, 42), las primeras cinco posiciones las completan Estados Unidos con 30 artículos y, Alemania y Japón, cada uno con 26 documentos. Esto se debe a que China presenta una calidad del aire muy deficiente y buscan la forma de solucionar el impacto ambiental que se ha generado.

Figura 6. *Artículos publicados en cada uno de los países.*

Finalmente, utilizando el criterio de que se construyera una celda de bajo costo, se seleccionaron aquellos artículos que usaran electrodos de fácil acceso y bajo costo, y electrolitos que cumplieran con estos mismos requisitos, estos se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 4. *Selección de electrolitos y electrodos para la investigación.*

Electrolito usado	Electrodos	Referencia
Borohidruro de sodio	Al y Mg	https://doi.org/10.1039/C3RA43136C
Hidróxido de potasio	Óxidos de níquel y cobalto	https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426
Hidróxido de potasio	Acero inoxidable	https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127
Amoniaco	Pt - PtIr	doi: 10.1016/S2095-4956(14)60110-8
Amoniaco	Grafito	doi: 10.1149/1945-7111/ac6bc3

6.2 Fase 2: Cuantificación de H₂

Esta Fase experimental se llevó a cabo en el laboratorio de aguas de la Universidad Santo Tomás de Villavicencio.

Para llevar a cabo la cuantificación del hidrógeno producido por cada una de las configuraciones de celda se realizó lo siguiente:

1. **Configuración de la celda:** De acuerdo con la revisión bibliográfica, se seleccionaron tres electrolitos soporte Hidróxido de potasio (KOH), Hidróxido de sodio (NaOH) y Amoniaco (NH₃), por otro lado, se seleccionaron los cuatro materiales de electrodos como el grafito, acero, aluminio y cobre. Estos elementos fueron elegidos por su capacidad para combinarse

y crear diferentes tipos de configuraciones de celda. La selección dependía de la frecuencia de uso de los electrolitos y de los electrodos en la bibliografía recuperada en la primera fase.

2. **Preparación de los electrodos:** Al obtener los cuatros electrodos se procedió a realizarles una limpieza y aislamiento, para que solo quedara descubierto el electrodo y el extremo final donde se conecta la energía eléctrica.

Figura 7. Fotografía de cada uno de los electrodos utilizados



Nota, De izquierda a derecha (Grafito, Aluminio, Acero, Cobre).

3. **Construcción de soluciones (electrolito soporte):** Se prepararon tres electrolitos soporte: hidróxido de potasio, hidróxido de sodio y amoníaco. Cada electrolito se preparó a una concentración de 1 molar y se diluyó en 500 ml de agua destilada como solvente. Para la solución de hidróxido de potasio, se utilizaron 23 gramos, los cuales se disolvieron en 500 ml de agua destilada. De manera similar, se utilizaron 20 gramos para la solución de hidróxido de sodio. Finalmente, se utilizó una solución de amoníaco al 10% de concentración.

Figura 8. Construcción de las soluciones de cada electrolito soporte.



4. **Cuantificación del volumen de gas de hidrógeno:** Después de montar la configuración, donde se colocaron dos tubos de ensayo boca abajo en el cátodo y el ánodo, sumergidos y completamente llenos del electrolito soporte, se procedió a cuantificar el gas de hidrógeno producido. Esto se logró midiendo el volumen desplazado, el cual es igual al volumen de gas generado. Para realizar esta medición, únicamente fue necesario tomar la medida del diámetro de cada uno de los tubos de ensayo como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 5. Medidas de los tubos de ensayo.

	Medidas
Diámetro exterior	1,6 cm
Espesor	0,2 cm
Diámetro interior	1,2 cm
Área	1,130973355 cm ²

De acuerdo con los datos expuestos anteriormente, se pudo calcular el área de la sección transversal del tubo. Al multiplicar esta área por la altura del gas desplazado, se obtuvo la cantidad de volumen producido como se evidencia a continuación.

Tabla 6. Cuantificación de producción de H₂ con diferentes configuraciones de celda.

	Tiempo (s)	Corriente (mA)	Voltaje (V)	Volumen O (cm ³)	Volumen H2 (cm ³)	Electrolito
Grafito/Grafito	112,00	240	31,1	0,90	3,51	KOH
Grafito/acero	136,00	250	31,1	2,49	3,85	KOH
Acero/Grafito	140,00	250	31,1	1,81	3,28	KOH
Acero/Acero	310,00	290	31,1	1,02	2,95	KOH
Aluminio/Cobre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KOH
Grafito/Grafito	188	300	31,1	2,15	6,45	NaOH
Grafito/acero	133	240	31,1	1,81	3,85	NaOH
Acero/Grafito	143	250	31,1	2,04	4,86	NaOH
Acero/Acero	141	260	31,1	2,15	4,41	NaOH
Aluminio/Cobre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NaOH
Grafito/Grafito	0	0	0	0	0	Amoniaco
Grafito/acero	0	0	0	0	0	Amoniaco
Acero/Grafito	480	0	31,1	0	0	Amoniaco
Acero/Acero	360	0	31,1	0	0	Amoniaco
Aluminio/Cobre	0	0	0	0	0	Amoniaco

De acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio de aguas de la Universidad Santo Tomás de Villavencio, los electrodos de Grafito/Grafito se destacaron por su capacidad para generar una producción significativa de hidrógeno, superando incluso la producción de oxígeno en todas las pruebas. Se observó un aumento notorio en la producción de hidrógeno cuando se emplearon electrolitos como hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), siendo especialmente eficiente la presencia de KOH. Por otro lado, la ausencia de producción de gas en presencia de amoníaco (NH_3) sugirió una influencia significativa del electrolito en la eficiencia de producción de hidrógeno con este tipo de electrodos. Por otro lado, los electrodos de Grafito/Acero también mostraron una producción considerable de hidrógeno en todas las pruebas, con una ligera mejora cuando se utilizó KOH y NaOH en comparación con la combinación de acero con grafito.

Los electrodos de Acero/Acero mostraron una producción de hidrógeno menor en comparación con otras combinaciones de electrodos, aunque siguió siendo mayor que la producción de oxígeno en todas las pruebas. Aunque su eficiencia pudiera haber sido relativamente menor que otras configuraciones de electrodos, aún lograron una producción significativa de hidrógeno, lo que sugirió su utilidad en el proceso de electrólisis del agua.

Finalmente, para los electrodos de Aluminio/Cobre, no se observó ninguna producción de gas en ninguna de las pruebas realizadas. Esto sugirió que esta combinación de electrodos no fue efectiva para la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua en las condiciones experimentales utilizadas.

6.3 Fase 3: Análisis estadísticos

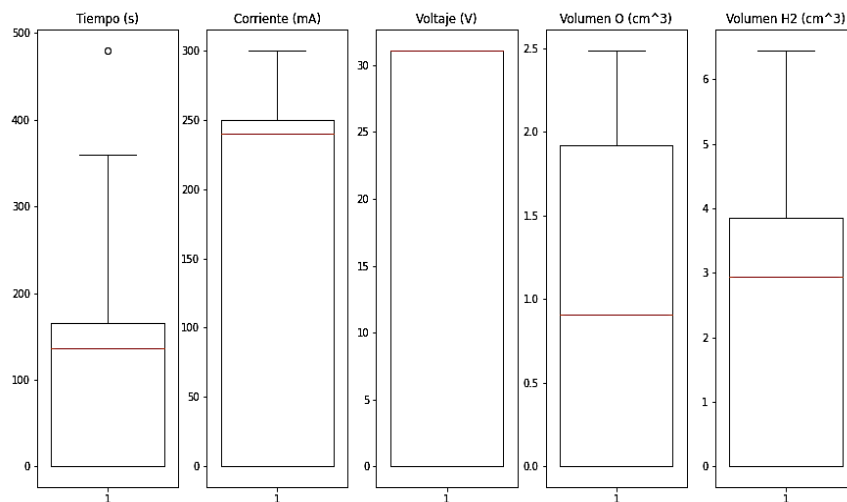
1. Análisis inicial del comportamiento de los datos

En esta etapa para poder realizar el análisis se realizó una categorización numérica a las variables categóricas de la siguiente forma:

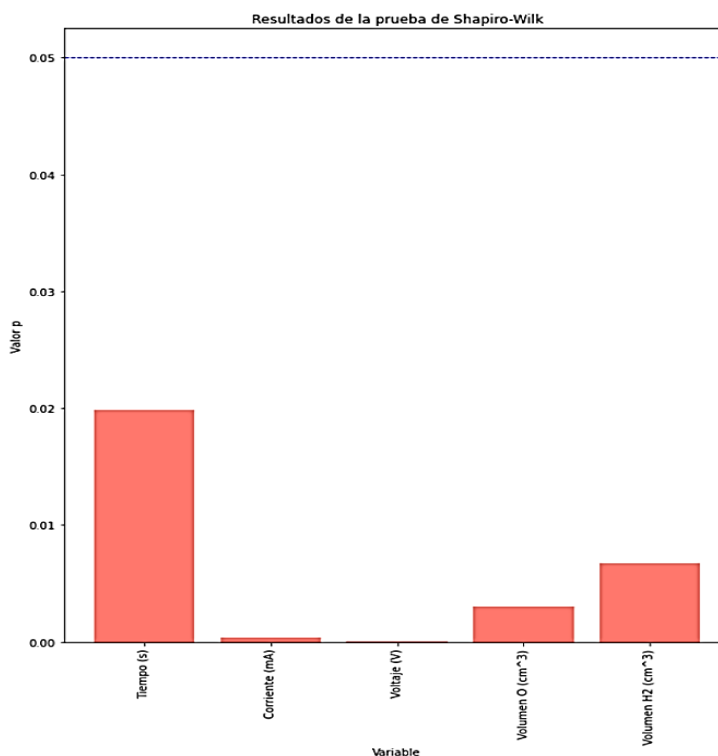
- Electrolito: KOH (0), NaOH (1), Amoniaco (2)
- Electrodos: Grafito (0), Acero (1), Aluminio (2), y Cobre (3)

2. Pruebas de normalidad con boxplot y Shapiro-Wilk:

Figura 9 Boxplot



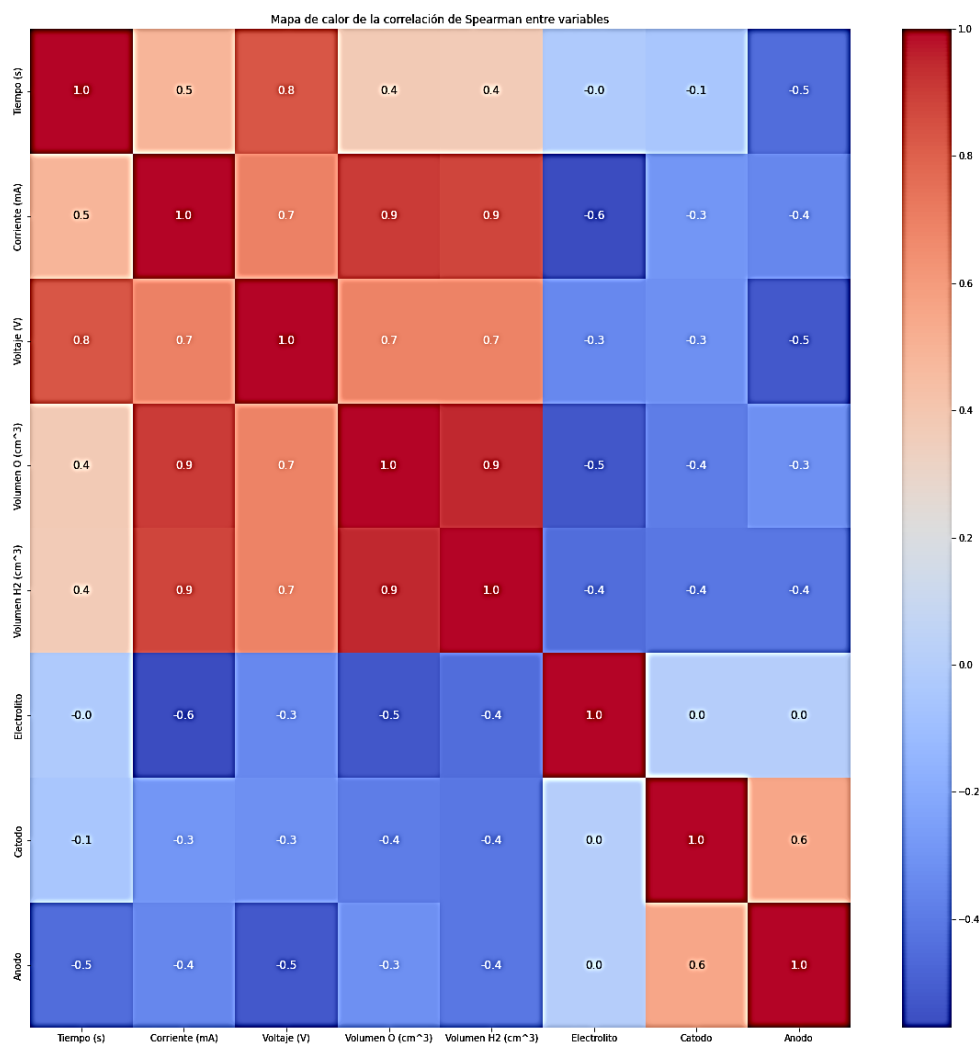
En base a los boxplots, se observa que la mayoría de las mediciones de tiempo se encuentran entre 100s y 300s, con un outlier en 500 s. La corriente muestra una distribución más uniforme, variando entre 50mA y 250mA. El voltaje presenta una distribución estrecha, centrada alrededor de 25V a 30V. El volumen de oxígeno (O) varía desde cerca de 0 cm³ hasta alrededor de 2.5 cm³, mientras que la mayoría de las mediciones del volumen de hidrógeno (H₂) se encuentran entre 2 cm³ y 5 cm³. Estos resultados sugieren variaciones significativas en las mediciones de estas variables, además que en ninguno de los parámetros se observa que tengan cercanía la media, la moda y la mediana, por ende, se podría dar la hipótesis de que ninguna de estas variables se comporta de forma normal.

Figura 10 *Prueba de Shapiro-Wilk*

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba de Shapiro-Wilk, se puede inferir que las variables en estudio, a saber, “Tiempo (s)”, “Concentración (Mol)”, “Volumen de solución (ml)” y “Volumen muestra (ml)”, no siguen una distribución normal. Esto se evidencia en los valores p obtenidos, todos los cuales son menores que el umbral de significancia de 0.05. La normalidad de los datos es una suposición fundamental en muchas técnicas estadísticas paramétricas. Cuando esta suposición no se cumple, como en este caso, se vuelve inapropiado aplicar dichas técnicas. Por lo tanto, en vista de estos hallazgos, se hace necesario recurrir a métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de estas variables. Los métodos no paramétricos no hacen suposiciones fuertes sobre la distribución de los datos y, por lo tanto, son más robustos frente a las violaciones de las suposiciones de normalidad. En conclusión, los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk indican la necesidad de aplicar métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de todas las variables en estudio.

3. Aplicación del coeficiente de correlación de Spearman:

Figura 11 Mapa de calor de correlación de Spearman

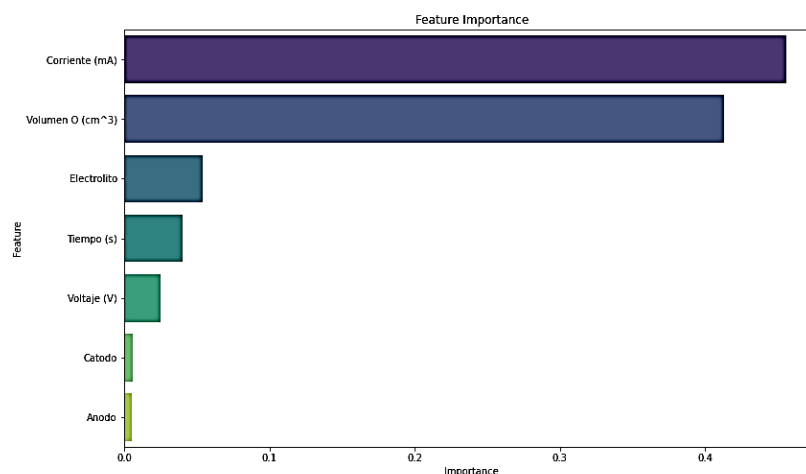


El mapa de calor presentado ilustra la correlación de los coeficientes de Spearman entre varias variables. Los coeficientes de Spearman, que varían de -1 a 1, miden la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables. Un valor de 1 indica una fuerte correlación positiva, -1 una fuerte correlación negativa, y 0 ninguna correlación. En este caso, se observa que la variable corriente tiene una fuerte correlación negativa con electrolito, lo que podría indicar que a los electrolitos tienen una influencia importante sobre la corriente que se produce en el circuito. Por otro lado, se tiene una correlación bastante fuerte entre la corriente y el Volumen de oxígeno que se produce, esto se puede explicar lógicamente debido a que la producción de oxígeno es la

reacción limitante, puesto que la concentración de los iones de oxígeno es la mitad de los iones de hidrógeno, por eso muchas de las investigaciones aquí citadas se centran en mejorar la reacción de generación de oxígeno, y entre más aumente la corriente, lo lógico es que esta producción de oxígeno también aumente e indirectamente mejore la producción de hidrógeno. Este análisis proporciona una visión valiosa de las relaciones entre las variables, lo que puede ser útil para futuras investigaciones y análisis de datos. Sin embargo, es importante recordar que la correlación no implica causalidad y que se deben realizar más investigaciones para determinar las relaciones causales entre estas variables.

4. Análisis de bosques aleatorios (Random Forests):

Figura 12 Feature Importance



Este modelo se caracteriza por dos parámetros clave: el número de estimadores y la semilla aleatoria. En este caso, se han utilizado 10,000 estimadores, lo que significa que el modelo de Bosques Aleatorios está compuesto por 10,000 árboles de decisión individuales. La semilla aleatoria se establece en 42 para garantizar la reproducibilidad de los resultados. Tras ajustar el modelo a los datos, se evalúa la importancia de las características, que es una medida de cuánto contribuye cada característica a las predicciones del modelo. Según los resultados visualizados en el gráfico de barras, la característica “Corriente (mA)” tiene una importancia significativamente mayor en comparación con las otras características. Esto sugiere que “Corriente (mA)” es un predictor crítico para el modelo y juega un papel crucial en las predicciones del volumen de H₂.

Esto concuerda con los resultados obtenidos con el coeficiente de correlación de Spearman, en donde se vuelve crucial mejorar el valor de la corriente dentro de la celda electrolítica.

5. Modelo de regresión múltiple

Figura 13 Robust linear model regresión results

Robust linear Model Regression Results						
Dep. Variable:	Volumen H2 (cm^3)		No. Observations:	15		
Model:	RLM		Df Residuals:	10		
Method:	IRLS		Df Model:	4		
Norm:	HuberT					
Scale Est.:	mad					
Cov Type:	H1					
Date:	Mon, 12 Feb 2024					
Time:	00:02:07					
No. Iterations:	19					
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
const	4.6828	1.174	3.988	0.000	2.381	6.985
Tiempo (s)	-0.0005	0.004	-0.118	0.906	-0.009	0.008
Electrolito	-1.3503	0.609	-2.218	0.027	-2.543	-0.157
Catodo	-0.3873	1.065	-0.364	0.716	-2.475	1.700
Anodo	-0.7954	0.818	-0.972	0.331	-2.398	0.808

El modelo en cuestión incluye cuatro predictores: "Tiempo (s)", "Electrolito", "Cátodo" y "Ánodo". Cada coeficiente asociado a estos predictores representa el cambio anticipado en la variable dependiente, "Volumen de Hidrógeno (cm³)", por cada unidad de cambio en el predictor, manteniendo constantes todas las demás variables.

Al observar los coeficientes, se evidencia que "Electrolito" posee un coeficiente negativo significativo de -1.3503, lo cual indica que a medida que el valor de "Electrolito" aumenta, se espera una disminución en el "Volumen de Hidrógeno (cm³)", manteniendo constantes todas las demás variables. El valor p asociado con "Electrolito" es menor que 0.05, lo que señala que este efecto es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95%. Teniendo en cuenta que la variable electrolito es una variable categórica, y que el menor número (0) representa el KOH, se podría concluir entonces que, en términos del electrolito, el hidróxido de potasio es el que presenta una mejor producción o evolución de la generación de hidrógeno gaseoso, para estos experimentos, sin embargo, deberían complementarse este conjunto de datos para mejorar los resultados del modelo.

Por otro lado, las variables "Tiempo (s)", "Cátodo" y "Ánodo" muestran valores p superiores a 0.05, lo que sugiere que no son estadísticamente significativas en el modelo al nivel de confianza del 95%. Esto implica que no existe evidencia suficiente para afirmar que estas variables tienen un efecto sobre el "Volumen de Hidrógeno (cm^3)".

7. Impacto social y humanístico

El presente estudio sobre la eficiencia de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua con electrodos de bajo costo conlleva un impacto social y humanístico significativo al promover una fuente de energía más limpia y sostenible. Al evaluar y potencialmente mejorar la eficiencia de este proceso, se podría facilitar el acceso a una energía más asequible y amigable con el medio ambiente para comunidades diversas, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y mejorando la calidad de vida de las personas. Además, al fomentar el desarrollo de tecnologías más accesibles y eficientes, se abre la puerta a oportunidades de empleo y crecimiento económico en el sector de las energías renovables, impulsando así el progreso social y el bienestar humano en general.

8. Conclusiones

- ✓ La evaluación de la literatura referente a la eficiencia de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con electrodos de bajo costo demuestra la viabilidad de esta tecnología como una opción prometedora para la generación sostenible de hidrógeno.
- ✓ La revisión bibliográfica reveló que las configuraciones de celda más comúnmente utilizadas incluyen electrodos de grafito y acero con electrolitos como hidróxido de potasio y sodio, proporcionando una base sólida para la experimentación.
- ✓ Los resultados experimentales mostraron que las configuraciones de celda con electrodos de grafito y electrolito de hidróxido de potasio (KOH) produjeron la mayor cantidad de hidrógeno verde, lo que indica que estas combinaciones son altamente efectivas para la generación de hidrógeno.
- ✓ El análisis estadístico reveló que la corriente eléctrica fue la variable más influyente en la producción de hidrógeno, seguida por el tipo de electrolito utilizado. Esto resalta la importancia de controlar y optimizar estos parámetros para mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis.

9. Recomendaciones

- ✓ Es crucial revisar y ajustar las condiciones experimentales, como la concentración de electrolitos, la temperatura y la corriente eléctrica aplicada, para maximizar la eficiencia de producción de hidrógeno. Se podría realizar un estudio más detallado de cómo estas variables afectan la producción de hidrógeno en combinación con diferentes tipos de electrodos.
- ✓ Es importante considerar la exploración de otros materiales de electrodos además de los utilizados en el estudio actual, como compuestos de carbono, metales o materiales compuestos. Esto podría ampliar las opciones disponibles y potencialmente mejorar la eficiencia de producción de hidrógeno.
- ✓ Los modelos estadísticos y de machine learning tienden a tener una mejor curva de aprendizaje cuando se tiene un mayor número de datos, por esto es importante seguir haciendo más pruebas, con más combinaciones de electrodos, electrolitos y tiempos de ensayo.

10. Referencias Bibliográficas

- Amórtegui, J. J. (2020). *La electrólisis del agua como propuesta de trabajo práctico para la promoción del uso de conceptos asociados a la conservación de la energía en estudiantes de ciclo V*. [Tesis de posgrado, Pontifica Universidad Javeriana], Repositorio Institucional. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52161/Tesis.pdf?sequence=1&isA>
- Andrew W. Moore, B. A.-K. (2006). CHAPTER 15 - Combining Multiple Signals for Biosurveillance. (A. W. Michael M. Wagner, Ed.) *Academic Press*, 235-242. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-012369378-5/50017-X>
- Ballesteros, H. O., & Aristizabal, G. E. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. <http://ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Breiman, L. (2001). Classification and Regression by randomForest. *Machine Learning*, 45, 18-22. <https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/RN-2002-022.pdf>
- Chang, R. (2002). *Química General* (7ma ed.). <https://sacaba.gob.bo/images/wsacaba/pdf/libros/quimica/Chang-QuimicaGeneral7thedicion.pdf>
- Gorji, S. A. (June de 2023). Challenges and opportunities in green hydrogen supply chain through metaheuristic optimization. *Journal of Computational desingn and engineering*, 10, Issue e, 1143-1157. doi:<https://doi.org/10.1093/jcde/qwad043>
- Guañuna, J. A. (2016). *Modelado, simulación y optimización de la producción de hidrógeno en un electrolizador a partir de vapor sobrecalentado de agua mediante la herramienta labview de national instuments*. bibdigital.epn.edu.ec. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16954/1/CD-7541.pdf>
- IEA, I. E. (2019). *World Energy Outlook*. bibdigital.epn.edu.ec. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA, I. E. (2023). *Tracking Clean Energy Progress 2023*. bibdigital.epn.edu.ec. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>

- Kai Zeng, D. Z. (June de 2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*. 36(3), 307-326. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
- Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production,. *Energy Reports*, 8, 13793-13813. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>
- Lee, H., Lee, B., Byun, M., & Lim, H. (15 de Noviembre de 2020). Economic and environmental analysis for PEM water electrolysis based on replacement moment and renewable electricity resources. *Energy Conversion and Management*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113477>
- Marcelo Carmo, D. L. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 4901-4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>.
- Meiling Yue, H. L. (August de 2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>.
- Ministerio de Minas y Energía. (7 de Febrero de 2024). *Minenergía establece lineamientos de política pública para viabilizar la entrada de proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)*. [minenergia.gov.co. https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/minenerg%C3%ADa-establece-lineamientos-de-pol%C3%ADtica-p%C3%BAblica-para-viabilizar-la-entrada-de-proyectos-de-fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/#:~:text=El%20Minister](https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/minenerg%C3%ADa-establece-lineamientos-de-pol%C3%ADtica-p%C3%BAblica-para-viabilizar-la-entrada-de-proyectos-de-fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/#:~:text=El%20Minister)
- Mohammad Alhuyi Nazari, M. F. (2022). Utilization of hydrogen in gas turbines: a comprehensive review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 513-519. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac025>
- Muñoz-Fernández, J. A.-M.-C. (30 de Junio de 2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. . *Fuentes, el reventón energético.*, 20, 57-72. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006>

- Niu, F., & Huang, X. (July de 2014). Hydrogen Generation from Hydrolysis of Ball-Milled Al/C Composite Materials: Effects of Processing Parameters. *Chemical Physics Letters*, 2, 593–597. <https://doi/10.1002/ente.201402009>.
- Ping Lu, L. Q. (20 de June de 2020). The effect of additive supporting electrolytes on transport and electrochemical properties of deep eutectic solvent (DES) applied in non-aqueous redox flow batteries. *Ionics*, 26, 5029-5036. <https://doi.org/10.1007/s11581-020-03652-z>
- Polanco, J. R. (2018). *Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción*. [Tesis de pregrado, Universidad de Valladolid], Valladolid. Repositorio Institucional. [https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31495/TFG-I%02929.pdf?sequence=1&isAllowed=](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31495/TFG-I%02929.pdf?sequence=1&isAllowed=1)
- Shapiro, S. S. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* 52, 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Shubhadeep Pal, X. Z. (June de 2022). Materials, electrodes and electrolytes advances for next-generation lithium-based anode-free batteries. *Oxford Open Materials Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itac005>
- Spearman, C. (1987). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *he American Journal of Psychology*, 100(3/4), 441-471. <https://doi.org/10.2307/1422689>
- Velásquez, J. D., & Quiceno, J. F. (2013). *Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis*. [Tesis de pregrado, Universidad tecnológica de Pereira], Repositorio Institucional. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb85c231-3998-4139-8555-071d991aa733/content>
- Vera, M. I. (2007). *Química General*. [exa.unne.edu.ar. https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica_2007.pdf](https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica_2007.pdf)
- Vincent, I., & Bessarabov, D. (January de 2018). Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, parte2, 1690-1704. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>.
- Xin Jin, S. Y. (February de 2024). Exploring commercial water electrolyser systems: a data-based analysis of product characteristics. *Clean Energy*, 8(1), 126-133. doi:<https://doi.org/10.1093/ce/zkad072>