

Desafíos de la electrólisis para la producción de hidrogeno frente a los retos para generar energía
limpia

Kevin Augusto Ortiz Herrera y Laudy Danitza Espinosa León

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero metalúrgico

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Principalmente quiero dedicar este importante logro a mis padres Claudia Herrera Angarita y Ismael Ortiz Vega quienes me han apoyado en toda esta linda etapa que ya culmina, dándome su amor y apoyo incondicional todos los días de mi vida.

A Sofía Ortiz mi Hermana, por ser mi apoyo, mi refugio. Te quiero con todo mi corazón.

A toda mi familia tíos, tías, primos quienes me vieron crecer y me ayudaron a ser mejor cada día, una dedicatoria especial a Mildred Herrera, Danilo Duran, Cristian Duran, Juan Pablo Barrera y Johan Herrera por todas las experiencias vividas el amor y respeto que siempre nos unió y por siempre hacerme sentir querido.

A todos mis amigos Luis Alvis, Darwin Cárdenas, Mauricio Meza, Jaider Bautista, Evis Corrales, José Fernando, Juan Clavijo, Karoll Vega y Laudy Espinosa: gracias por ser personas maravillosas que llenan mi vida de orgullo. Cada uno de ustedes fue una parte esencial de esta gran aventura, y siempre llevaré con cariño los momentos que compartimos.

Gracias a cada persona que, de alguna manera, ha dejado huella en mi vida. Su apoyo, enseñanzas y momentos compartidos han sido parte esencial de mi camino. A todos, mi gratitud infinita.

ATT: Kevin Ortiz Herrera

A mi madre, quien, aunque no está aquí físicamente, sigue viviendo en mi corazón y en cada paso que doy. Este logro es un reflejo de tu amor y de la fortaleza que me enseñaste.

A familia, por ser mi pilar en todo momento, mi refugio y mi mayor fortaleza. Gracias por creer en mí, por brindarme su apoyo incondicional y por estar siempre ahí, celebrando mis logros y alentándome a seguir adelante. Su amor ha sido el motor que me ha impulsado en cada etapa de este camino.

A mis amigos, Ángel Alvarado, Nayara Rangel, José Cruz, Kevin Ortiz, Yeinner Mejía, Sebastián Noriega y Emerson Buitrago por su compañía durante todo este proceso su apoyo y las palabras de ánimo que me ofrecieron a lo largo de este recorrido. Gracias por estar presentes, compartiendo conmigo momentos de risa, esfuerzo y aprendizaje.

Este logro es gracias a ustedes porque sin su amor y apoyo, no habría sido posible.

Con profunda gratitud ATT: Laudy Danitza

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de tesis, Darío Yesid Peña, por su guía constante, paciencia y dedicación. Sus valiosas observaciones y su apoyo fueron esenciales para la realización de este trabajo. Gracias por compartir su experiencia y por impulsarnos a alcanzar este logro con excelencia.

Extendemos nuestra gratitud a los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales quienes, con su compromiso y pasión por la enseñanza, nos brindaron las herramientas y el conocimiento necesarios para enfrentar los retos académicos. Cada lección impartida no solo enriqueció nuestra formación profesional, sino también nuestra visión del mundo.

A nuestros compañeros, gracias por ser parte de este recorrido. Los momentos de aprendizaje compartido, las discusiones enriquecedoras y los instantes de apoyo mutuo hicieron de este camino una experiencia más significativa.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a nuestro desarrollo académico y personal, les expresamos nuestra más profunda gratitud. Este logro es el resultado de un esfuerzo conjunto y de las enseñanzas y gestos de apoyo que recibimos a lo largo del camino.

Con aprecio y gratitud,

Laudy Espinosa y Kevin Ortiz

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Metodología	15
2.1 Revisión de bibliografía	15
2.1.1 Selección y depuración de la información	15
2.1.2 Evaluación de la relevancia de la literatura consultada para el tema de investigación específico	15
2.1 Análisis comparativo	16
2.2.1 Eficiencia energética.....	16
2.2.2 Durabilidad y vida útil de los electrolizadores	16
2.2.3 Costos.....	16
2.2.4 Proyecciones y recomendaciones	17
2.1 Estudio de caso en Colombia.....	17
2.3.1 Escalabilidad y despliegue a gran escala	17
2.3.2 Integración con energías renovables	18
2.3.3 Uso de energías renovables.....	18
3. Fundamentos teóricos	19
3.1 Propiedades y características del hidrógeno	19
3.1.1 Tipos de hidrógeno	19

3.1.2 Métodos de producción.....	20
3.2 Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia	20
3.2.1 Complicaciones.....	20
3.2.2 Desafíos.....	21
3.3 Comprensión de la electrólisis del agua.....	21
3.4 Tipos de electrólisis del agua.....	22
3.4.1 Electrólisis Alcalina (AEL).....	22
3.4.2 Electrólisis mediante Membrana de Intercambio de Protones (PEM).....	23
3.4.3 Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC)	23
4. Potencial en Colombia	25
5. Estudio de energías renovables en Colombia y su aplicación en la producción de hidrógeno. 27	
5.1 Factores para considerar en la comparativa de costos de producción de hidrógeno	27
5.1.1 Eficiencia de las tecnologías	27
5.1.2 Inversión inicial	27
5.1.3 Costos operativos	27
5.1.4 Disponibilidad y costo de la electricidad.....	28
5.1.5 Electrólisis alcalina (AE).....	28
5.1.6 Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM).....	29
5.1.7 Electrólisis de óxido sólido de alta temperatura (SOEC)	29
5.2 Contexto geográfico y energético de Colombia: Buenaventura y La Guajira	30
6. Análisis de la viabilidad económica de la producción de hidrógeno mediante electrólisis: estudio comparativo en Buenaventura y La Guajira	36
6.1 Costo de producción del hidrógeno	36

6.2 Factores de localización.....	37
6.3 Viabilidad de la electrólisis alcalina (AE) y PEM a largo plazo.	37
6.4 Evaluación de la viabilidad en Buenaventura y La Guajira.....	38
7. Estudio de caso para Colombia: energía renovable en La Guajira	39
7.1 Evaluación de costos y políticas	40
8. Análisis de datos	41
9. Conclusiones	43
10. Recomendaciones para el futuro de la electrólisis en Colombia	44
Referencias Bibliográficas	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Comparativa de los diferentes métodos de hidrólisis de agua</i>	23
Tabla 2. <i>Comparativa de costos de métodos de hidrólisis de agua</i>	32
Tabla 3. <i>Costos de infraestructura de cada tecnología</i>	33
Tabla 4. <i>Comparativa de Viabilidad a 50 Años</i>	33

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Atlas de viento y energía eólica vs atlas de irradiación ultravioleta 305nm</i>	31

Glosario

CAPEX (Capital Expenditure): Gastos de capital necesarios para la instalación y puesta en marcha de una tecnología o infraestructura.

Electrolisis: Descomposición de un elemento en disolución o fundido por acción de una corriente eléctrica continua, que induce reacciones de oxidación-reducción no espontáneas.

Hidrógeno Verde: Hidrógeno producido mediante procesos sostenibles, como la electrólisis alimentada por energías renovables, que no genera emisiones de carbono en su producción.

Hidrógeno Azul: Tipo de hidrógeno generado a partir de combustibles fósiles, acompañado de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

OPEX (Operational Expenditure): Costos operativos asociados al mantenimiento y funcionamiento continuo de una tecnología o sistema.

Resumen

Título: Desafíos de la electrólisis para la producción de hidrógeno frente a los retos para generar energía limpia.*

Autor: Kevin Ortiz Herrera y Laudy Danitza Espinosa León**

Palabras Clave: Electrólisis, hidrógeno, energía limpia

Descripción: La electrólisis es un proceso clave para la producción de hidrogeno verde, esencial para la transición hacia energías limpias. Tecnologías como electrolisis alcalina (AE), de membrana de intercambio protonico (PEM) y oxido sólido (SOEC) ofrecen distintas ventajas y desafíos en términos de eficiencia, costos y sostenibilidad.

Colombia con abundantes recursos renovables, tiene un alto potencial para esta tecnología. La Guajira, con óptimas condiciones eólicas, se perfila como ideal para proyectos competitivos, mientras que Buenaventura enfrenta mayores costos energéticos que limitan su viabilidad.

Los retos incluyen reducir costos de electricidad, mejorar la eficiencia de las tecnologías y fortalecer la infraestructura para transporte y almacenamiento. Políticas públicas que impulsen la inversión y la investigación serán fundamentales para posicionar al hidrogeno verde como un pilar estratégico de la matriz energética nacional y promover un desarrollo sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Darío Yesid Peña. Doctor en Corrosiones.

Abstract

Title: Challenges of electrolysis for hydrogen production versus challenges to generate clean energy*

Author(s): Kevin Ortiz Herrera y Laudy Danitza Espinosa León**

Key Words: Electrolysis, Hydrogen y Clean energy

Description: Electrolysis is a key process in green hydrogen production, vital for the transition to clean energy. Technologies such as alkaline electrolysis (AE), proton exchange membrane (PEM), and solid oxide electrolysis (SOEC) present various advantages and challenges in terms of efficiency, cost, and sustainability.

Colombia with abundant renewable resources, has significant potential for this technology. La Guajira, with excellent wind conditions, stands out as ideal for competitive projects, whereas Buenaventura faces higher energy costs, limiting its feasibility.

Challenges include reducing electricity costs, improving technology efficiency, and strengthening infrastructure for transport and storage. Public policies promoting investment and research will be essential to position green hydrogen as a strategic pillar of the national energy matrix and foster sustainable development

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Darío Yesid Peña. PhD in Corrosions.

Introducción

El hidrógeno se considera un combustible de carácter renovable, su producción por medio de la electrólisis del agua se ha convertido en una de las opciones más relevantes para la generación de la energía sostenible. Sin embargo, este proceso químico enfrenta varios retos de tipo tecnológico y económico que obstaculizan su implementación a escala macro, se puede mencionar entre ellos la reducción de costos de producción la optimización de los electrodos y el manejo de las variables renovables. [1]

Asimismo, se puede mencionar el tema de la competencia con otros métodos de producción del hidrógeno, que debido a múltiples variables dominan la producción mundial del hidrógeno [2]. Existen otros factores relacionados con la logística que son importantes y se deben tener en cuenta, como lo son el almacenamiento y el transporte de hidrógeno; ya que por temas de seguridad, eficiencia y costos; pueden convertirse en un dolor de cabeza para quienes deseen dedicarse a la producción masiva. Sin lugar a duda, la generación de energía sostenible presenta retos adicionales que acompañados con la gestión de la demanda de la energía y la adaptación a los sistemas inteligentes hacen que la transición hacia la economía baja en carbono no sea fácil de sobrellevar, aunque si necesaria [3].

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión del estado del conocimiento sobre el estudio de la producción de energías limpias por medio del proceso de hidrólisis de aguas como una de las mayores fuentes de producción de hidrógeno.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los desafíos actuales que enfrenta la electrólisis para generar hidrógeno en la producción de energía limpia y analizar las posibles soluciones a estos desafíos.

Evaluar la eficiencia, sostenibilidad ambiental y costos de diferentes tecnologías de electrólisis de hidrógeno y su potencial para ser utilizadas a nivel nacional.

2. Metodología

Para el desarrollo de la metodología, se optó por un enfoque estructurado en cuatro etapas fundamentales: identificación, análisis comparativo y análisis de viabilidad en Colombia. Este marco metodológico tiene como objetivo evaluar la factibilidad del proyecto, centrándose en la producción de hidrógeno verde mediante procesos de electrólisis del agua.

2.1 Revisión de bibliografía

La revisión bibliográfica se llevó a cabo con el propósito de recopilar información relevante y actual sobre la electrólisis del agua, con el fin de identificar las tecnologías existentes, sus aplicaciones y los métodos de producción empleados en la generación de hidrógeno verde.

2.1.1 Selección y depuración de la información

Entendiendo la producción de hidrógeno como una técnica clave para el desarrollo de las energías limpias se busca analizar su potencial para contribuir a la sostenibilidad energética usando las fuentes consultadas, se evaluarán los diferentes métodos de producción centrándose en los relacionados con la electrólisis del agua así mismo se estudiarán los beneficios y desafíos asociados a la implementación dentro de la transición hacia un sistema energético más sostenible y eficiente.

2.1.2 Evaluación de la relevancia de la literatura consultada para el tema de investigación específico

Para garantizar la calidad de la investigación realizada sobre la producción de hidrógeno mediante la técnica de electrólisis, cabe anotar que se utilizarán criterios específicos como la pertinencia temática de cada documento, el abordaje de diferentes aspectos técnicos y teóricos, y

el prestigio o credibilidad de las revistas académicas consultadas; finalmente se considerará la documentación publicada en los últimos 10 años con el fin de construir una base documental sólida y esencial para la investigación en desarrollo.

2.1 Análisis comparativo

Un análisis comparativo entre PEM, SOE y AEL ayuda a evaluar los avances tecnológicos encontrados, identificando las ventajas y desventajas de cada tecnología en términos de eficiencia, costos y durabilidad (Wang; Cao; Jiao, 2022)

2.2.1 Eficiencia energética

La comparación energética de los distintos métodos de producción de hidrógeno constituye un factor fundamental en la selección del proceso más adecuado. Además, es esencial analizar factores determinantes como la materia prima y las condiciones operativas, dado su impacto directo en la eficiencia energética del sistema.

2.2.2 Durabilidad y vida útil de los electrolizadores

Los electrolizadores son muy susceptibles al desgaste y la corrosión propia de su utilización, impactando su longevidad y vida útil. Las innovaciones en tema de materiales y sistemas de refrigeración más eficaces son necesarias para mejorar la durabilidad y la operatividad (Wang et al., 2024) (Padgett et al., 2024).

2.2.3 Costos

Una vez comprendidas e identificadas las ventajas y puntos fuertes de cada tecnología de electrólisis del agua, resulta fundamental trasladar estos aspectos al ámbito económico con el objetivo de determinar los costos de operación asociados a cada alternativa. Estrategias como el uso de materiales abundantes en tierra y la optimización de los procesos de fabricación son básicos

para hacer que la electrólisis sea competitiva con los métodos tradicionales (Takanabe, 2024) (Proost, 2024).

2.2.4 Proyecciones y recomendaciones

Se propondrán proyecciones para el futuro y recomendaciones que estén basadas en la revisión de los documentos consultados y juntamente el análisis de los avances tecnológicos realizados, teniendo un enfoque de superación frente a los desafíos ya identificados, contribuyendo así a la industria que pretende hacer del hidrógeno una fuente de energía limpia viable en Colombia y a nivel internacional (Singh; Sehgal, 2024)

2.1 Estudio de caso en Colombia

Se llevará a cabo un estudio de caso específicamente para Colombia, donde se evaluarán las opciones de implementar una planta de generación por electrólisis utilizando fuentes renovables como la energía solar y eólica en regiones claves del país como el departamento de La Guajira. También se analizará la infraestructura existente y las regulaciones para la producción de hidrógeno verde (Osman; Mehta; Elgarahy; Hefny et al., 2022).

2.3.1 Escalabilidad y despliegue a gran escala

Ante el creciente aumento de la demanda de hidrógeno, es crucial abordar los desafíos tecnológicos y la disponibilidad de materias primas en la industria. La implementación de una infraestructura adecuada, alineada con políticas y regulaciones, es esencial para la producción a gran escala mediante electrólisis, una alternativa viable y sostenible. Factores como la eficiencia energética, los costos de producción, la durabilidad de los electrolizadores y la integración con energías renovables representan retos clave para maximizar el potencial de esta tecnología.

En Colombia, la producción de hidrógeno por electrólisis enfrenta desafíos significativos. La eficiencia energética sigue siendo un aspecto crítico, especialmente debido al alto costo de la electricidad. Además, la vida útil de los electrolizadores debe adaptarse a las condiciones climáticas del país, garantizando una operación confiable y sostenible. La integración con fuentes renovables, como la solar y la eólica, requiere una infraestructura de almacenamiento eficiente para optimizar su aprovechamiento.

Dado el crecimiento del mercado del hidrógeno en el país, es fundamental fortalecer la infraestructura, la regulación y el financiamiento para posicionar esta industria dentro de la transición energética. Colombia, con sus abundantes recursos renovables, tiene un gran potencial para la producción de hidrógeno verde, lo que contribuiría significativamente a la sostenibilidad y la transformación del sector energético.

2.3.2 Integración con energías renovables

El carácter intermitente de las fuentes de energía renovables presenta desafíos de gran importancia para la producción de hidrógeno. El desarrollo de las soluciones de almacenamiento adecuadas y el mejoramiento de la integración de los sistemas son vitales para garantizar un suministro estable de hidrógeno (Padgett et al., 2024) (Proost, 2024).

Las investigaciones en curso y los avances tecnológicos recientes son competentes para superarlos, socavando el camino para una economía del hidrógeno más sostenible.

2.3.3 Uso de energías renovables

Colombia tiene un potencial significativo para utilizar sus recursos de energía renovable, particularmente la energía hidroeléctrica (56 GW), la eólica (68 GW) y la energía solar fotovoltaica (8172 GW), para promover la generación de hidrógeno verde a través de la electrólisis. (Patiño; Velásquez; Ramírez; Betancur et al., 2023)

3. Fundamentos teóricos

3.1 Propiedades y características del hidrógeno

Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno se combinan para convertirlo casi en un combustible óptimo para cumplir con estos requisitos cuando se consideran tanto sus usos como aspectos ambientales. Pero estos recursos suelen ser específicos del sitio lo que hace que sea esencial buscar un portador de energía. Por lo tanto, existe la necesidad de obtener un combustible que no solo reemplace a los combustibles fósiles, sino que también sea derivable de recursos energéticos no fósiles, energéticamente eficiente, fácilmente almacenable y transportable a largas distancias, seguro de usar en los sectores residencial, comercial, industrial y de transporte, y ambientalmente aceptable. (R.P. Dahiya,1983).

Debido a su peso ligero y alta densidad de energía, el hidrógeno también es un combustible preferido en aplicaciones espaciales, como combustible limpio en celdas de combustible. Se destacan algunos métodos comunes para la producción industrial de hidrógeno y gas de síntesis, que es una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, y sus usos para la fabricación de variedad de productos químicos y combustibles. Se compara la densidad energética del hidrógeno con algunos de los hidrocarburos comunes como el gas natural y otros combustibles líquidos como metanol y etanol. (H. Idriss,M. Scott,V. Subramani, 2014).

3.1.1 Tipos de hidrógeno

El hidrógeno como fuente de energía se puede clasificar principalmente en hidrógeno verde y azul, cada uno con distintos métodos de producción e impactos ambientales. El hidrógeno verde se produce a través de la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables, resultando en cero emisiones de carbono (Hamed et al., 2023) (Elshafei & Mansour, 2023). En contraste, el

hidrógeno azul se deriva de la reforma del gas natural, junto con la captura y almacenamiento de carbono para mitigar las emisiones, aunque todavía produce algo de dióxido de carbono (Hamed et al., 2023) (Saha et al., 2023).

3.1.2 Métodos de producción

Hidrógeno Verde: Generado vía energía renovable (solar, eólica) a través de electrólisis, convirtiéndola en una fuente de energía limpia con mínimo impacto ambiental (Elshafei & Mansour, 2023) (Zainal et al., 2024).

Hidrógeno Azul: Producido a partir de combustibles fósiles, específicamente gas natural, con tecnologías de captura de carbono para reducir las emisiones (Hamed et al., 2023) (Saha et al., 2023).

3.2 Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia

La producción de hidrógeno verde, obtenido a partir de energías renovables, presenta tanto oportunidades como desafíos a nivel mundial y en Colombia. Aunque ofrece beneficios en términos de descarbonización y desarrollo sostenible, enfrenta desafíos relacionados con costos iniciales, competencia con otras formas de hidrógeno, necesidad de inversiones considerables, desarrollo tecnológico continuo y adaptación a la demanda nacional e internacional (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

3.2.1 Complicaciones

Costos Iniciales Elevados: La transición hacia la producción de hidrógeno verde implica costos iniciales significativos debido a la necesidad de infraestructuras y tecnologías específicas (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

Competencia con Hidrógeno Gris: El hidrógeno verde compite con el hidrógeno gris, que se produce a partir de combustibles fósiles, lo que puede dificultar su adopción inicial debido a diferencias de costos (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

Necesidad de Inversiones: Se requieren grandes inversiones para el desarrollo tecnológico y la creación de infraestructuras necesarias para la producción y distribución del hidrógeno verde (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

3.2.2 Desafíos

Desarrollo Tecnológico: Avanzar en tecnologías de electrólisis y generación renovable es crucial para reducir los costos y aumentar la eficiencia en la producción de hidrógeno verde (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

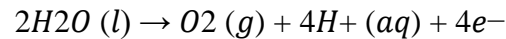
Exportación y Mercado Internacional: Colombia busca posicionarse como líder regional en la transición energética, lo que implica desafíos en términos de exportación y competencia en un mercado global emergente (hoja de ruta del hidrogeno en Colombia).

Demanda Nacional: A medida que se incrementa la demanda de hidrógeno verde, es fundamental adaptar los sectores económicos para su uso, lo que requiere una planificación cuidadosa y grandes inversiones.

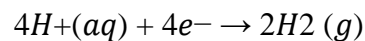
3.3 Comprensión de la electrólisis del agua

La electrólisis del agua implica la disociación de moléculas de agua H_2O en hidrógeno (H_2) y oxígeno O_2 utilizando electricidad. Un electrolizador es el aparato central donde ocurre este proceso. Consiste en dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en una solución electrolítica. Cuando se aplica una corriente continua (CC):

Oxidación en el Ánodo: Las moléculas de agua se oxidan, liberando gas oxígeno, electrones y protones (H⁺).



Reducción en el Cátodo: Los protones viajan a través del electrolito y ganan electrones, formando gas hidrógeno.



3.4 Tipos de electrólisis del agua

Antes de explorar los procesos individuales, es importante destacar que tanto la electrólisis alcalina (AEL) como la electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM) comparten ciertos materiales para electrodos. En ambos procesos se utilizan catalizadores basados en óxidos metálicos como IrO₂ y RuO₂, particularmente para la reacción de evolución de oxígeno (OER) debido a su alta eficiencia y estabilidad (Rothschild; Dotan; Landman; Grader, 2023). Sin embargo, los tres procesos difieren en las configuraciones de sus celdas, los materiales de soporte y las condiciones operativas, lo que influye en su eficiencia y viabilidad comercial.

3.4.1 *Electrólisis Alcalina (AEL)*

En la electrólisis alcalina, el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno en un medio altamente básico, como hidróxido de potasio (KOH). Los electrodos típicos son de níquel, acero inoxidable, o aleaciones de níquel-cromo debido a su resistencia a la corrosión en ambientes alcalinos. El proceso se realiza generalmente a temperaturas de 60-80°C, y la separación de gases se garantiza mediante un diafragma para evitar la mezcla de hidrógeno y oxígeno (Proost, 2024; Mironov, 2023). Este método destaca por su bajo costo de instalación, pero la eficiencia energética es limitada por la baja densidad de corriente.

3.4.2 *Electrólisis mediante Membrana de Intercambio de Protones (PEM)*

La tecnología PEM utiliza una membrana polimérica que permite el paso de protones mientras bloquea el cruce de gases. Se emplean catalizadores como IrO₂ y Pt en el ánodo y cátodo, respectivamente. A diferencia de AEL, el sistema PEM opera a mayores densidades de corriente (1-2 A/cm²) y presiones, lo que permite la producción de hidrógeno comprimido sin necesidad de compresión externa adicional. Sin embargo, la eficiencia de este proceso se ve afectada por los altos costos de los catalizadores y la necesidad de agua ultrapura para evitar daños en la membrana (Praswanto; Djiwo; Palevi, 2023).

3.4.3 *Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC)*

El proceso SOEC utiliza celdas de óxido sólido a altas temperaturas (700-1000°C) para dividir el agua. Esta tecnología permite alcanzar eficiencias superiores al 90% al aprovechar el calor residual, lo que reduce el consumo eléctrico. Los electrodos suelen ser materiales cerámicos, como níquel-óxido de cerio en el cátodo y manganeso en el ánodo. A pesar de su alta eficiencia, la estabilidad de los materiales bajo estas condiciones extremas sigue siendo un desafío crítico para la adopción comercial a gran escala (Rothschild et al., 2023; Mironov, 2023).

Tabla 1.

Comparativa de los diferentes métodos de hidrólisis de agua

Factor	AEL	PEM	SOEC
Electrodos	Níquel, acero inoxidable	IrO ₂ , Pt	Níquel, óxido de cerio, manganeso
Electrolito	Agua + KOH	Agua ultrapura	Oxido de zirconio YSZ
Temperatura operativa	60-80 grados Celsius	30-80 grados Celsius	700-1400 grados Celsius
Presión operativa	Baja	Alta	Media
Precio	Bajo	Alto	Muy alto
Escalabilidad	Alta	Media	Baja

Aplicación ideal	Producción industrial a gran escala	Movilidad y aplicaciones con hidrogeno comprimido	Aplicaciones industriales con acceso a calor residual
Tiempo de producción	Lento	Rápido	Rápido
Nivel de contaminación	Bajo	Muy bajo	Moderado (alta eficiencia, pero en materiales complejos)
Uso con energía limpia	Compatible (eólica e hidroeléctrica)	Compatible (solar y eólica)	Compatible (solar concentrada, energía térmica)
Eficiencia del proceso	65-70%	70-80%	80-90%

Nota. El cuadro es de elaboración propia. Los factores clave, como escalabilidad, nivel de contaminación y aplicaciones ideales, fueron identificados a partir de un análisis comparativo de las principales plantas de electrólisis a nivel mundial.

De la tabla 1 se puede identificar algunas ventajas y desventajas de las tres tecnologías seleccionadas. AEL destaca por su bajo costo y alta escalabilidad, siendo la opción ideal para la producción industrial a gran escala, aunque con un tiempo de producción más lento y una eficiencia algo menor. PEM, por su parte, es más adecuada para aplicaciones de movilidad y la producción de hidrógeno comprimido, con un rendimiento rápido y alta eficiencia, pero a un costo más elevado. Finalmente, SOEC se distingue por su alta eficiencia y la capacidad de aprovechar calor residual, lo que la hace ideal para entornos industriales con acceso a esta fuente de energía, aunque su alto costo y complejidad limitan su uso en proyectos más generales. Sin embargo, los costos de producción y de escalabilidad ya presentan un caso de estudio especial que se ampliara durante el desarrollo del análisis.

4. Potencial en Colombia

Colombia posee un potencial significativo para la implementación de tecnologías de electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM) en la producción de hidrógeno verde, gracias a su abundancia en recursos energéticos renovables y a un marco regulatorio en desarrollo que promueve la transición energética. La ubicación geográfica del país le otorga una ventaja estratégica, especialmente en regiones como La Guajira, que presentan altos niveles de irradiación solar y vientos constantes, ideales para la generación de energía solar y eólica (IADB).

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia ha delineado una Hoja de Ruta del Hidrógeno que establece metas claras para el desarrollo de esta industria. Entre los objetivos se incluye alcanzar una capacidad instalada de electrólisis de entre 1 y 3 gigavatios (GW) para 2030, lo que posicionaría al país como un productor destacado de hidrógeno verde en la región (Hoja de ruta del Hidrogeno). Esta estrategia también busca reducir los costos de producción, proyectando un precio de 1,7 USD/kg en zonas con recursos renovables óptimos (Hoja de ruta del Hidrogeno). En términos de sostenibilidad ambiental, la adopción de tecnologías PEM es favorable debido a su alta eficiencia y menor consumo de agua en comparación con otros métodos de electrólisis. Un estudio realizado por la Universidad de Los Andes destaca que la electrólisis PEM, al operar con fuentes de energía renovable, contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los compromisos internacionales de Colombia en materia de cambio climático (A. Ibáñez 2024).

Financieramente, la implementación de estas tecnologías requiere inversiones considerables. Sin embargo, el gobierno colombiano ha establecido incentivos fiscales y mecanismos de financiación para proyectos de energías limpias. Además, empresas como

Ecopetrol han iniciado proyectos piloto de producción de hidrógeno verde utilizando electrólisis PEM, demostrando el compromiso del sector privado en esta transición (Ecopetrol).

A pesar de estos avances, existen desafíos que deben abordarse para una implementación exitosa. La infraestructura de transporte y almacenamiento de hidrógeno aún es incipiente, y se requiere un marco regulatorio más robusto que incluya estándares de calidad y seguridad para la producción y distribución de hidrógeno verde. La colaboración entre el sector público y privado, así como la inversión en investigación y desarrollo, serán cruciales para superar estos obstáculos y aprovechar plenamente el potencial de Colombia en este ámbito (Hoja de Ruta del Hidrogeno).

El potencial de Colombia para posicionarse como una potencia mundial en la producción de hidrogeno verde es enorme, sin embargo, aunque las proyecciones son alentadoras aún se debe realizar una legislación más clara por parte del gobierno colombiano para no perder las oportunidades de desarrollo en las regiones.

5. Estudio de energías renovables en Colombia y su aplicación en la producción de hidrógeno

En Colombia, el potencial de las energías renovables es un factor clave para el desarrollo de tecnologías limpias como la producción de hidrógeno. El uso de recursos renovables, como la energía eólica y solar, en la técnica de electrólisis, es importante para evaluar su viabilidad en las diferentes regiones del país. Se debe tener en consideración una comparación de las tecnologías que se tiene a disposición para la generación de hidrógeno; considerando parámetros como la eficiencia energética, los costos de inversión, los costos operativos y las características intrínsecas de la energía eléctrica que cómo se vio tiene un rol muy importante en el proceso de conversión.

5.1 Factores para considerar en la comparativa de costos de producción de hidrógeno

5.1.1 Eficiencia de las tecnologías

La energía eléctrica necesaria para la producción determinada de cierta cantidad de hidrógeno cambia según la tecnología de electrólisis empleada.

5.1.2 Inversión inicial

Las diferentes técnicas necesitan distintos niveles de inversión inicial para su instalación y puesta en funcionamiento, según la tecnología usada.

5.1.3 Costos operativos

El mantenimiento de confiabilidad y operación en funcionamiento de cada sistema es variable, afectando los costos en el largo plazo.

5.1.4 Disponibilidad y costo de la electricidad

Teniendo en cuenta que la electrólisis es un proceso de uso intensivo de la electricidad, el costo asociado y la disponibilidad de las fuentes renovables, como la energía solar y eólica, son factores importantes para determinar la competitividad de cada tecnología.

Debido a la cantidad de factores a considerar es esencial que las definiciones previamente establecidas sean ampliadas por lo que se hace un análisis más técnico de las tres tecnologías principales de electrolisis.

5.1.5 Electrólisis alcalina (AE)

Es una de las tecnologías más consolidadas y usadas para la generación de hidrógeno, especialmente en aplicaciones de gran escala. Utiliza una solución alcalina, como el hidróxido de potasio, como electrolito, presenta una eficiencia energética estable, y sus costos de inversión inicial son relativamente bajos en comparación con otras tecnologías. Pero, debido a la menor eficiencia y la necesidad de equipos de gran tamaño, puede ser menos atractiva en contextos donde se cuente con recursos renovables abundantes y se busque maximizar la eficiencia de producción a pequeña o mediana escala. Este método ofrece un enfoque eficiente y sostenible con el fin de generar una fuente de energía verde, de esta manera se garantiza que los componentes críticos que están involucrados en el sistema presenten un control de contrapresión que equilibre la técnica y su funcionamiento. La generación eficiente de hidrógeno verde es un factor clave que contribuye con el almacenamiento energético por medio del uso de fuentes renovables; muchos sectores de la industria dependen de un suministro constante de hidrógeno para sus procesos internos, entre ellos se destaca la industria del amoníaco y la refinación del petróleo.

5.1.6 Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM)

Es una tecnología con mayor avance y potencial de eficiencia que la alcalina se diferencia de igual manera porque permite una mayor densidad de flujo de corriente lo que se traduce en mayor eficiencia energética del proceso. Esta tecnología usa una membrana polimérica como electrolito, lo que la hace más compacta y pertinente para diversas aplicaciones desde la pequeña y mediana escala. Ciertamente presenta una mayor eficiencia en comparación con la electrólisis alcalina, pero su mayor desventaja radica en el alto costo de inversión inicial en el proyecto y la necesidad de materiales más costosos, lo que puede hacer que sea menos competitiva en función de los precios de la electricidad renovable disponibles.

En esta técnica el agua en el hidrógeno juntamente con el oxígeno se dividen utilizando la electricidad, el agua en forma de moléculas llega a un proceso de oxidación para producir oxígeno y el flujo de electrones, lo anterior mientras la membrana de intercambio de protones ejerce un bloqueo en el oxígeno sólo permitiendo el flujo de protones, en cambio los electrones llegan al cátodo usando un circuito externo dónde se combinan con los protones de la membrana generando el gas hidrógeno; la eficiencia del proceso está determinada en su gran mayoría por esta membrana que es la que asegura la pureza del hidrógeno. Las industrias que normalmente utilizan este proceso requieren que el hidrógeno tenga una alta pureza, entre ellas se destaca la industria química, la de los fertilizantes u otro sector que requiera energía limpia y confiable; cabe anotar que en este proceso de hidrógeno puede almacenarse y transformarse usando combustible lo que equilibra la oferta y la demanda en el mercado energético.

5.1.7 Electrólisis de óxido sólido de alta temperatura (SOEC)

Por último, la electrólisis de óxido sólido de alta temperatura es la tecnología que proporciona la mayor eficiencia energética de las tres mencionadas en el documento. Este proceso

se lleva a cabo a altas temperaturas, lo que permite aprovechar el calor residual de otras fuentes térmicas para mejorar su rendimiento.

Aunque esta tecnología aún se encuentra en una etapa de desarrollo más temprana y es menos común que las otras dos, su capacidad para utilizar calor residual la convierte en una opción prometedora en lugares donde este tipo de energía está disponible, lo que podría ser el caso de algunas regiones colombianas con acceso a fuentes térmicas o industriales. Su mayor debilidad es que el electrodo presenta un tiempo de vida útil o durabilidad bastante bajo; esto se debe principalmente al manejo de altas temperaturas que es necesario para lograr un mayor potencial de eficiencia energética, aún con esto se ha determinado que, dentro de los procesos industriales, esta técnica es la que conlleva a una mayor flexibilidad en operación ya que es sencillo aumentar o disminuir el margen de producción usando la fuente de energía renovable.

5.2 Contexto geográfico y energético de Colombia: Buenaventura y La Guajira

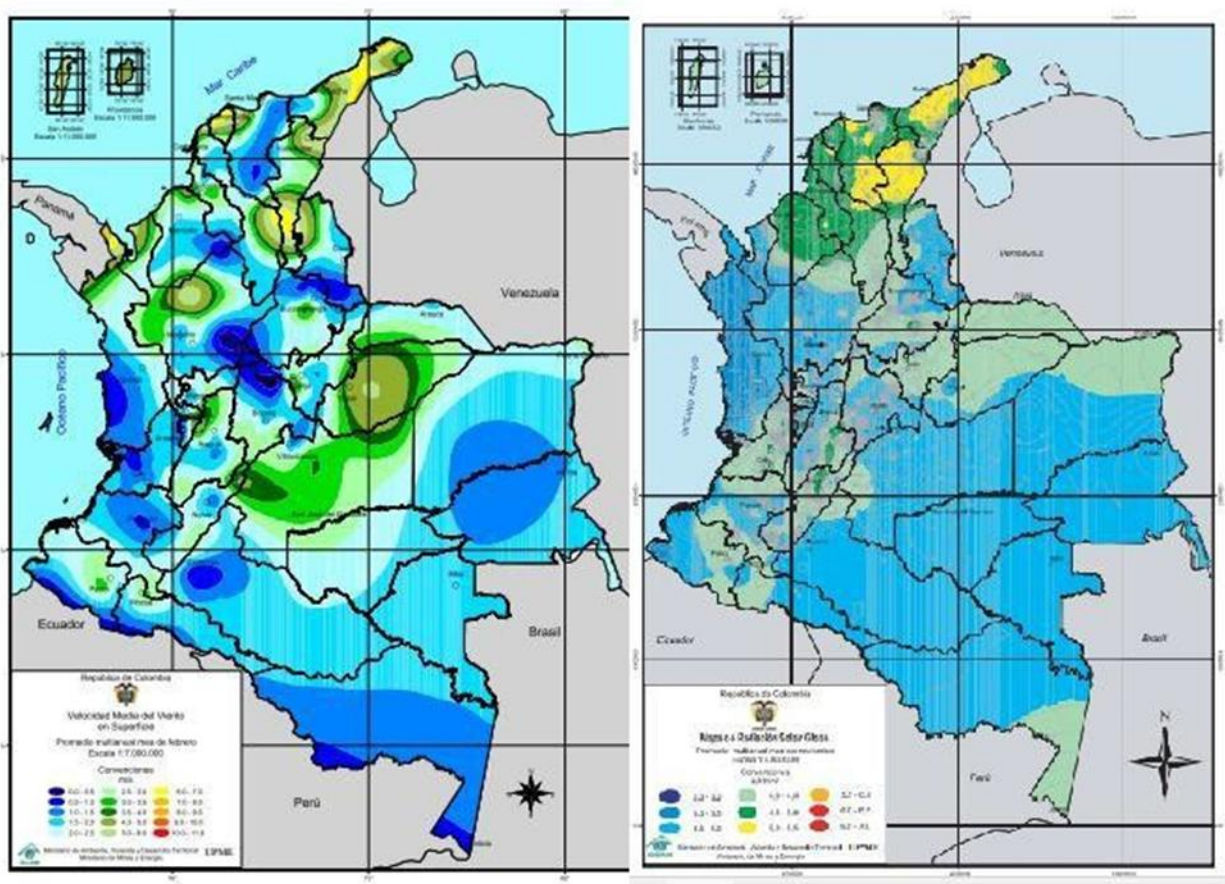
El análisis de las tecnologías de electrólisis en Colombia debe considerar las características geográficas y energéticas específicas de diversas regiones del país. Zonas como La Guajira y Buenaventura tienen un alto potencial para la generación de energía renovable, especialmente en términos de energía eólica en La Guajira y energía solar en Buenaventura, lo que las convierte en lugares clave para la implementación de proyectos de producción de hidrógeno.

La Guajira es reconocida por sus excepcionales condiciones para la generación de energía eólica, lo que la posiciona como un sitio óptimo para la instalación de tecnologías de electrólisis, particularmente aquellas que puedan aprovechar grandes volúmenes de electricidad eólica para la producción de hidrógeno.

Buenaventura, por su parte, se beneficia de un clima favorable para la generación de energía solar, lo que podría hacerla una región adecuada para el uso de tecnologías como la electrólisis alcalina o PEM, en función de la escala de producción y la accesibilidad de los recursos energéticos renovables disponible.

Figura 1.

Atlas de viento y energía eólica vs atlas de irradiación ultravioleta 305nm



Nota. Tomado de *Atlas de radiación solar de Colombia*, por Upme, 2019, Ministerio de Energías

En la figura se muestra el Atlas de Vientos de Colombia, que presenta una visión general de la velocidad y dirección del viento en diferentes regiones del país. En específico, se puede observar que la Guajira presenta velocidades de viento promedio de 9,5 m/s, lo que la convierte

en una de las zonas más ventosas del país. Esta característica la hace ideal para la generación de energía eólica. Por otro lado, Buenaventura presenta velocidades de viento promedio de 6,5 m/s, lo que también es adecuado para la generación de energía eólica, esta a su vez muestra el Atlas de Irradiaciones Ultravioleta de Colombia, que presenta una visión general de la irradiación solar en diferentes regiones del país. En específico, se puede observar que la Guajira recibe una irradiación solar promedio de 2.400 kWh/m²/año, lo que la hace ideal para la generación de energía solar. Por otro lado, Buenaventura recibe una irradiación solar promedio de 2.200 kWh/m²/año, lo que también es favorable para la generación de energía solar.

Tabla 2.

Comparativa de costos de métodos de hidrólisis de agua

Tecnología	Eficiencia	Inversión	Operación	Costo de producción de H	Vida útil	Clave
		CAPEX	OPEX			
Electrólisis Alcalina (AE)	60-70%	USD 110 - 1,800/kW	10-15% del CAPEX	USD 3 - 5/kg de hidrógeno	20-30 años	Más económico en CAPEX y OPEX; Viable en La Guajira con energía eólica barata; Menor eficiencia que PEM y SOEC
PEM	70-80%	USD 2,800 – 5,600/kW	15-25% del CAPEX	USD 4 - 6/kg de hidrógeno	15-20 años	Mayor eficiencia que la Alcalina; Costo de inversión más alto; Apto para aplicaciones de pequeña y mediana escala
SOEC	80-90%	USD 4,000 - 8,000/kW	20-30% del CAPEX	USD 2.5 - 4/kg de hidrógeno	10-15 años	Alta eficiencia; Necesita calor residual para mejorar costos; Alto CAPEX y tecnología en desarrollo; Viable a largo plazo en industrias

Nota. Tomado de *Electrólisis del agua*, Ministerio de Energías, s.f.

Tabla 3.*Costos de infraestructura de cada tecnología*

	Capex	Costo adicional	Tamaño de planta	Comentarios
Electrólisis Alcalina (AE)	USD 110 - 1,800/kW	- Sistema de distribución de energía, almacenamiento de hidrógeno, sistemas de control y monitoreo.	Planta de gran escala (50 MW o más)	Costo más bajo de CAPEX, adecuado para proyectos a gran escala, aprovechando energía renovable de bajo costo en La Guajira. Menor complejidad tecnológica.
PEM	USD 2,800 - 5,600/kW	Sistema de distribución de energía, almacenamiento de hidrógeno, sistemas de control y monitoreo, infraestructura más costosa para el mantenimiento de los electrodos y membranas.	Planta de mediana a pequeña escala (10 - 50 MW)	Mayor CAPEX debido a los materiales y componentes más caros; Mayor eficiencia, pero costos de operación más altos.
SOEC	USD 4,000 - 8,000/kW	Sistema de distribución de energía, almacenamiento de hidrógeno, sistemas de control y monitoreo, infraestructura de soporte térmico (calor residual) para mejorar la eficiencia.	Planta industrial de gran escala (50 MW o más)	Alto CAPEX debido a la tecnología de alta temperatura, pero con gran eficiencia. Necesita infraestructura térmica adicional para maximizar eficiencia.

Nota. Tomado de *Electrólisis del agua*, Ministerio de Energías, s.f.

Tabla 4.*Comparativa de Viabilidad a 50 Años*

Aspecto	Electrólisis Alcalina (AE)	Electrólisis PEM
Vida útil estimada	30+ años (posiblemente más con buen mantenimiento)	15-20 años (requiere más mantenimiento)
Eficiencia a largo plazo	Ligeramente decreciente, pero estable	Alta eficiencia inicialmente, pero puede decrecer más rápidamente
Costos operativos (OPEX)	Estables, bajos a largo plazo	Más altos debido a reemplazos frecuentes de componentes
Mantenimiento	Bajo, con reemplazos menos frecuentes	Alto, con frecuencia de reemplazo de membranas y otros componentes
Costo total a 50 años	Más bajo, debido a menores costos operativos y de mantenimiento	Más alto debido a la necesidad de reemplazos y mayor mantenimiento

Nota. Tomado de *Su guía sobre las tecnologías de producción de hidrógeno*, por Copco, 2023, Atlas.

Teniendo en cuenta la información anteriormente proporcionada se toma que, a lo largo de cincuenta años de uso, la tecnología de electrólisis alcalina (AE) ha demostrado ser una opción económicamente viable debido a su favorable balance de costos en el tiempo. Una de sus

principales ventajas es la duración prolongada de su vida útil, que puede superar los 30 años. Esta longevidad permite que los costos asociados con el mantenimiento y los reemplazos de componentes sean considerablemente bajos. Además, se debe mencionar que los costos operativos (OPEX) de la AE se mantienen a la baja a lo largo de su ciclo de vida útil, lo que favorece su sostenibilidad económica en el largo plazo.

En contraste, la electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM), aunque inicialmente ofrece una mayor eficiencia, presenta desafíos económicos a medida que la planta envejece. El alto costo de mantenimiento y la necesidad de reemplazar con mayor frecuencia componentes críticos, como las membranas, pueden resultar en un aumento significativo de los gastos operativos. Estos factores hacen que la tecnología PEM sea menos rentable en el largo plazo en comparación con la electrólisis alcalina.

6. Análisis de la viabilidad económica de la producción de hidrógeno mediante electrólisis: estudio comparativo en Buenaventura y La Guajira

La producción de hidrógeno mediante electrólisis es una tecnología prometedora para la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Sin embargo, su viabilidad económica depende en gran medida del costo de la electricidad utilizada en el proceso, el cual varía según la región geográfica y la fuente de energía disponible. En este contexto, la electrólisis alcalina (AE) y la electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM) son dos de las tecnologías más relevantes, cada una con sus ventajas y desventajas en términos de costos operativos y de mantenimiento. Este trabajo tiene como objetivo analizar la viabilidad económica de la producción de hidrógeno mediante electrólisis en dos regiones colombianas: Buenaventura y La Guajira, tomando en cuenta factores como el costo de la electricidad y las características específicas de cada tecnología.

6.1 Costo de producción del hidrógeno

El costo de producción de hidrógeno a partir de electrólisis depende fundamentalmente del costo de la electricidad utilizada en el proceso. En regiones con acceso a fuentes de energía económicas, como la energía eólica en La Guajira, el costo de producción puede reducirse significativamente. En este caso, se estima que el costo de producción de hidrógeno mediante electrólisis podría situarse entre USD 3 y 5 por kilogramo si se emplea electricidad barata. Este costo se ve influenciado principalmente por el precio de la electricidad en la región y la eficiencia de las tecnologías de electrólisis utilizadas.

6.2 Factores de localización

La localización geográfica juega un papel crucial en la competitividad económica de la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Las características de la infraestructura eléctrica y el acceso a fuentes de energía renovable a bajo costo son determinantes en la viabilidad económica de la tecnología.

Buenaventura: En esta región, se prevé que los costos de electricidad sean más elevados debido a la infraestructura eléctrica existente, lo que podría impactar negativamente en los costos de producción de hidrógeno. La falta de acceso a fuentes de energía renovable económica limita la competitividad de la producción de hidrógeno en esta área, especialmente en comparación con otras regiones con acceso a energía eólica o solar de bajo costo. (Li et al., 2024)

La Guajira: Por el contrario, La Guajira se destaca como una región favorable para la producción de hidrógeno, debido a su abundante recurso eólico y a los precios bajos de la electricidad generada a partir de esta fuente. En proyectos de gran escala, la energía eólica en La Guajira puede costar menos de USD 0.03/kWh, lo que posiciona a esta región como una de las más competitivas para la producción de hidrógeno a partir de electrólisis, especialmente con tecnologías que dependen intensamente del costo de la energía. (Rueda-Bayona et al., 2019)

6.3 Viabilidad de la electrólisis alcalina (AE) y PEM a largo plazo.

A lo largo de un periodo de 50 años, la electrólisis alcalina (AE) se presenta como una opción más viable en términos de costo total. Esta tecnología ofrece una vida útil prolongada, superior a los 30 años, lo que permite reducir los costos asociados con el mantenimiento y la sustitución de componentes (Bernat et al., 2024). Además, sus costos operativos (OPEX) se

mantienen relativamente bajos a lo largo del tiempo, lo que contribuye a su sostenibilidad económica.

Por otro lado, aunque la electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM) ofrece una mayor eficiencia energética en las fases iniciales de operación, su alto costo de mantenimiento y la necesidad de reemplazar componentes clave, como las membranas, con mayor frecuencia, pueden incrementar los costos operativos a largo plazo. Estos factores afectan su rentabilidad a medida que la planta envejece, lo que puede hacerla menos competitiva en términos de costos a largo plazo en comparación con la AE. (Li et al., 2024)

6.4 Evaluación de la viabilidad en Buenaventura y La Guajira

La Guajira: Esta región es la más favorable para la implementación de tecnologías de electrólisis debido a la disponibilidad de energía eólica a bajo costo. La electrólisis alcalina se perfila como la opción más atractiva en esta región, aunque la tecnología PEM también podría ser competitiva, especialmente en aplicaciones donde se busque una mayor eficiencia. La electrólisis de oxígeno sólido (SOEC), a pesar de su alto costo inicial (CAPEX), podría ser una opción interesante para proyectos industriales que puedan aprovechar el calor residual, mejorando la eficiencia del proceso. (Perlaza-Muriel et al., 2024)

Buenaventura: En Buenaventura, la falta de acceso a electricidad barata limita la competitividad de las tecnologías de electrólisis. La electrólisis alcalina (AE) parece ser la opción más viable a corto plazo, dada su eficiencia en términos de costos operativos. Sin embargo, la tecnología PEM podría ser viable en aplicaciones de pequeña escala, siempre que se logren optimizar los costos operativos y se utilicen estrategias que minimicen el impacto de los costos de mantenimiento. (Perlaza-Muriel et al., 2024)

7. Estudio de caso para Colombia: energía renovable en La Guajira

Colombia tiene un enorme potencial para el desarrollo del hidrógeno verde debido a sus recursos naturales en energía solar y eólica, especialmente en La Guajira. Esta región posee características únicas: fuertes vientos durante todo el año y una alta irradiación solar, lo que la convierte en un sitio ideal para la producción continua de hidrógeno. Además, la combinación de ambas fuentes mitiga los problemas de intermitencia, asegurando un suministro más estable de energía para los electrolizadores tipo PEM o SOE (Fraunhofer ISE, 2023; DOAJ, 2023).

Los estudios realizados sugieren que La Guajira podría alcanzar costos competitivos de hidrógeno verde para 2050, con precios entre 0.96 y 1.5 USD/kg, gracias al aprovechamiento de estas fuentes renovables. Este factor podría posicionar a Colombia como un líder en la exportación de hidrógeno a nivel regional e internacional, reforzando sus capacidades logísticas con la cercanía al puerto de Buenaventura (Fraunhofer ISE, 2023). Los factores a tener en cuenta para la elección de la zona son “la cercanía con recursos naturales, la conectividad con el sistema de transmisión de energía, el tráfico, condiciones geográficas, condiciones ambientales y sociales” (Jun et al., 2014). Si bien la energía hidroeléctrica sigue siendo la fuente predominante de generación de electricidad en Colombia, el departamento de La Guajira se distingue por una deficiencia en los recursos hídricos, lo que resulta en una capacidad disminuida o inexistente para producir este tipo de energía. A pesar de las limitaciones asociadas con la generación de energía hidroeléctrica, La Guajira posee fuentes alternativas de energía renovable, incluidas la energía solar y eólica. Este departamento presenta niveles elevados de radiación solar y velocidades del viento que, si se combinan con la existencia de terrenos extensos y relativamente planos, representan un potencial sustancial para el avance de estas formas de energía. (Ojeda Camargo et al., 2017).

7.1 Evaluación de costos y políticas

El Plan de Hidrógeno de Colombia destaca la importancia de establecer alianzas estratégicas con actores internacionales como la Fundación H2Global, facilitando así el desarrollo de infraestructuras de transporte y almacenamiento, necesarias para integrar esta nueva industria con el mercado internacional (Fraunhofer ISE, 2023).

La región de La Guajira presenta un notable potencial para consolidarse como un centro estratégico en la producción de hidrógeno verde, debido a la abundancia de sus recursos naturales y su capacidad para generar energía renovable de manera continua y estable. Sin embargo, para que este potencial se materialice de forma efectiva, resulta imprescindible el desarrollo de políticas públicas adecuadas que impulsen la inversión y el crecimiento del sector. Asimismo, es crucial establecer alianzas internacionales que faciliten la creación de la infraestructura necesaria para la producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno, así como su posterior exportación. La superación de estos desafíos permitiría a Colombia posicionarse como un actor clave en el mercado global de hidrógeno verde, consolidando su liderazgo en la transición energética mundial.

8. Análisis de datos

La tecnología de electrólisis alcalina (AEL) es ampliamente considerada como la opción más viable para proyectos de producción de hidrógeno a gran escala en Colombia, particularmente en regiones como La Guajira. Entre sus principales beneficios se encuentran costos reducidos tanto en instalación como en operación, una durabilidad notable que puede superar los 30 años y una alta capacidad de escalabilidad que la hace ideal para aplicaciones industriales. Aunque su eficiencia energética es algo menor en comparación con otras alternativas, su sostenibilidad económica y compatibilidad con fuentes de energía renovable de bajo costo, como la energía eólica, consolidan su posición como la opción tecnológica preferida.

En contraste, la electrólisis con membranas de intercambio protónico (PEM) destaca por su mayor eficiencia inicial y su adaptabilidad a aplicaciones de menor escala. No obstante, los elevados costos de instalación y la frecuente necesidad de reemplazar componentes críticos, como las membranas, afectan significativamente su competitividad económica en el largo plazo. Por su parte, la electrólisis de óxido sólido (SOEC) ofrece una eficiencia energética superior y la ventaja de aprovechar el calor residual, pero su desarrollo tecnológico incipiente, los altos costos iniciales y los problemas de durabilidad limitan su aplicación a contextos industriales específicos y proyectos altamente especializados.

Las mejores condiciones para la implementación de estas tecnologías se encuentran en regiones con abundantes recursos renovables. La Guajira, gracias a su potencial en energía eólica, permite alcanzar costos eléctricos extremadamente bajos y mejora la viabilidad de proyectos de gran escala que empleen electrólisis alcalina. Asimismo, Buenaventura ofrece posibilidades interesantes al contar con energía hidroeléctrica y solar, aunque estas condiciones son más

adecuadas para proyectos de mediana escala. Para garantizar el éxito en estas iniciativas, es fundamental desarrollar infraestructura adecuada para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, establecer incentivos fiscales que reduzcan los costos iniciales y fomentar colaboraciones entre sectores público y privado que impulsen la inversión y el crecimiento del sector.

A pesar del gran potencial de la electrólisis alcalina, se deben superar diversos desafíos para su implementación efectiva. Los costos iniciales continúan siendo elevados, lo que hace necesario un apoyo financiero mediante subvenciones y mecanismos de financiación adecuados. Además, la intermitencia de las fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar, puede interrumpir el suministro eléctrico continuo, requiriendo soluciones avanzadas de almacenamiento de energía. También es crucial fortalecer el marco regulatorio con normas claras que aseguren la calidad, seguridad y eficiencia del hidrógeno verde producido. Desde una perspectiva tecnológica, resulta esencial optimizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los electrolizadores a través del desarrollo de materiales avanzados y la mejora de los procesos operativos.

9. Conclusiones

La electrólisis se perfila como clave en la transición hacia una matriz energética sostenible en Colombia. La electrólisis alcalina destaca como la opción más rentable para proyectos grandes, especialmente en regiones como La Guajira, por su integración con energías renovables como la eólica. Sin embargo, Buenaventura enfrenta limitaciones por altos costos eléctricos.

La tecnología PEM, aunque eficiente, se restringe a pequeña escala debido a sus altos costos y necesidades de mantenimiento, mientras que la electrólisis SOEC, pese a su eficiencia energética, enfrenta barreras tecnológicas y económicas.

Para promover el hidrógeno verde en Colombia, se requiere fortalecer la infraestructura energética, fomentar la innovación y establecer políticas públicas que reduzcan las barreras económicas e impulsen la inversión.

10. Recomendaciones para el futuro de la electrólisis en Colombia

Es crucial crear un marco regulatorio claro y consistente que brinde seguridad jurídica a los inversionistas y promueva el desarrollo del sector del hidrógeno. Establecer metas de producción ambiciosas contribuirá a generar un entorno competitivo y facilitará la transición energética.

Además, es fundamental ofrecer incentivos financieros, como exenciones fiscales y créditos, para proyectos relacionados con la producción de hidrógeno. Estos apoyos permitirán reducir la barrera de entrada para nuevas tecnologías y atraerán inversiones estratégicas.

Para mejorar la eficiencia en la electrólisis alcalina, se recomienda realizar estudios detallados sobre recubrimientos de cobalto y tungsteno, ya que estos materiales podrían optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de los electrolizadores, mejorando así la viabilidad económica del proceso.

Referencias Bibliográficas

- Bernat, R., Milewski, J., Dybinski, O., Martsinchyk, A., & Shuhayeu, P. (2024). Review of AEM Electrolysis Research from the Perspective of Developing a Reliable Model. *Energies*, 17(20), 5030. <https://doi.org/10.3390/en17205030>
- Copco, A. (2023, 18 octubre). Su guía sobre las tecnologías de producción de hidrógeno. Atlas Copco. <https://www.atlascopco.com/es-co/compressors/wiki/compressed-airarticles/electrolyzers-as-hydrogen-production-technologies>
- El grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia. (2022, 18 marzo). Ecopetrol. Recuperado 5 de abril de 2024, de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias%2B2021/el-grupo-ecopetrol-inicip-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia>
- Elshafei, A. M., & Mansour, R. (2023). Green Hydrogen as a Potential Solution for Reducing Carbon Emissions: A Review. *Journal of Energy Research and Reviews*. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i2257>
- Energy Sources for Green Hydrogen Generation in Colombia and Applicable Case of Studies. *Energies*, v.16, n. 23, DOI: 10.3390/en16237809.
- H., Idriss., M., Scott., V., Subramani. (2014). 1 – Introduction to hydrogen and its properties. 3-19. doi: 10.1016/B978-1-78242-361-4.00001-7
- Hamed, A. M., Kamaruddin, T. N. A. T., Ramli, N., & Abdul-Wahab, M. F. (2023). A review on blue and green hydrogen production process and their life cycle assessments. *IOP Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1281/1/012034>
- Li, C., Stracensky, T., Slenker, B., Gupta, A., Yang, Z., & Xu, H. (2024). Performance Optimization of Alkaline Water Electrolysis Via Catalyst Morphology Tuning and Novel

- Cell Design. Meeting Abstracts/Meeting Abstracts (Electrochemical Society. CD-ROM), MA2024- 01(34), 1825. <https://doi.org/10.1149/ma2024-01341825mtgabs>
- Li, Y., Hu, Y., Xiao, M., Yao, Y., & Lv, H. (2024). Performance investigation of cross- regional utilization and production of renewable hydrogen. *Applied Thermal Engineering*, 243, 122567. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122567>
- Mehtab, A., Ali, S. A., Sadiq, I., Shaheen, S., Khan, H., Fazil, M., Pandit, N. A., Naaz, F., & Ahmad, T. (2024). Hydrogen Energy as Sustainable Energy Resource for Carbon-Neutrality Realization. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00039>
- MIRONOV, E. A. Modelling and control of hydrogen production processes based on electrolysis. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 31, n. 2, p. 70-84, 2023/08/01 2023.
- OSMAN, A. I.; MEHTA, N.; ELGARAHY, A. M.; HEFNY, M. et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, n. 1, p. 153-188, 2022/02/01 2022.
- Padgett, E., Badgett, A., Brauch, J., Kreider, M. E., Volk, E. E., Alia, S. M., Shviro, M., & Pivovar, B. S. (2024). (Invited) Comparing and Contrasting the Advantages and Challenges of Catalysts for Low Temperature AEM, AEL, and PEM Electrolysis.Meeting Abstracts. <https://doi.org/10.1149/ma2024-01341776mtgabs>
- PATÍÑO, J. J.; VELÁSQUEZ, C.; RAMIREZ, E.; BETANCUR, R. et al. Renewable Perlaza-Muriel, J. F., Rivas-Cifuentes, M. C., Escobar, N. M., & Osorio-Gómez, J. C. (2024). Prospective Environmental Evaluation of Green Hydrogen Generation in the Colombian Northern Region Using Wind Energy and System Dynamics. *Modelling And Simulation In Engineering*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/9510646>

- Proost, J. (2024). (Invited) Techno-Economic Aspects of Hydrogen Production from Water Electrolysis.Meeting Abstracts. <https://doi.org/10.1149/ma2024-01341735mtgabs>
- PROOST, J. (Invited) Techno-Economic Aspects of Hydrogen Production from Water Electrolysis. ECS Meeting Abstracts, MA2024-01, n. 34, p. 1735, 2024/08/09 2024.
- R.P., Dahiya., Ami, Chand. (1986). Utilisation of Hydrogen for Domestic, Commercial and Industrial Applications. 179-194. doi: 10.1007/978-94-009-3809-0_12
- ROTHSCHILD, A.; DOTAN, H.; LANDMAN, A.; GRADER, G. (Invited) Decoupled
- Rueda-Bayona, J. G., Guzmán, A., Eras, J. J. C., Silva-Casarín, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology. Journal Of Cleaner Production, 220, 529-543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174>
- S. M., Islam, Md. K., Hasan, Md. M., Vo, D.-V. N., Aziz, A. A., Hossain, Md. J., & Akter, R. (2023). Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy.International Journal of Green Energy. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2244583>
- Saha, P., Akash, F. A., Shovon, S. M., Monir, M. U., Ahmed, M. T., Khan, M. M. H., Sarkar, SINGH, B. J.; SEHGAL, R. Green Hydrogen Production: Bridging the Gap to a Sustainable Energy Future. In: SINGH, P.;AGARWAL, A. K., et al (Ed.). Challenges and Opportunities in Green Hydrogen Production. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 83-124.
- Takanabe, K. (2024). (Invited) Electrolyte Engineering for Disruptive Cost Reduction of Electrolyzer: Hydrogen Generation from Dense Carbonate Buffer Solution.Meeting Abstracts. <https://doi.org/10.1149/ma2024-01351937mtgabs>

- Team, S. (2024, 21 agosto). Generador de Hidrógeno PEM vs. Generador de Hidrógeno Alcalino. SENZA Hydrogen Energy And Environmental Technology Co., Ltd. <https://senzahydrogen.com/es/pem-hydrogen-generator-vs-alkaline-hydrogen-generator-es/>
- Upme, I. (2019, 27 mayo). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Ministerio de Energías. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2414>
- WANG, T.; CAO, X.; JIAO, L. PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, 1, n. 1, p. 21, 2022/06/02 2022.
- Water Splitting for Green Hydrogen Production: Reshaping Water Electrolysis. ECS Meeting Abstracts, MA2023-01, n. 36, p. 1973, 2023/08/28 2023.
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H. G. E. H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>