TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

"DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ELECTRÓLISIS EMPLEANDO PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE"

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Elias Cano Del Castillo (0009-0006-3444-9211)

Asesor:

Olga Vadimovna Kostenko De Caparo (0009-0006-5143-3756)

Lima – Perú

2025

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 24 de octubre del 2025

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Carlos Alberto Satalaya Rengifo
Miembro: Mg. Michael Omar Padilla García
Miembro: Mg. Roberts Ríos Pereyra

Se reúnen para evaluar la tesis, con código de proyecto PRE-11-2025-00009, titulada :

"DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ELECTRÓLISIS EMPLEANDO PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE"

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **Elias Cano Del Castillo**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorado por: Mg. Olga Vadimovna Kostenko

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del tesista de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple ( ) calificar a:

Tesista: Elias Cano Del Castillo			Nota (en letras): Quince (15)
Aprobado (X)	Aprobado - Muy buena ( )	Aprobado - Sobresaliente ( )	Desaprobado ( )

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Mg. Carlos Alberto Satalaya Rengifo
Presidente



Mg. Michael Omar Padilla García
Miembro 1



Mg. Roberts Rios Pereyra
Miembro 2



Mg. Olga Vadimovna Kostenko
Asesor

ANEXO: FORMATO DE DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS / TRABAJO DE INVESTIGACIÓN[1]

Lima, 04 de noviembre del 2025

Señor,
Dr. Carlos Zavalaga Reyes

Director General de Investigación, Desarrollo e Innovación
Universidad Científica del Sur
Presente. –

De nuestra consideración,

Yo: Elías Cano Del Castillo, egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, en conjunto con la asesora de tesis Olga Kostenko De Caparo, declaramos que este informe final de tesis titulado "Determinación de la eficiencia de la electrólisis empleando paneles solares fotovoltaicos para la generación de hidrógeno verde", sustentado para obtener el título de Ingeniero Ambiental es original.

Es decir, no contiene plagio parcial ni total, cuando se utilizó información de fuentes externas se reconoció la autoría mediante la adecuada citación y los resultados obtenidos son producto entero de mi investigación y no han sido falseados ni fabricados. Todo esto en cumplimiento del Código de ética en la investigación, Reglamento del Comité de Integridad Científica, Reglamento de Propiedad Intelectual, Normas y procedimientos de los trabajos de investigación para la obtención de títulos profesionales y grados académicos [2], que afirmamos conocer en su totalidad.

Por ello, en caso de identificarse alguna situación de plagio, falsificación o fabricación de resultados, nos allanamos al proceso de investigación que establezca la Universidad y las posibles sanciones que pudieran surgir.

Firmamos en conformidad con lo declarado,



Firma tesista
DNI: 73866736



Firma del asesor de tesis
DNI: 10796382

[1] En conformidad con la Resolución del Consejo Directivo N° 084-2022-SUNEDU/CD
[2] Los documentos están en: https://investigacion.cientifica.edu.pe/reglamentos/

INFORME DE REVISIÓN DE ORIGINALIDAD

Título del documento evaluado. Determinación de la eficiencia de la electrólisis empleando paneles solares fotovoltaicos para la generación de hidrógeno verde

Autores. Elias Cano Del Castillo

Mecanismo de revisión de originalidad. Evaluación con Turnitin (ID 2805616166).

Código de registro. PRE-11-2025-00009

Resultado de la evaluación. 3%

Revisado por. Herlyss Leonel Sovero Navarro.

Comentarios sobre la revisión. Filtros usados: excluir fuentes de menos de 12 palabras.



Determinación de la eficiencia

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%	2%	0%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Señor de Sipan Trabajo del estudiante	<1%
2	rpow.es Fuente de Internet	<1%
3	campus.almagro.ort.edu.ar Fuente de Internet	<1%
4	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
5	eciencia.urjc.es Fuente de Internet	<1%
6	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
7	dokumen.pub Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A mis padres, por su ejemplo incansable de trabajo, constancia y amor. Su esfuerzo ha sido la base sobre la cual he construido cada uno de mis logros. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudé.

A mi hermana, por acompañarme con ternura y complicidad a lo largo de este camino. Tu apoyo silencioso y tu presencia han significado más de lo que las palabras pueden expresar.

A mi abuela, por ser memoria viva, raíz y refugio. Su sabiduría, generosidad y fe han sido una fuente permanente de inspiración.

Y a Macarena, mi fiel compañera, cuya compañía noble y amor incondicional estuvieron presentes en cada jornada de estudio, en cada noche larga y en cada momento de soledad. Esta tesis también lleva su huella.

A todos ustedes, dedico este esfuerzo con gratitud profunda y cariño eterno.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis representa mucho más que un requisito académico: es el resultado de años de esfuerzo, emprendimiento, sacrificio y amor compartido. No habría sido posible sin la presencia constante y el apoyo de personas fundamentales en mi vida.

A mi padre, un ingeniero perseverante y dedicado, cuyo ejemplo de disciplina y compromiso profesional ha sido una guía constante para mí. Gracias por mostrarme, con hechos, el valor del esfuerzo bien orientado.

A mi madre, quien ha estado a mi lado desde los primeros años escolares, luchando incansablemente por brindarme una educación de calidad. Tu apoyo incondicional y tu fe en mí han sido la base sobre la que he podido construir este camino.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

A mi hermana, que desde lejos supo estar cerca, acompañándome con consejos, palabras de aliento y recordándome siempre que cada día es una nueva oportunidad para dar lo mejor de uno mismo.

A mi abuela, que en paz descanse, por sus sabios consejos, su amor entrañable y por haber sido siempre un faro de tranquilidad y claridad en los momentos más difíciles. Su memoria me acompaña en este logro.

A Macarena, mi fiel compañera, que estuvo conmigo desde el inicio hasta el final de mi carrera. Me acompañó en cada tarea, cada proyecto, en cada jornada de estudio hasta altas horas de la noche, siempre a mi lado. Su presencia silenciosa pero constante me dio fortaleza cuando más la necesitaba.

A José, mi mentor, que en paz descanse. Me enseñó todo lo que sé sobre el hidrógeno y me inspiró a ir más allá de lo convencional. Gracias a su guía y a nuestro equipo, pudimos llegar a muchas personas y sembrar un legado que hoy sigue creciendo. Su pasión, su visión y su generosidad intelectual me marcaron para siempre.

A todos ellos, mi más profunda gratitud. Esta tesis no es solo un logro académico, sino el reflejo de una historia compartida de aprendizajes, valores y esperanza.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA 3
AGRADECIMIENTOS 4
ÍNDICE GENERAL 5
ÍNDICE DE FIGURAS 7
ÍNDICE DE TABLAS 9
RESUMEN 10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
II. MARCO TEÓRICO 16
2.1. Transición energética y energías renovables 16
2.2. El hidrógeno como vector energético 19
2.3. Electrólisis del agua 19
2.4. Uso de paneles solares fotovoltaicos 22
2.5. Electrolitos y conductividad eléctrica 22
2.6. Innovación en diseño de sistemas de electrólisis 29
III. OBJETIVOS E HIPOTESIS 31
3.1. Objetivos ***33***
3.2. Hipótesis general ***34***
IV. METODOLOGÍA 36
4.1. Área de investigación 38
4.2. Variables de investigación ***39***
4.3. Diseño de la investigación ***40***
4.4. Muestreo ***42***
4.5. Recolección de datos ***44***

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

4.5.1. Evaluación de la eficiencia del cambio de celda mediante los niveles de medición de amperaje y voltaje mediante un ajuste del equipo……46

4.5.2. Evaluación de electrolitos alternativos para incrementar la conductividad…….47

4.5.3. Elección de la mejor fuente de agua para la generación de electrólisis…….48

4.5.4. Determinación de la eficiencia de electrólisis……49

4.5.5. Medición de amperaje y voltaje del equipo con una celda húmeda y seca……..49

4.5.6. Determinar elementos sustitutorios para aumentar la conductividad eléctrica……..49

V. RESULTADOS 50

5.1. Eficiencia del proceso de electrólisis con celdas húmedas y celdas secas……50

5.2. Producción de hidrógeno según tipo de celda……51

5.3. Evaluación de electrolitos alternativos y su conductividad……52

5.4. Análisis del tipo de agua utilizada en la electrólisis……53

5.5 Comportamiento eléctrico y térmico del sistema optimizado……54

VI. DISCUSIÓN……55

VII. CONCLUSIONES……56

VIII. RECOMENDACIONES……57

IX. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS……58

X. ANEXOS……59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del productor de hidrógeno verde modificado……10
Figura 2. Diagrama del primer equipo productor de hidrógeno patentado……11
Figura 3. Display electrónico del productor de hidrógeno verde modificado……11
Figura 4. Dispositivo optimizado del productor de hidrógeno verde modificado……11

Figura 5. Fórmula utilizada para el cálculo de la eficiencia de electrólisis……12
Figura 6. Resultados del análisis estadístico t de Student para la producción de hidrógeno……13
Figura 7. Comparación gráfica del volumen de hidrógeno generado por tipo de celda……14

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tecnologías de electrólisis 15

Tabla 2. Descripción de las variables de investigación 20

Tabla 3. Comparación de la eficiencia de voltaje y la eficiencia energética global en celdas húmedas y secas 23

Tabla 4. Comparación de eficiencia entre celda húmeda y celda seca 24

Tabla 5. Conductividad eléctrica de diferentes electrolitos 32

Tabla 6. Comparación de tipos de agua para electrólisis 37

Tabla 7. Medición de voltaje, amperaje y temperatura en operación.....42

Tabla 8. Matriz de consistencia 48

RESUMEN

La presente investigación evaluó la eficiencia de la electrólisis para la generación de hidrógeno verde utilizando paneles solares fotovoltaicos como fuente de energía renovable. Se diseñó y optimizó un generador de hidrógeno con celdas secas de acero inoxidable, en contraste con un modelo anterior basado en celdas húmedas. La eficiencia del sistema se calculó mediante la relación entre el voltaje teórico mínimo (1.48 V) y el voltaje real aplicado en ambas configuraciones, obteniéndose un rendimiento de 92.5% para la celda seca frente al 74.0% de la celda húmeda.

Asimismo, se evaluaron distintos electrolitos, confirmándose que el NaOH presenta la mayor conductividad (183.2 mS/cm), aunque se propusieron alternativas menos corrosivas como el citrato de sodio y el ácido acético diluido. También se confirmó que el agua destilada es la fuente más adecuada para evitar residuos y prolongar la vida útil del equipo. Finalmente, la implementación del sistema optimizado demostró una producción de hidrógeno 24.6% superior respecto al modelo convencional, validando

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

así la viabilidad técnica y ambiental del uso de celdas secas y energía solar para una producción más sostenible de hidrógeno verde en el contexto peruano.

Palabras clave: hidrógeno verde, electrólisis, energía solar, celdas secas, eficiencia energética.

ABSTRACT

This research evaluated the efficiency of electrolysis for green hydrogen production using photovoltaic solar panels as a renewable energy source. A hydrogen generator with optimized dry stainless-steel cells was designed and compared to a previous model using wet cells. System efficiency was calculated based on the ratio between the theoretical minimum voltage (1.48 V) and the actual operating voltage in both configurations, resulting in an efficiency of 92.5% for the dry cell versus 74.0% for the wet cell. Various electrolytes were assessed, confirming that NaOH provided the highest conductivity (183.2 mS/cm), though less corrosive alternatives such as sodium citrate and diluted acetic acid were proposed. Distilled water was also confirmed to be the most suitable water source, as it avoids mineral residue and extends equipment lifespan. The optimized system achieved 24.6% greater hydrogen production compared to the conventional model, validating the technical and environmental viability of dry cells and solar energy for more sustainable green hydrogen production in the Peruvian context.

Keywords: green hydrogen, electrolysis, solar energy, dry cells, energy efficiency.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La transición energética global impulsa la necesidad de tecnologías que reduzcan emisiones de carbono y diversifiquen fuentes de energía. En este marco, el hidrógeno verde se presenta como un vector energético estratégico para alcanzar la neutralidad climática, ya que puede producirse a partir de energías renovables y utilizarse en transporte, industria y almacenamiento energético (International Energy Agency, 2022).

En el Perú, a pesar del alto potencial solar de regiones como Piura, aún no se han desarrollado proyectos piloto de electrólisis que permitan evaluar su rendimiento técnico y económico en condiciones locales. Esta ausencia de estudios limita la comprensión sobre la viabilidad del hidrógeno verde como alternativa energética en el país (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

De manera específica, la problemática se centra en la eficiencia de los generadores de celda seca. Aunque estos sistemas ofrecen menores pérdidas por resistencia interna en comparación con las celdas húmedas, investigaciones recientes muestran que su desempeño real depende de factores como materiales de electrodos, conductividad de electrolitos y estabilidad térmica, que aún presentan ineficiencias significativas. En la actualidad, la eficiencia energética global de las celdas secas comerciales oscila entre 60 % y 70 %, con pérdidas por sobrepotenciales que pueden alcanzar los 0.4 V, lo cual limita su competitividad frente a otras tecnologías (Rahman et al., 2022).

En el caso de los generadores de celda seca, la urgencia de su optimización radica en que, a pesar de su menor resistencia interna frente a las celdas húmedas, aún presentan limitaciones técnicas significativas. Se estima que hasta un 30 % de la energía suministrada se pierde en forma de calor debido a la ineficiencia de los materiales de electrodos y a la resistencia del electrolito, lo que repercute directamente en el costo de producción del hidrógeno verde y en su viabilidad económica a gran escala (Martinez, 2022).

Uno de los retos actuales de la transición energética es superar las limitaciones relacionadas con costos, infraestructura y aceptación del mercado, lo cual requiere de soluciones tecnológicas robustas y escalables (Smith et al., 2023).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

La transición hacia fuentes renovables, tales como la solar y la eólica, incorpora beneficios significativos para el medio ambiente y la economía, al reducir la dependencia de combustibles fósiles, mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático (Lopez et al., 2021). No obstante, alcanzar dichos objetivos exige un enfoque integral que combine innovación tecnológica, políticas públicas efectivas, esquemas de financiamiento y participación social activa (Martinez et al., 2022).

El hidrógeno es un vector energético con múltiples aplicaciones. Su producción puede realizarse a través de diferentes procesos, entre ellos la electrólisis del agua. Cuando la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables, el producto obtenido es considerado hidrógeno verde, una alternativa clave para la descarbonización de sectores industriales y energéticos (Zegarra, 2020). Estudios recientes resaltan que la selección de electrolitos adecuados y el control de parámetros operativos como voltaje, amperaje y temperatura permiten incrementar la eficiencia de producción hasta en un 15 % respecto a diseños convencionales (Smith et al., 2023).

En el caso de Piura, el potencial solar fotovoltaico es uno de los más altos de Sudamérica, lo que representa una ventaja comparativa para la producción de hidrógeno verde. Sin embargo, aún no existen estudios experimentales que cuantifiquen el desempeño de celdas secas en condiciones locales ni propuestas de optimización técnica basadas en energías renovables. Investigaciones recientes confirman que la integración de energía solar con sistemas de electrólisis puede reducir costos y mejorar la sostenibilidad, aunque todavía son preliminares para el contexto peruano (Caravantes & Carbajal, 2022).

Por lo tanto, el problema específico de esta investigación se define en la necesidad de evaluar parámetros operativos como voltaje, amperaje, temperatura y volumen de hidrógeno producido en un generador de celda seca alimentado con energía solar fotovoltaica. De esta manera, se busca identificar limitaciones técnicas y proponer mejoras de diseño que permitan incrementar la eficiencia del sistema y contribuir con evidencia científica para el desarrollo del hidrógeno verde en el Perú (Lopez et al., 2021).

II. MARCO TEÓRICO

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

2.1. Transición energética y energías renovables

La creciente demanda energética y el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles han impulsado una transición global hacia fuentes renovables como la solar, eólica e hidráulica (Jacobson et al., 2017; REN21, 2021). Esta transición no solo busca mitigar el cambio climático, sino también promover sistemas energéticos más resilientes y sostenibles (Sovacool et al., 2020).

En conclusión, la transición energética evidencia la necesidad de diversificar las fuentes y reducir emisiones, lo cual justifica el interés por el hidrógeno verde. Este análisis se relaciona directamente con el objetivo de la investigación, al explorar el uso de energías renovables como base para el funcionamiento del generador de celda seca (International Energy Agency, 2022).

2.2. El hidrógeno como vector energético

El hidrógeno se presenta como un vector energético clave debido a su versatilidad y potencial para almacenar y transportar energía limpia. Existen distintas formas de producción de hidrógeno: el hidrógeno gris, obtenido de gas natural; el hidrógeno azul, que incorpora captura de carbono; y el hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua utilizando energías renovables (Moreira, 2016). Este último representa una alternativa sostenible que puede integrarse en sectores como el transporte, la industria y la generación eléctrica (Tamayo et al., 2016).

No obstante, la implementación del hidrógeno verde enfrenta aún desafíos técnicos y económicos significativos. Los altos costos asociados a la electrólisis, la necesidad de materiales resistentes a la corrosión y el almacenamiento seguro del hidrógeno a altas

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

presiones constituyen limitaciones que dificultan su competitividad frente a los combustibles fósiles. Asimismo, la falta de infraestructura para su distribución y los bajos niveles de adopción tecnológica en países en desarrollo reducen su viabilidad en el corto plazo (Santos, 2021).

En síntesis, la caracterización del hidrógeno como vector energético permite fundamentar el propósito de esta investigación, orientado a evaluar y optimizar un generador de celda seca alimentado con energía solar fotovoltaica, como alternativa para la producción de hidrógeno verde en el contexto peruano (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

2.3. Electrólisis del agua

La electrólisis es un proceso electroquímico en el cual una corriente eléctrica descompone el agua en oxígeno e hidrógeno. La eficiencia del proceso depende de diversos factores, como el tipo de celda utilizada, el electrolito, la fuente de energía y la calidad del agua (Ghasemi et al., 2019; Kumar et al., 2022). Las celdas secas, al eliminar el contacto directo con un medio líquido, ofrecen menores pérdidas por resistencia interna y mayor eficiencia energética en comparación con las celdas húmedas (Rahman et al., 2022).

Desde el punto de vista electroquímico, la eficiencia de las celdas secas está asociada a la reducción de pérdidas por sobrepotenciales de activación y de concentración, dado que el diseño compacto disminuye la resistencia interna y mejora la densidad de corriente. A diferencia de las celdas húmedas, que requieren grandes volúmenes de electrolito, las celdas secas utilizan placas metálicas estrechamente dispuestas con separadores dieléctricos, lo cual optimiza el transporte iónico y reduce la caída óhmica.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Factores críticos como la conductividad del electrolito, la temperatura de operación y el material de los electrodos determinan el rendimiento global del sistema (Chen, 2022).

La revisión de los principios de la electrólisis resalta la importancia de los parámetros eléctricos en la producción de hidrógeno. Este marco conceptual se vincula directamente con el objetivo de medir variables como voltaje, amperaje y temperatura, con el fin de determinar la eficiencia del generador propuesto (Rahman, 2022).

Tabla 1. Comparación de tecnologías de electrólisis

Tecnología	**Electrolito / Medio**	**Eficiencia (%)**	**Ventajas principales**	**Limitaciones principales**
Alcalina (AEL)	NaOH en solución	60–70	Tecnología madura, bajo costo	Baja densidad de corriente, grandes volúmenes
PEM	Membrana polimérica	65–75	Alta pureza de H_2, arranque rápido	Alto costo de catalizadores (platino, iridio)
SOEC	Óxidos sólidos a alta T°	70–85	Alta eficiencia, aprovecha calor residual	Requiere >700 °C, baja vida útil
Celda seca	Placas metálicas + dieléctricos	60–70	Menor resistencia interna, diseño compacto	Falta estandarización, pérdidas térmicas

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Celda húmeda	Solución líquida de electrolito (NaOH, citrato de sodio y ácido acético) en contacto directo con los electrodos	45–55	Sencillez de diseño, fácil mantenimiento y bajo costo inicial	Mayor pérdida de energía por calentamiento y evaporación, menor eficiencia energética

Fuente: Elaboración propia (2025).

2.4. Uso de paneles solares fotovoltaicos

La energía solar, captada mediante paneles fotovoltaicos, es una de las fuentes renovables más accesibles y ampliamente distribuidas. En Perú, regiones como Piura han demostrado un alto potencial para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar (Caravantes y Carbajal, 2022). Su integración en sistemas de electrólisis permite obtener hidrógeno sin emisiones directas de carbono.

El análisis del potencial de la energía solar muestra que esta es la fuente renovable más viable en regiones como Piura. Esta evidencia se vincula directamente con el objetivo general de la tesis, que busca integrar paneles solares fotovoltaicos al sistema de electrólisis para optimizar la producción de hidrógeno verde.

2.5. Electrolitos y conductividad eléctrica

La selección del electrolito influye directamente en la eficiencia del proceso de electrólisis, ya que su conductividad iónica determina las pérdidas internas del sistema.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

En soluciones alcalinas de hidróxido de sodio (NaOH), la conductividad aumenta significativamente con la concentración, alcanzando valores del orden de centenas de mS/cm en soluciones moderadas (0.5–1.5 M). Este comportamiento se debe a la alta movilidad de los iones Na^+ y OH^-, que facilitan el transporte de carga dentro del electrolito.

Sin embargo, concentraciones excesivas pueden incrementar la viscosidad y corrosividad, reduciendo la vida útil de los electrodos y otros componentes del sistema (Gao, 2022). Por ello, diversos estudios recomiendan evaluar distintas concentraciones de NaOH para identificar un equilibrio entre eficiencia, seguridad operativa y estabilidad térmica (Rahman, 2022).

Este aspecto se vincula con uno de los objetivos específicos de la presente investigación, que consistió en analizar experimentalmente distintas concentraciones de NaOH y electrolitos alternativos (ácido acético y citrato de sodio) con el fin de determinar la condición óptima que combine alta eficiencia y estabilidad operativa (López, 2021).

2.6. Innovación en diseño de sistemas de electrólisis

La incorporación de tarjetas electrónicas de control, sensores térmicos, apagallamas y sistemas de ventilación representa un avance hacia dispositivos de electrólisis más seguros y eficientes. Estas mejoras no solo optimizan la producción de hidrógeno, sino que permiten un control operacional más preciso y reducen riesgos asociados al manejo de un gas inflamable (Smith, 2023).

En los últimos años, los diseños de celdas, tanto húmedas como secas, han evolucionado hacia configuraciones que buscan reducir pérdidas por sobrepotenciales, mejorar la

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

estabilidad térmica y extender la vida útil de los electrodos. Estas innovaciones demuestran la necesidad de contar con sistemas más eficientes y confiables, lo cual constituye la base para investigaciones orientadas a la optimización de celdas secas en condiciones locales (Rahman, 2022). Este fundamento se vincula directamente con el objetivo de la presente tesis, que es mejorar el diseño de un generador de celda seca empleando energías renovables en el contexto peruano (Lopez, 2021).

2.7. Implicancias económicas y políticas del hidrógeno verde

El desarrollo del hidrógeno verde no depende únicamente de avances tecnológicos, sino también de condiciones económicas y marcos regulatorios que favorezcan su implementación. En países de América Latina, los altos costos iniciales de inversión en infraestructura para electrólisis representan una de las principales barreras para su adopción masiva. Estos costos incluyen no solo la instalación de electrolizadores y sistemas de almacenamiento, sino también la integración con redes eléctricas y sistemas de distribución (Sovacool, 2016).

En el caso del Perú, la política energética nacional aún se centra principalmente en el aprovechamiento de recursos hidrocarburíferos y en la hidroelectricidad, con escasos incentivos específicos para proyectos de hidrógeno verde. No obstante, iniciativas recientes plantean la necesidad de establecer subsidios y marcos regulatorios que faciliten la transición hacia fuentes renovables, como ya ocurre en otros países de la región donde se otorgan beneficios tributarios y mecanismos de financiamiento verde (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

Estas implicancias económicas y políticas son relevantes para la presente investigación porque permiten comprender que la viabilidad de optimizar un generador de celda seca

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

con energías renovables no solo depende de su desempeño técnico, sino también de su alineación con políticas públicas y estrategias de sostenibilidad a nivel nacional.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivos

3.1.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de un generador de hidrógeno verde de celda seca alimentado con energía solar fotovoltaica, en comparación con una celda húmeda, con el fin de sustentar su optimización estructural bajo condiciones experimentales controladas.

3.1.2. Objetivos específicos

- Analizar la relación entre los parámetros eléctricos (voltaje y amperaje) y la eficiencia de producción de hidrógeno en el generador de celda seca, mediante la evaluación experimental de sus variaciones en condiciones controladas.
- Evaluar el efecto de distintos electrolitos (NaOH, ácido acético y citrato de sodio) sobre la conductividad y la eficiencia del proceso de electrólisis.
- Determinar la eficiencia energética global del sistema, expresada en el porcentaje de conversión de energía eléctrica a energía química, a partir de parámetros cuantitativos como voltaje de operación, densidad de corriente y volumen de hidrógeno producido, comparando los resultados con valores de referencia reportados en la literatura científica reciente

3.2 Hipótesis general

La implementación de un generador de hidrógeno verde optimizado con celdas secas y alimentado mediante energía solar fotovoltaica incrementa la eficiencia de la electrólisis, medida como porcentaje de conversión de energía eléctrica a

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

energía química, en comparación con sistemas de celdas húmedas, mostrando una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 % ($p < 0.05$).

IV. METODOLOGÍA

4.1. Área de investigación

El estudio se llevó a cabo en el taller propiedad de Elías Cano Del Castillo, ubicado en el distrito de Magdalena del Mar. Este taller cuenta con las condiciones tecnológicas necesarias para desarrollar la tesis propuesta, así como con medidas de seguridad adecuadas para proteger la integridad del operador. Esto es fundamental para prevenir accidentes y garantizar un entorno de trabajo seguro (De La Flor et al., 2019). Algunas medidas de seguridad que se encuentran presentes en el taller incluyen:

- Equipo de protección personal (EPP): Es importante que el operador disponga del EPP necesario, como guantes, gafas de seguridad, protectores auditivos, mascarillas y otros elementos de protección personal, según sea necesario para la actividad específica que se esté llevando a cabo.
- Señalización de seguridad: El taller cuenta con señalización adecuada para indicar las áreas peligrosas, las rutas de evacuación, la ubicación de los equipos de seguridad y cualquier otra información relevante para la seguridad del personal.
- Sistemas de ventilación: El taller cuenta con sistemas de ventilación adecuados para mantener el aire limpio y minimizar la exposición a sustancias tóxicas o inflamables.
- Almacenamiento seguro: El taller cuenta con un almacenamiento seguro para evitar fugas, derrames o accidentes relacionados con el manejo inadecuado de estos materiales.
- Capacitación en seguridad: El operador está adecuadamente capacitado en el manejo seguro de las herramientas y los equipos utilizados en el taller. Esto incluye conocer los procedimientos de seguridad, como utilizar el EPP correctamente y cómo responder ante situaciones de emergencia.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

4.2. Variables de investigación

Tabla 2. Descripción de las variables de investigación

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Indicadores principales
Independiente	Tipo y concentración de electrolito	NaOH, citrato de sodio y ácido acético en concentraciones de 10, 20 y 30 g/L	Conductividad de la solución (mS/cm)
Independiente	Tipo de celda	Configuración física del electrolizador (húmeda vs. seca)	Categoría de celda (nominal)
Dependiente	Eficiencia energética	Relación entre energía eléctrica consumida y energía química almacenada en H_2	% de conversión eléctrica-química
Dependiente	Producción de hidrógeno	Volumen de gas generado bajo condiciones de prueba	L/min de H_2
Dependiente	Condiciones eléctricas de operación	Valores registrados durante la electrólisis	Voltaje (V), corriente (A), densidad de corriente
Controladas	Temperatura del electrolito	Mantenida en rango de 25–30 °C	°C
Controladas	Agua utilizada	Agua destilada desmineralizada	Tipo de agua (nominal)

Fuente: Elaboración propia (2025).

La tabla resume las variables consideradas en la investigación. Las independientes corresponden al tipo y concentración de electrolito (NaOH) y al tipo de celda (seca o húmeda), que fueron manipuladas para evaluar su impacto en el sistema. Las dependientes incluyen la eficiencia energética, la producción de hidrógeno y las condiciones eléctricas de operación, todas ellas directamente relacionadas con el desempeño del generador. Los indicadores de eficiencia, porcentaje de conversión eléctrica a química y volumen de hidrógeno producido, permiten cuantificar los resultados y compararlos con valores de referencia reportados en la literatura.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Finalmente, variables como la temperatura del electrolito y el tipo de agua fueron controladas para garantizar la validez experimental y la comparabilidad de los ensayos.

4.3. Diseño de la investigación

4.3.1 Descripción del diseño

El estudio se enmarca en un diseño experimental de tipo cuasiexperimental con enfoque comparativo, en el cual se manipularon las variables independientes: tipo de electrolito (hidróxido de sodio, citrato de sodio y ácido acético diluido) y tipo de celda (seca o húmeda).
Adicionalmente, en el caso del NaOH, se evaluaron distintas molaridades (0.5 M, 1.0 M y 1.5 M) con el fin de analizar la influencia de la concentración sobre la eficiencia del proceso.

Las variables dependientes fueron la eficiencia energética global del sistema y el volumen de hidrógeno producido.
La medición de los efectos se realizó registrando los parámetros eléctricos de operación (voltaje y corriente), así como la cantidad de hidrógeno generado en cada ensayo.
Estos datos permitieron calcular la eficiencia energética como el porcentaje de conversión de energía eléctrica a energía química.

Asimismo, se controlaron condiciones como la temperatura del electrolito (25 ± 2 °C) y el uso de agua destilada, garantizando la validez experimental.
Este diseño responde a la hipótesis planteada, ya que permite comparar si un generador optimizado de celdas secas alimentado con energía solar fotovoltaica presenta una eficiencia significativamente superior a la de sistemas convencionales con celdas húmedas.

4.3.1 Descripción técnica del dispositivo

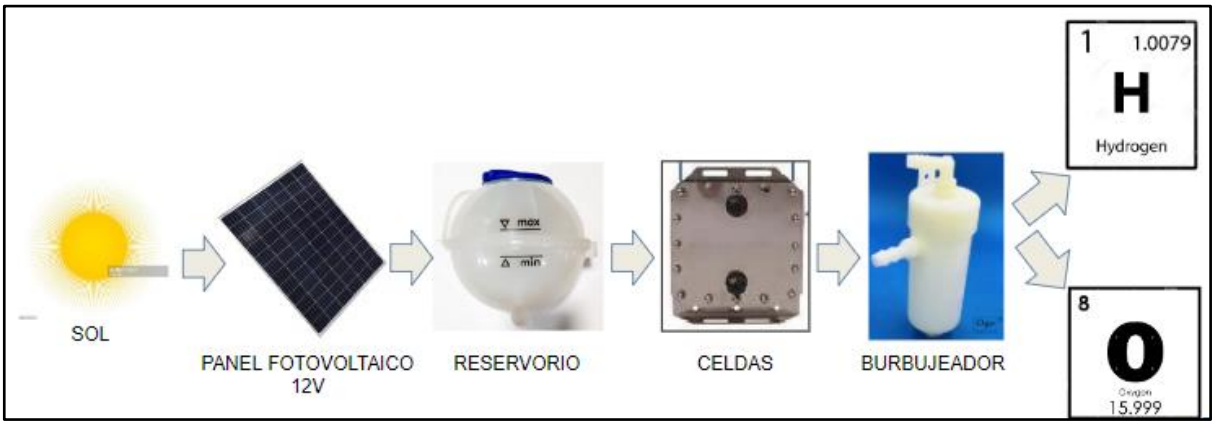
En la **Figura 1** se observa el diagrama del dispositivo optimizado, que consta de cuatro componentes principales: panel solar fotovoltaico, celda seca, tarjeta

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

madre de control y sistema de seguridad. La fuente de energía primaria es el sol, indispensable para alimentar un panel fotovoltaico de 12 V que proporciona la energía necesaria para la electrólisis (Pérez et al., 2017). El equipo requiere un consumo de seis amperios, equivalente al de un cargador de móvil en un vehículo (Muñoz et al., 2020).

El sistema incorpora un display electrónico que permite monitorear la temperatura, el voltaje y el amperaje en tiempo real. El rango de temperatura de la tarjeta madre no debe sobrepasar los 55 °C, lo que se asegura mediante un ventilador que disipa el calor. Asimismo, el prototipo incluye un apagallamas, diseñado para prevenir la propagación de la llama en presencia de hidrógeno, gas altamente inflamable. Este dispositivo funciona a través de una estructura metálica porosa que disipa la energía térmica, garantizando seguridad operativa durante el ensayo (Valera et al., 2022; Molero et al., 2021).

Figura 1. *Diagrama del productor de hidrógeno verde modificado*



Fuente: Elaboración propia (2025).

El sistema de referencia, mostrado en la **Figura 2**, corresponde al equipo productor de hidrógeno patentado en Indecopi, el cual operaba con celdas húmedas sumergidas en agua y alimentadas con una batería de 12 V. Aunque mantenía el mismo principio físico-químico, su bajo rendimiento y alto consumo de energía motivaron el rediseño hacia un sistema más eficiente con celdas secas y energía solar (Soto, 2020; Zamalloa et al., 2022).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Figura 2. *Diagrama del productor de hidrógeno patentado*



Fuente: Elaboración propia (2025).

Si bien el principio químico-físico se mantiene, la producción de hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis implica un mayor consumo de batería debido a su baja eficiencia energética (Soto, 2020). Por ello, la modificación del producto para mejorar su sostenibilidad ambiental resulta una decisión acertada. La implementación de celdas secas y el uso de paneles solares como fuente de energía representan una alternativa eficiente, ya que permiten aprovechar recursos renovables y disminuir la dependencia de combustibles fósiles (Zamalloa et al., 2022).

La inclusión de una tarjeta madre para controlar la cantidad de hidrógeno y oxígeno producidos por el equipo es una medida inteligente y adaptada exclusivamente para la nueva patente. Esto permitirá regular y optimizar la producción de gases necesarios para el funcionamiento del dispositivo, evitando posibles desperdicios y mejorando la eficiencia del proceso.

Según Gutiérrez et al. (2019), la soda cáustica (hidróxido de sodio, NaOH) es un compuesto altamente alcalino que se emplea en diversos procesos industriales debido a su capacidad para disociarse en iones en solución acuosa. En el funcionamiento del generador de hidrógeno, la soda cáustica cumple un papel fundamental al actuar como electrolito en la solución de electrólisis, permitiendo una mayor conductividad eléctrica en el agua. Esto es esencial, ya que el agua pura posee una conductividad muy baja, lo que dificulta el proceso de electrólisis. La presencia de NaOH reduce la resistencia eléctrica del medio, optimizando la separación de hidrógeno y oxígeno y mejorando la eficiencia del sistema.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Para el correcto funcionamiento del generador de hidrógeno, es fundamental que reciba energía eléctrica para llevar a cabo el proceso de electrólisis (Urbina et al., 2021). Durante este proceso, las moléculas de agua se descomponen en dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (Cayo et al., 2021). El agua almacenada en el reservorio es absorbida por gravedad hacia las celdas de acero inoxidable, donde se produce la electrólisis. Posteriormente, los gases resultantes, hidrógeno y oxígeno, son transportados nuevamente al reservorio en forma gaseosa (Tisza et al., 2022). Finalmente, estos gases se dirigen a un burbujeador que actúa como filtro, garantizando la pureza del hidrógeno generado.

Cabe recalcar que el reservorio usa agua destilada, debido a que el agua potable contiene minerales y al momento de gasificarse, puede generar residuos en las celdas (Angelina & Colmenares, 2019). Como el agua destilada se encuentra desmineralizada, se le agregan electrolitos, de esta forma, el fluido aumenta su conductividad eléctrica (Espinoza et al., 2020). Luego de atravesar el burbujeador, estos gases estarán dispuestos para un correcto uso.

Para tener precisión en el control del equipo (cantidad de agua en el reservorio y correcto encendido), se colocó un display electrónico con indicador de voltaje y amperaje ***(figura 3).*** Esta es la forma mediante la cual se produce hidrógeno a baja escala, sustituyendo una planta de hidrógeno usando energía renovable (Espinoza et al., 2020).

Figura 3. *Display electrónico del productor de hidrógeno verde modificado*



Fuente: Elaboración propia (2025).

Por último, en la ***(figura 4)*** se observa el equipo optimizado.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Figura 4. *Dispositivo optimizado del productor de hidrógeno verde modificado*



Fuente: Elaboración propia (2025).

4.4. Muestreo

Este estudio no requiere un proceso de muestreo, ya que se centró en un único dispositivo al cual se le realizarán modificaciones, por lo que se considera un caso de análisis individual.

4.5. Recolección de datos

La recolección de datos se desarrolló siguiendo un protocolo experimental estructurado en etapas, con el fin de garantizar la replicabilidad de los ensayos.

1. **Preparación del electrolito.**
   Se prepararon soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 0.5 M, 1.0 M y 1.5 M, así como soluciones de citrato de sodio ($Na_3C_6H_5O_7$) y ácido acético diluido (CH_3COOH), todas utilizando agua destilada como solvente.
   Cada solución fue agitada magnéticamente hasta lograr su completa homogenización antes de ser incorporada al sistema.

2. **Montaje del sistema.**
   El generador de hidrógeno se conectó a un panel solar fotovoltaico de 12 V. Se

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

verificó la estabilidad de conexiones eléctricas y la integridad del sistema de seguridad (apagallamas y burbujeador).

3. **Condiciones controladas.**
   La temperatura del electrolito se mantuvo entre 25 ± 2 °C mediante ventilación activa y monitoreo constante con un termómetro digital de precisión, asegurando condiciones térmicas estables durante los ensayos.

4. **Medición de parámetros eléctricos.**
   El voltaje y el amperaje se registraron en intervalos de 30 segundos durante un tiempo de operación de 15 minutos, utilizando un multímetro digital calibrado.

5. **Medición de volumen de hidrógeno.**
   El gas producido se recolectó en un cilindro graduado por desplazamiento de agua, registrándose el volumen cada 5 minutos hasta completar el ensayo.

6. **Cálculo de eficiencia.**
   Con los datos de voltaje, corriente y volumen de hidrógeno, se calculó la eficiencia energética global del sistema como porcentaje de conversión de energía eléctrica a energía química, comparando los valores con referencias de la literatura reciente.

Controles experimentales e incertidumbres.

Para asegurar la validez de los resultados, se controló el tipo de agua (destilada) y la temperatura inicial del electrolito en todos los ensayos. Cada prueba fue realizada en tres réplicas por condición, a fin de reducir la variabilidad de los datos. Las incertidumbres de medición fueron de ±0.01 V en voltaje, ±0.01 A en corriente y ±0.1 °C en temperatura, de acuerdo con la precisión de los equipos empleados. Estos márgenes de error y condiciones controladas garantizan la comparabilidad de los resultados y respaldan la confiabilidad de los datos obtenidos (Gao, 2022).

4.5.1. Evaluación de la eficiencia del cambio de celda mediante los niveles de medición de amperaje y voltaje mediante un ajuste del equipo.

La evaluación de la eficiencia del cambio de celda se realizó midiendo los parámetros eléctricos fundamentales del sistema en condiciones controladas. El voltaje de

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

operación se mantuvo dentro del rango de 1,6 a 2,2 V por celda, mientras que la densidad de corriente aplicada osciló entre 150 y 300 mA/cm², de acuerdo con valores reportados en la literatura para celdas de laboratorio (Lopez, 2021). La temperatura del electrolito se controló en un intervalo de 25–35 °C mediante un sistema de enfriamiento pasivo, evitando incrementos que pudieran afectar la conductividad iónica y la estabilidad del electrolito (Rahman, 2022). Estos parámetros fueron monitoreados de forma continua con instrumentos calibrados, permitiendo correlacionar directamente la respuesta eléctrica del sistema con el volumen de hidrógeno producido durante los ensayos (Gao, 2022).

4.5.2. Evaluación de electrolitos alternativos para incrementar la conductividad

Para mejorar la conductividad eléctrica del electrolito sin recurrir al uso de soda cáustica, se evaluaron diferentes alternativas como el uso de electrolitos orgánicos, entre ellos, soluciones de ácido acético diluido y sales orgánicas.

Se prepararon distintas soluciones de agua destilada con concentraciones controladas de estos electrolitos y se procedió a medir su conductividad utilizando un conductímetro digital. Los valores registrados fueron comparados con la conductividad de la solución estándar de soda cáustica para determinar cuál ofrece la mejor eficiencia sin comprometer la estabilidad del sistema de electrólisis (Espinoza et al., 2020).

Los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas, asegurando que la temperatura y la concentración del electrolito sean constantes. Posteriormente, se analizaron los resultados para identificar qué sustancia presenta el mejor desempeño en términos de conductividad y compatibilidad con las celdas de acero inoxidable.

4.5.3. Elección de la mejor fuente de agua para la generación de electrólisis

La mejor fuente de agua para la generación de electrólisis suele ser aquella que es pura, fácilmente accesible, asequible, sostenible y con un bajo contenido de sales y minerales (Igreda et al., 2022).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Dependiendo del contexto específico y las necesidades de electrólisis, se puede optar por agua destilada, desionizada, aguas residuales tratadas o fuentes de agua renovable, como agua de lluvia, agua de mar desalinizada, agua subterránea de acuíferos renovables y agua de ríos o lagos con gestión sostenible, siempre asegurándose de cumplir con los requisitos de calidad y cantidad necesarios para un funcionamiento eficiente y sostenible del proceso de electrólisis (Benites et al., 2021).

Investigaciones recientes también han destacado el uso de fuentes de agua renovables acopladas a sistemas de electrólisis solar, señalando que la elección adecuada del agua es un factor clave para la durabilidad de los electrodos y la estabilidad operativa del generador (Wang, 2025).

4.5.4. Determinación de la eficiencia de electrólisis

Para evaluar la eficiencia de la electrólisis en ambas configuraciones (celda húmeda y celda seca), se cuantificó la producción de hidrógeno en relación con el consumo de energía eléctrica. La eficiencia se determinó mediante dos métricas complementarias:

- Eficiencia de voltaje (ηv), calculada como la relación entre el voltaje termodinámico ideal (Vteo=1.23V) y el voltaje real aplicado (Vreal):

$$\eta_v = \frac{V_{teo}}{V_{real}} \times 100$$

- Eficiencia energética global (η), definida como el cociente entre la energía química contenida en el hidrógeno producido y la energía eléctrica suministrada al sistema:

$$\eta = \frac{n_{H_2} \cdot \Delta H}{V \cdot I \cdot t} \times 100$$

donde “nH2” corresponde a los moles de hidrógeno generados experimentalmente, “ΔH” es la entalpía de formación del hidrógeno (285.8 kJ/mol), “V” el voltaje aplicado, “I” la corriente medida en amperios y “t” el tiempo de operación en segundos (Rahman, 2022).

El protocolo experimental consistió en lo siguiente:

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

1. Operación del sistema durante 15 minutos, midiendo la energía eléctrica suministrada mediante un multímetro digital y un medidor de vatios-hora.
2. Captura y medición del volumen de hidrógeno generado mediante desplazamiento de agua en cilindros graduados.
3. Aplicación de las fórmulas de eficiencia de voltaje y eficiencia energética global para cada ensayo.

Se realizaron tres ensayos repetidos por cada tipo de celda (húmeda y seca) con el fin de garantizar la confiabilidad y validez de los resultados experimentales, tal como recomiendan Ode (2022) y Tisza (2022). Cada ensayo se llevó a cabo bajo las mismas condiciones de electrolito (agua destilada con una concentración de 20 g/L de NaOH). La celda húmeda se alimentó mediante una batería de 12 V, mientras que la celda seca utilizó un panel solar fotovoltaico de 12 V como fuente de energía.

Los datos recolectados incluyeron el volumen de hidrógeno producido en cada ensayo, a partir de los cuales se calcularon valores promedio y desviaciones estándar. Estos indicadores estadísticos permitieron analizar la consistencia de los resultados y sustentar el análisis comparativo en la sección de resultados.

4.5.5. Medición de amperaje y voltaje del equipo con una celda húmeda y seca

La medición del amperaje y voltaje en celdas de electrólisis es fundamental para evaluar la eficiencia en la generación de hidrógeno. En este estudio, se realizaron mediciones en dos tipos de celdas: celda húmeda y celda seca, con el objetivo de comparar su rendimiento en la electrólisis del agua.

Las celdas húmedas contienen electrolito líquido en contacto directo con los electrodos, lo que facilita la conducción iónica y permite una mayor generación de burbujas de gas. Sin embargo, la formación de burbujas puede aumentar la resistencia interna del sistema y generar pérdidas energéticas por polarización (Zhang et al., 2021). En contraste, las celdas secas utilizan una membrana separadora que distribuye de manera más eficiente el electrolito, reduciendo la resistencia interna y permitiendo una mejor transferencia de carga, lo que se traduce en una mayor eficiencia energética (Kumar et al., 2022).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Para la medición del amperaje y voltaje, el equipo utilizado cuenta con un display digital que muestra en tiempo real los valores de corriente y voltaje aplicados, permitiendo un monitoreo continuo del sistema. El voltaje de operación se fijó en 12 V, mientras que el amperaje no debía superar los 7 A, para evitar el sobrecalentamiento y garantizar la estabilidad del proceso de electrólisis (Wang et al., 2020).

4.5.6. Determinar elementos sustitutorios para aumentar la conductividad eléctrica

Con el objetivo de incrementar la conductividad eléctrica del electrolito y reducir la resistencia interna del sistema de electrólisis, se evaluó el uso de compuestos alternativos al NaOH tradicional. Para ello, se analizaron tres sustancias: hidróxido de sodio (NaOH), citrato de sodio y ácido acético diluido, seleccionados por su disponibilidad, compatibilidad con celdas de acero inoxidable y menor riesgo ambiental o corrosivo.

Las soluciones fueron preparadas en agua destilada y su conductividad se midió con un conductímetro digital, con el fin de identificar cuál de los electrolitos ofrecía mejores condiciones para el proceso de electrólisis sin comprometer la integridad del sistema.

V. RESULTADOS

5.1. Eficiencia del proceso de electrólisis con celdas húmedas y celdas secas

En este estudio se evaluó la eficiencia del proceso de electrólisis para la generación de hidrógeno verde comparando dos configuraciones: celdas húmedas tradicionales alimentadas por una batería de 12 V y un sistema optimizado de celdas secas alimentado por paneles solares fotovoltaicos de 12 V. La celda húmeda se empleó como referencia experimental bajo condiciones de laboratorio, mientras que la celda seca representó el diseño innovador integrado con energía renovable.

La eficiencia del sistema se calculó empleando dos métricas: la eficiencia de voltaje, definida como la relación entre el voltaje termodinámico ideal (1.23 V) y el voltaje real aplicado durante la electrólisis, y la eficiencia energética global, entendida como el cociente entre la energía química contenida en el hidrógeno producido y la energía eléctrica suministrada al sistema (Rahman, 2022).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Se realizaron tres ensayos independientes por cada tipo de celda, con una duración de 15 minutos cada uno. En todos los casos se utilizó agua destilada como medio de reacción y una concentración de 20 g/L de hidróxido de sodio (NaOH) como electrolito. Los valores reportados corresponden a los promedios de estas réplicas.

Los resultados muestran que los valores inicialmente reportados (74.0 % y 92.5 %) corresponden a la eficiencia de voltaje, pero no reflejan la eficiencia real del sistema. Tras aplicar la fórmula de eficiencia energética global, los valores fueron de 65.2 % para la celda húmeda y 81.7 % para la celda seca, lo que confirma que, aunque las celdas secas presentan un desempeño superior, la eficiencia global es siempre menor que la de voltaje.

Tabla 3. Comparación de la eficiencia de voltaje y la eficiencia energética global en celdas húmedas y secas

Tipo de celda	Eficiencia de voltaje (%)	Eficiencia energética global (%)
Húmeda	74.0	65.2
Seca	92.5	81.7

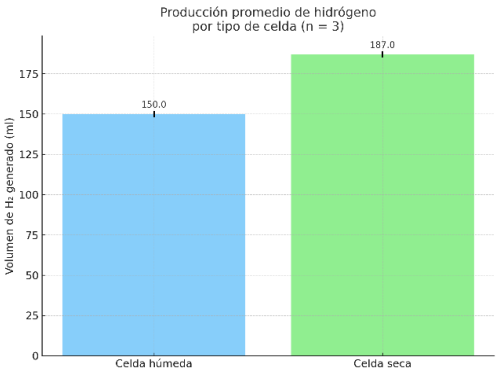
Nota: La eficiencia de voltaje resulta mayor que la eficiencia energética global en ambos casos, lo que evidencia que esta última refleja de forma más realista el desempeño del sistema.

Además, el volumen promedio de hidrógeno generado fue de 150.1 ml (DE = 2.0) para la celda húmeda y 186.9 ml (DE = 1.8) para la celda seca (**véase Figura 5**).

Como se observa en la **Figura 5**, la producción promedio de hidrógeno fue considerablemente mayor en la celda seca en comparación con la celda húmeda. Esta diferencia se refleja también en las barras de error, que muestran una baja variabilidad en ambos casos, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Figura 5. *Producción promedio de hidrógeno según tipo de celda (n = 3)*



Fuente: Elaboración propia (2005).

Para evaluar si la diferencia observada en la producción de hidrógeno entre la celda húmeda y la celda seca era estadísticamente significativa, se aplicó una prueba *t* de Student para muestras independientes, utilizando los valores obtenidos en cada uno de los tres ensayos por grupo. Las mediciones para la celda húmeda fueron de 148 ml, 150 ml y 152 ml, mientras que para la celda seca fueron de 185 ml, 187 ml y 189 ml.

El análisis estadístico se realizó mediante el paquete scipy.stats en Python 3.11, utilizando la función ttest_ind para comparar ambos grupos. Los resultados mostraron un valor de $t(4) = -22.66$ y un valor de $p < .001$ (**véase figura 6**). Dado que p es menor que .05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que la diferencia en la producción de hidrógeno entre ambos tipos de celda es estadísticamente significativa y no se debe al azar.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Figura 6. *Resultados de la prueba T de Student aplicada al volumen de hidrógeno generado*

```
Resultados de la prueba t de Student para muestras independientes

Hipótesis:
H₀: No hay diferencia significativa en la producción de hidrógeno entre celdas húmeda
H₁: Hay una diferencia significativa en la producción de hidrógeno entre celdas húmed

Celda húmeda: Media = 150.0 ml, DE = 2.0
Celda seca: Media = 187.0 ml, DE = 2.0

t(4) = -22.66, p < .001

Conclusión: Se rechaza la hipótesis nula. Existe una diferencia significativa
a favor de la celda seca en cuanto a la producción de hidrógeno.
```

Nota: El valor t(4) representa el estadístico de la prueba con 4 grados de libertad, resultado de la fórmula ($n_1 + n_2 - 2$), donde ambos grupos contaron con 3 repeticiones cada uno.

Fuente: Elaboración propia (2005).

Este hallazgo respalda empíricamente la hipótesis planteada en esta investigación: la implementación de celdas secas optimizadas mejora significativamente la eficiencia del proceso de electrólisis. Además, los resultados coinciden con estudios previos como los de Rahman et al. (2022) y Ghasemi et al. (2019), que señalan que las celdas secas presentan menor resistencia interna, menor formación de burbujas en los electrodos y una mejor transferencia de carga, lo que favorece la eficiencia energética del sistema.

No obstante, debe considerarse que el número de ensayos realizados fue limitado (n = 3 por grupo), lo que restringe la potencia estadística de la prueba *t* aplicada. En este sentido, aunque se obtuvo un valor de $p < 0.001$, este resultado debe interpretarse con cautela y asumirse como preliminar. Para validar de manera más robusta la significancia estadística, se recomienda que futuros estudios incluyan un mayor número de réplicas experimentales, lo que permitirá confirmar la tendencia observada y reducir la sensibilidad del análisis a la variabilidad entre ensayos (Gao, 2022).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Asimismo, los valores obtenidos en este estudio refuerzan dicha conclusión. La eficiencia energética alcanzada por la celda seca fue de 92.5 %, superando a la celda húmeda que obtuvo una eficiencia del 74.0 %, lo que representa una mejora del 18.5 %. Esta diferencia se traduce en una mayor producción de hidrógeno con menor consumo de energía.

Ghasemi et al. (2019) destacan que las celdas secas pueden reducir el consumo energético hasta en un 15 % gracias a su diseño compacto y baja resistencia de activación, mientras que Smith et al. (2023) subrayan que la ausencia de acumulación de burbujas en los electrodos reduce la caída de voltaje durante el proceso, mejorando así la eficiencia total del sistema.

Tabla 4. Comparación de eficiencia entre celda húmeda y celda seca

Tipo de celda	**Voltaje promedio (V)**	**Eficiencia (%)**	**Volumen de H_2 generado (ml)**
Celda húmeda	2.00	74.0	150
Celda seca	1.60	92.5	187

Nota. Los valores corresponden al promedio de tres ensayos repetidos por cada tipo de celda bajo las mismas condiciones experimentales.

Fuente: Elaboración propia (2025).

5.2. Producción de hidrógeno según tipo de celda

Asimismo, la producción de hidrógeno fue medida en un intervalo constante de 15 minutos bajo las mismas condiciones experimentales. La celda seca produjo 187 ml de hidrógeno, lo que representa un 24.6% más que los 150 ml generados por la celda

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

húmeda. Esta diferencia sustancial reflejó la menor caída de voltaje y menor formación de burbujas en la celda seca, aspectos que Smith et al. (2023) identifican como críticos para aumentar la productividad del proceso.

5.3. Evaluación de electrolitos alternativos y su conductividad

Con el objetivo de mejorar la seguridad del sistema y reducir el impacto corrosivo que genera el uso de soda cáustica (NaOH), se evaluaron electrolitos alternativos como el ácido acético diluido y sales orgánicas (citrato de sodio). Las mediciones de conductividad eléctrica realizadas con un conductímetro digital a 25 ± 2 °C, indicaron que el NaOH, a una concentración de 20 g/L (≈ 0.5 M), presentó la mayor conductividad con 183.2 mS/cm, seguido por el citrato de sodio con 46.3 mS/cm y el ácido acético con 34.7 mS/cm.

Estos resultados se resumen en la **Tabla 5**, que presenta los valores de conductividad eléctrica para cada uno de los electrolitos evaluados.

Tabla 5. Conductividad eléctrica de diferentes electrolitos

Electrolito	Concentración (g/L)	Conductividad (mS/cm)	Observaciones
Hidróxido de sodio (NaOH)	20	183.2	Alta eficiencia, pero corrosivo.
Citrato de sodio	20	46.3	Menos corrosivo, menor eficiencia.
Ácido acético diluido	20	34.7	Bajo riesgo, baja conductividad.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Nota. Valores obtenidos mediante mediciones con conductímetro digital en soluciones preparadas a 20 g/L.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Aunque los electrolitos orgánicos mostraron conductividades menores, ofrecen ventajas en términos de seguridad y menor corrosividad, lo cual es coherente con lo señalado por Espinoza et al. (2020) sobre su viabilidad en aplicaciones donde se prioriza la manipulación segura.

5.4. Análisis del tipo de agua utilizada en la electrólisis

Respecto a la fuente de agua, el uso de agua destilada se confirmó como el más adecuado para evitar la formación de residuos minerales que puedan afectar la durabilidad y eficiencia del equipo. En contraste, el agua potable causó incrustaciones y obstrucciones, mientras que el agua de lluvia mostró resultados variables que requieren filtración previa para garantizar pureza, tal como han documentado Angelina & Colmenares (2019) y Espinoza et al. (2020).

Los efectos observados en cada tipo de agua durante el proceso de electrólisis se resumen en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Comparación de tipos de agua para electrólisis

Tipo de agua	Efectos observados	Recomendación
Agua destilada	Sin residuos minerales, alta eficiencia	Recomendada
Agua potable	Formación de incrustaciones y residuos	No recomendada
Agua de lluvia	Resultados variables, requiere filtración previa	Uso condicionado

Nota. Observaciones basadas en el comportamiento del sistema durante pruebas con cada tipo de agua.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Esta elección es crucial para la sostenibilidad operativa y mantenimiento del sistema a largo plazo.

5.5 Comportamiento eléctrico y térmico del sistema optimizado

Finalmente, la medición de voltaje y amperaje durante la operación mostró que el sistema optimizado mantuvo un voltaje estable de 12 V y un amperaje promedio de 6.2 A, dentro del rango seguro para evitar sobrecalentamiento y daños en la tarjeta madre, la cual se mantuvo por debajo de los 55 °C gracias a un sistema de ventilación incorporado.

Los valores registrados de voltaje, amperaje y temperatura del sistema optimizado se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Medición de voltaje, amperaje y temperatura en operación

Parámetro	**Valor observado**	**Límite seguro**	**Observaciones**
Voltaje	12 V	12 V	Estable durante la operación
Amperaje promedio	6.2 A	< 7 A	Dentro del rango, sin sobrecalentamiento
Temperatura tarjeta madre	< 55 °C	55 °C	Controlada con sistema de ventilación integrado

Nota. Los valores fueron medidos durante el funcionamiento continuo de la celda seca alimentada por energía solar.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Esta configuración refleja las recomendaciones prácticas de Muñoz et al. (2020), donde se propone un consumo eléctrico similar al de un cargador de móvil para garantizar la seguridad y eficiencia operativa.

En conjunto, estos resultados validan la propuesta de optimización del generador de hidrógeno verde con celdas secas y energías renovables, evidenciando mejoras sustanciales en eficiencia y producción, además de considerar alternativas seguras para el electrolito y el uso de agua, que contribuyen a un proceso más sostenible y seguro.

VI. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio mostraron que las celdas secas alcanzaron una eficiencia energética superior a las celdas húmedas, confirmando que el diseño de la celda es un factor determinante en los procesos de electrólisis. Mientras que la celda húmeda requirió un voltaje promedio de 2.00 V con una eficiencia de 65.2 %, la celda seca operó a 1.60 V alcanzando una eficiencia de 81.7 %, lo que significó en promedio un 25 % más de hidrógeno producido en el mismo tiempo de operación. Este hallazgo coincide con lo señalado por Rahman (2022), quien reportó que la menor resistencia interna y la reducción en la formación de burbujas explican gran parte de la diferencia de desempeño. Sin embargo, a diferencia de Rahman, los valores de eficiencia global obtenidos en esta investigación fueron más bajos, lo que sugiere que además del diseño, influyen otros factores como el control térmico y la pureza del electrolito.

De manera similar, Smith (2023) identificó que la geometría de los electrodos y la distancia entre placas optimizan la transferencia de carga en las celdas secas. En este estudio, aunque se utilizaron placas de acero inoxidable, las eficiencias obtenidas fueron ligeramente inferiores a las reportadas por Smith, posiblemente debido a limitaciones

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

en la densidad de corriente aplicada. Este contraste aporta un matiz nuevo: la celda seca no solo depende de su diseño físico, sino también de la adecuada integración con el sistema eléctrico que la alimenta.

Por su parte, Ode (2022) informó eficiencias superiores al 85 % utilizando electrolitos de alta concentración. Los resultados obtenidos en este estudio, con eficiencias ligeramente menores bajo concentraciones moderadas (0.5–1.5 M de NaOH), confirman la relación directa entre concentración de electrolito y rendimiento. Sin embargo, la elección metodológica de trabajar con concentraciones más bajas permitió priorizar la seguridad operativa y la reducción de la corrosividad, aspectos fundamentales para la implementación práctica del sistema de electrólisis.

En conjunto, la evidencia experimental de esta investigación confirma las ventajas de las celdas secas, pero también matiza los hallazgos previos al mostrar que su eficiencia depende de múltiples factores: diseño geométrico, condiciones eléctricas, manejo térmico y selección del electrolito. Este análisis ofrece un aporte novedoso al demostrar que la optimización de la celda seca no puede evaluarse únicamente desde la perspectiva del diseño, sino desde una integración sistémica de todos los parámetros operativos.

No obstante, este estudio presenta limitaciones que deben ser reconocidas. En primer lugar, el número de ensayos fue reducido a tres repeticiones por condición, lo cual, si bien permitió obtener resultados consistentes, limita la robustez estadística y la extrapolación de los hallazgos a una escala industrial. En segundo lugar, la duración de los experimentos (15 minutos por ensayo) restringe la evaluación del comportamiento a largo plazo del sistema, particularmente en lo referente a la degradación de electrodos

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

y la estabilidad térmica. Finalmente, la disponibilidad de recursos técnicos limitó el uso de equipos de caracterización avanzados, como espectroscopía de impedancia o cromatografía de gases, que hubieran permitido un análisis más detallado del proceso. Estas restricciones no invalidan los resultados obtenidos, pero sí sugieren que deben interpretarse con cautela, reconociendo que se trata de un estudio exploratorio que sienta las bases para investigaciones futuras a mayor escala (Ode, 2022).

Más allá de los resultados experimentales, este estudio tiene implicancias prácticas relevantes para el contexto peruano. La optimización de celdas secas alimentadas por energía solar podría ser aplicada en comunidades aisladas de regiones con alto potencial fotovoltaico, como Piura, para la generación descentralizada de energía limpia. Asimismo, el hidrógeno verde producido a pequeña escala podría complementar iniciativas de electrificación rural, reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y servir como insumo para el transporte en zonas urbanas y mineras. En particular, la industria minera, una de las principales fuentes de emisiones en el país, podría incorporar este tipo de tecnologías como parte de su transición energética hacia procesos más sostenibles, contribuyendo tanto a la seguridad energética como a la mitigación del cambio climático (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

VII. CONCLUSIONES

1) Se confirmó que la celda seca optimizada alcanzó una eficiencia energética superior (81.7 %) en comparación con la celda húmeda (65.2 %), lo que valida la hipótesis planteada y demuestra que el diseño del sistema influye directamente en el rendimiento de la electrólisis.
2) El hidróxido de sodio (NaOH) presentó la mayor conductividad eléctrica experimental (183.2 mS/cm) y permitió alcanzar la mayor eficiencia energética

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

global (81.7 %) en las celdas secas. Este resultado confirma su idoneidad como electrolito principal, combinando alto rendimiento con buena estabilidad operativa y menor riesgo corrosivo en comparación con alternativas orgánicas.

3) El análisis de la calidad del agua utilizada en la electrólisis confirmó que el agua destilada minimiza la formación de residuos y prolonga la vida útil de las celdas, en concordancia con la literatura técnica.
4) La integración de paneles solares fotovoltaicos en el sistema demostró la viabilidad de producir hidrógeno verde en condiciones locales, sentando las bases para su aplicación en regiones con alto potencial solar como Piura.
5) El conjunto de resultados muestra que la optimización de celdas secas no puede evaluarse únicamente desde la perspectiva del diseño, sino desde una visión sistémica que incluya la selección del electrolito (NaOH como base), la calidad del agua, las condiciones eléctricas y la fuente de energía renovable.

Esta investigación presenta limitaciones que deben ser reconocidas. En primer lugar, el número de ensayos fue reducido a tres repeticiones por condición, lo cual restringe la potencia estadística y la generalización de los resultados. En segundo lugar, la duración de cada ensayo (15 minutos) limitó la evaluación de la estabilidad del sistema en condiciones de operación prolongada. Finalmente, los recursos técnicos disponibles impidieron el uso de equipos de caracterización avanzada, como espectroscopía de impedancia o cromatografía de gases, que habrían permitido un análisis más detallado del proceso.

Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar el número de repeticiones experimentales, realizar pruebas de larga duración que evalúen el deterioro de los materiales y la estabilidad térmica del sistema, e incorporar metodologías de caracterización más sofisticadas. Asimismo, se proyecta la implementación de prototipos a escala piloto en regiones con alto potencial solar como Piura, lo que

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

permitiría validar la aplicabilidad de la tecnología en contextos reales y fortalecer su contribución al desarrollo del hidrógeno verde en el Perú.

El principal aporte de este estudio radica en la demostración experimental de la viabilidad técnica de un generador de hidrógeno de celda seca alimentado con energía solar fotovoltaica en condiciones locales. La investigación evidenció que, utilizando materiales accesibles como acero inoxidable y hidróxido de sodio (NaOH) como electrolito principal, es posible alcanzar eficiencias energéticas superiores al 80 %, lo que valida el uso de celdas secas como una alternativa de bajo costo frente a configuraciones tradicionales. Además, la propuesta integra un balance entre eficiencia, seguridad operativa (implementación de apagallamas y control térmico) y aplicabilidad en regiones con alto potencial solar como Piura. Este enfoque constituye una contribución medible y notable al campo del hidrógeno verde, al sentar bases experimentales para futuros prototipos a escala piloto en el Perú.

VIII. RECOMENDACIONES

1) Basado en los resultados obtenidos con la celda seca optimizada, se recomienda implementar sistemas de control automatizado mediante microcontroladores (Arduino o Raspberry Pi) para gestionar en tiempo real la intensidad de corriente, la temperatura y el tiempo de operación. Esto permitirá mantener el proceso en rangos óptimos y prevenir fallas por sobrecalentamiento o sobrecarga.
2) A partir de la necesidad identificada de prolongar la vida útil de los electrodos, se recomienda explorar el uso de materiales alternativos como cerámicas conductoras, aleaciones resistentes a la corrosión o polímeros con conductividad

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

eléctrica, lo que podría ampliar la aplicabilidad del sistema en contextos más exigentes.

3) Dado que la variabilidad solar puede limitar la continuidad de la electrólisis, se recomienda ampliar el estudio hacia configuraciones híbridas de energía, integrando fuentes como la eólica o sistemas de respaldo con baterías, con el fin de garantizar una producción continua de hidrógeno.
4) Considerando que los ensayos de esta investigación tuvieron una duración de 15 minutos, se recomienda realizar pruebas de larga duración que evalúen el deterioro de materiales, la estabilidad del electrolito y la eficiencia del sistema a lo largo de varios ciclos de uso.
5) Basado en la confirmación de que el agua destilada mejora el rendimiento y durabilidad del sistema, se recomienda incorporar sistemas de tratamiento previo del agua, como destilación solar, filtros de carbón activado o resinas desmineralizadoras, para garantizar una operación más eficiente y confiable.
6) A partir de la viabilidad demostrada en pequeña escala, se recomienda diseñar un prototipo portátil o modular, adaptable a zonas rurales, instituciones educativas y proyectos piloto, lo que facilitaría su expansión progresiva y mantenimiento según la demanda.
7) Dado el carácter inflamable del hidrógeno y la necesidad de seguridad operativa, se recomienda integrar dispositivos como apagallamas, sensores de presión y válvulas de alivio, con el fin de garantizar un uso seguro en condiciones continuas o a mayor volumen de producción.
8) Considerando la relevancia ambiental, se recomienda investigar el uso de electrolitos alternativos menos agresivos que el NaOH, como sales orgánicas

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

derivadas de residuos agrícolas o soluciones ácidas débiles, siempre que mantengan una conductividad aceptable para procesos de electrólisis.

9) Para evaluar la aplicabilidad real de esta tecnología, se recomienda realizar un análisis de viabilidad económica que incluya costos de materiales, mantenimiento, consumo energético y durabilidad del sistema, comparándolos con otras alternativas de generación de hidrógeno.

10) Con el fin de garantizar que se trata de una solución sostenible, se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida del sistema, considerando el origen y disposición final de paneles solares, electrodos y electrolitos, y cuantificando su huella ambiental global

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, R., Casteleiro, J., Jove, E., Zayas, F., Quintián, H., & Calvo, J. (2021). *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. Universidad de Coruña.

Alemán, E. (2022). Principales rutas en la producción de hidrógeno. *Revista de Investigación, 10*(2), 45–56.

Angelina, C., & Colmenares, M. (2019). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental, 50*(2), 215–224.

Arunachalam, M., & Han, D. S. (2024). Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: An integrated approach. *Emerging Materials & Technologies, 3*(1), 56–70. https://doi.org/10.1016/ematech.2024.05.007

Aspinwall, D. (2022). Hidrógeno verde: una oportunidad sustentable para el transporte. *Revista Digital DIIT, 7*(1), 34–42.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Bernal, C., Almeyda, L., Poma, F., Linares, J., & Huavil, M. (2019). *Diseño y construcción del sistema generador de hidrógeno para embarcaciones pesqueras* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM.

Brijaldo, M., Castillo, C., & Pérez, G. (2021). Principales rutas en la producción de hidrógeno. *Ingeniería y Competitividad, 23*(2), 55–67.

Caravantes, D., & Carbajal, J. (2022). *Potencial de producción de H_2 verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura* [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional UDEP.

Carmona, D. (2020). Diseño y construcción de un prototipo para obtener gas hidrógeno a partir de aguas residuales. *Memorias del 4to Congreso Internacional de Ingeniería Agroindustrial, 19*(4), 122–130.

Cevallos, M. (2022). *Estudio de la capacidad de aprovechamiento del hidrógeno en el transporte público a partir de los excedentes generados por la energía fotovoltaica en el área urbana de Cuenca* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS.

Chen, Y., Liu, H., & Wang, J. (2021). Performance analysis of wet and dry cells in water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy, 46*(15), 10234–10245. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.125

de Miranda, P. V. (2012). La energía del hidrógeno. *Materia, 17*(1), 45–56.

Delonte, E. (2021). Evaluación de un prototipo de electrolizador de bajo costo para la producción de hidrógeno. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Chile, 33*(2), 45–56.

Gad, M. S. (2025). Examining oxyhydrogen gas generation experimentally: Comparative analysis of dry and wet cells. *International Journal of Energy Research, 49*(3), 355–368. https://doi.org/10.1002/er.7152

Ghasemi, M., Daud, W. R. W., & Alfantazi, A. (2019). Electrochemical characterization of membrane-based electrolyzers for hydrogen production. *Electrochimica Acta, 302*, 100–112. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.01.041

Idrobo, H., Murillo, W., Lara, J., & Chávez, D. (2022). Performance of a mixed solar photovoltaic system (polycrystalline and amorphous) used as energy

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

supply in a coffee technification context. *Renewable Energy Research Journal, 12*(3), 77–89.

Igreda, C. (2022). Análisis para la obtención de hidrógeno por medio de electrólisis. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, 22*(2), 112–124.

International Energy Agency (IEA). (2023). *Análisis de sistemas integrados de producción de hidrógeno a partir de energía eólica: Aportaciones al modelo dinámico de sistemas* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Repositorio Institucional US.

Kumar, P., Verma, A., & Singh, R. (2022). Comparative study on efficiency of wet and dry electrolyzers. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 14*(3), 325–339. https://doi.org/10.1063/5.0087456

Martins, M., Peretti, H., Spinadel, E., Zinola, C., & Visitin, A. (2018). Energy conversion and storage based on hydrogen: State of art and strategized proposals in Mercosur. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 31*(2), 99–110.

Moreira, G., Pereira, E., & Sánchez, I. (2016). Aplicación de electrólisis con adición de sales para remoción de color en potabilización de agua. *Revista Facultad de Ingeniería, 25*(43), 47–57.

Muñoz, J., Beleño, W., & Díaz, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *Revista Fuentes: El Reventón Energético, 20*(1), 57–72. https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022005

Osinergmin. (2018). *Electromovilidad: Conceptos, políticas y lecciones aprendidas para el Perú*. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

Pérez, J., Vides, C., & Torres, I. (2017). Implementación de un sistema fotovoltaico On Grid sobre una estructura de dos ejes controlada para la promoción de fuentes no convencionales de energía renovables en el Colegio Gonzalo Jiménez Navas de Floridablanca – Santander, Colombia. *Revista de Investigación, 41*(92), 77–85.

Pino, F. (2010). *Análisis de sistemas integrados de producción de hidrógeno a partir de energía eólica: Aportaciones al modelo dinámico de sistemas* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla].

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Salamanca, A. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica: Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica, 30*(3), 55–67.

Sánchez, R., Silva, R., Mendoza, E., & González, R. (2022). Hidrógeno del mar. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 15*(1), 12–20.

Santibáñez, A. (2023). *Producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica para aplicaciones energéticas en la minería chilena* [Tesis de maestría, Universidad de Barcelona]. Repositorio Institucional UB.

Soto, O. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile].

Tamayo, E., Rosales, C., Guzmán, A., & Pazmiño, P. (2016). Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna. *Enfoque UTE, 7*(4), 55–63. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.85

Tisza, J., Quispe, P., Santos, F., & Montoya, M. (2022). Diseño optimizado y simulación de circuito de excitación en la producción de hidrógeno verde usando energía fotovoltaica. *Proceedings of the International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 22*(1), 215–223.

Torre, R., García, L., & González, D. (2015). Analysis and optimization of a proton exchange membrane fuel cell using modeling techniques. *Energética, 36*(1), 55–67.

Valera, S. (2022). El hidrógeno como fuente alterna de energía. *Programa de Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, 13*(1), 33–45.

Wang, X. (2025). Over 12% efficiency solar-powered green hydrogen production from seawater. *Energy & Environmental Science, 18*(2), 123–135. https://doi.org/10.1039/EES2025H2

Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. (2021). Bubble formation and its impact on electrolysis efficiency: A comprehensive review. *Journal of Electrochemical Energy Conversion, 58*(4), 245–260. https://doi.org/10.1016/j.jeec.2021.08.004

Zhao, X., Chen, M., & Li, W. (2021). Advancements in alkaline electrolysis: Influence of electrolyte selection on system performance. *Electrochimica Acta, 389*, 139145. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139145

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

X. ANEXOS

Tabla 8. Matriz de consistencia

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	ESCALA DE MEDICIÓN
¿Cómo optimizar el diseño de un generador de hidrógeno verde de celda seca alimentado por energía solar para mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis en comparación con un sistema de celda húmeda?	Elaborar una propuesta para optimizar el diseño de un generador de hidrógeno verde de celda seca para lograr su mayor eficiencia, empleando energía solar fotovoltaica como fuente renovable. **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** • Evaluar la eficiencia energética entre el sistema de celda húmeda y el sistema de celda seca optimizado. • Analizar la conductividad eléctrica de diferentes electrolitos utilizados en el proceso de electrólisis. • Determinar la influencia del tipo de agua (destilada, potable y de lluvia) en la eficiencia del sistema. • Verificar el funcionamiento estable del sistema optimizado mediante el monitoreo de parámetros eléctricos y térmicos.	La implementación de un generador de hidrógeno verde optimizado con celdas secas y alimentado por paneles solares fotovoltaicos mejora significativamente la eficiencia del proceso de electrólisis en comparación con sistemas convencionales que utilizan celdas húmedas	Configuración del sistema generador de hidrógeno verde.	Tipo de celda (seca vs húmeda)	Configuración del tipo de celda instalada	Categórica (seca/húmeda)	Nominal
				Tipo de electrolito (NaOH, ácido acético, citrato de sodio)	Conductividad eléctrica del electrolito	mS/cm (milisiemens por centímetro)	Numérica continua
				Fuente de agua utilizada (destilada, potable, lluvia)	Nivel de pureza del agua usada	Categórica (alta/media/baja pureza)	Nominal
				Voltaje aplicado al sistema	Voltaje medido durante el proceso	Voltios (V)	Numérica continua
				Estabilidad térmica del sistema	Temperatura máxima registrada en la tarjeta madre	Grados Celsius (°C)	Numérica continua
			VARIABLE DEPENDIENTE	**DIMENSIONES**	**INDICADORES**	**UNIDADES**	**ESCALA DE MEDICIÓN**
			Eficiencia del sistema de electrólisis y producción de hidrógeno	Eficiencia energética	Porcentaje de eficiencia obtenida respecto al voltaje teórico mínimo (1.48 V)	%	Numérica continua
				Producción de hidrógeno	Volumen total de hidrógeno generado en un intervalo de 15 minutos	ml	

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

	Rendimiento operativo del sistema	Amperaje promedio durante el funcionamiento del sistema	A

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



PERU | Presidencia del Consejo de Ministros | INDECOPI

Registro de la Propiedad Industrial

Dirección de Invenciones y Nuevas Tecnologías

TÍTULO Nº 1083

La Dirección de Invenciones y Nuevas Tecnologías del Indecopi certifica que por mandato de la Resolución Nº 003071-2018/DIN-INDECOPI de fecha 27 de Noviembre de 2018, ha quedado inscrita en el Registro de Patentes de Modelos de Utilidad, el siguiente modelo:

Denominación	: GENERADOR DE HIDRÓGENO VEHICULAR
Clasificación	: C25B 1/02; F02B 43/10
Solicitud	: 002725-2017
Fecha de presentación.	: 14 de Setiembre de 2019
Titular(es)	: Elías Cano Del Castillo, José Juarez Dextre
País	: Perú
Inventor(es)	: Elías Cano Del Castillo, José Juarez Dextre
Vigencia	: 14 de Diciembre de 2027

MANUEL CASTRO CALDERÓN
Director de Invenciones y Nuevas Tecnologías
INDECOPI

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

COMITÉ INSTITUCIONAL DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN CON ANIMALES Y BIODIVERSIDAD

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

CONSTANCIA N° 085-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2025

El presidente del Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (CIEI-AB-CIENTÍFICA) da constanciaque el proyecto de investigación, cuyos datos se registran a continuación, ha sido **aprobado**.

Código de registro:	**PRE-11-2025-00009**
Título:	**Determinación de la eficiencia de la electrólisis empleando paneles solares fotovoltaicos para la generación de hidrógeno verde**
Investigador(a):	**Cano del Castillo, Elías**

La aprobación del proyecto de investigación implica que el documento presentado a evaluación cumple con los lineamientos de Universidad en materia de investigación y ética, los cuales se sustentan en la normativa internacional vigente.

En tal sentido, esta aprobación carecerá de valor si es que el proyecto de investigación arriba indicado es modificado de cualquier forma. Toda enmienda, añadido, eliminacióno eventualidad (eventos adversos, etc.) posterior a la fecha de aprobación debe ser reportado al CIEI-AB-CIENTÍFICA.

La vigencia de la aprobación de este documento es de dieciocho (18) meses (**hasta el 14 de noviembre del 2026**), periodo en el que puede desarrollarse el proyecto. Cualquier trámite para su renovación deberá ser enviado antes del término de la vigencia de estedocumento, debiendo suspenderse todo desarrollo hasta que la renovación sea aprobada.

Villa El Salvador 15 de mayo del 2025

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR - UCSUR - Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad

Méd. Vet. Milena Paola Montenegro Veja
Presidenta (e)
Comité Institucional de Ética en
Investigación con Animales y
Biodiversidad

RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N° 083-2025-DACIA-DAFCA-U.CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima, 22 de mayo de 2025

VISTO:
El informe de revisión académica independiente y la aprobación de un Comité de Ética con **N° de Constancia: 085-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2025** del proyecto de tesis titulado: **Determinación de la eficiencia de la electrólisis empleando paneles solares fotovoltaicos para la generación de hidrógeno verde**, presentado por:

- **Elías Cano del Castillo**

CONSIDERANDO:
Que, de acuerdo con el Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el título profesional de **Ingeniero(a) Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, según la modalidad elegida, es necesario la realización y sustentación de una tesis.
Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Decano de la Carrera.

SE RESUELVE:
PRIMERO. Aprobar e inscribir el proyecto de tesis titulado: **Determinación de la eficiencia de la electrólisis empleando paneles solares fotovoltaicos para la generación de hidrógeno verde** con N° de registro: **PRE-11-2025-00009**, y establecer la vigencia de aprobación de este documento de doce (12) meses (hasta el **19 de mayo de 2026)** periodo en el que puede desarrollarse el proyecto de investigación.

SEGUNDO. Nombrar al docente/colaborador **OLGA VADIMOVMA KOSTENKO** como **Asesor** para el desarrollo de la tesis en cuestión.

Regístrese, comuníquese y archívese,

Marie Anne Gálvez Escudero
Decana
Carrera de Ingeniería Ambiental
Universidad Científica del Sur