

**"HIDRÓGENO VERDE EN PERÚ: POTENCIAL, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES  
PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE"**

**TURPO, Pequena Deyson Alexander.**  
dat.pequena.2016@aluno.unila.edu.br;

**GARCIA-ACEVEDO, Luis Evelio**  
luis.acevedo@unila.edu.br

**Universidad Federal de Integración Latinoamericana.**

**Resumen.**

Este trabajo analiza las condiciones técnicas, regulatorias y socioeconómicas que influyen en el desarrollo de un nuevo vector energético en el Perú. A partir de un enfoque comparativo con la experiencia brasileña, se identifican ventajas y limitaciones del contexto nacional en términos de disponibilidad de recursos, marco normativo e infraestructura. Se presentan escenarios de aplicación en sectores estratégicos como la minería, el transporte y la industria química, así como proyecciones económicas vinculadas al costo nivelado de producción. Finalmente, se proponen estrategias para mejorar la competitividad nacional, considerando la necesidad de inversiones, innovación tecnológica y políticas públicas que impulsen una transición energética inclusiva y resiliente.

**Palabras Clave:** *Transición Energética, Producción descentralizada, Costo Nivelado, Regulación Energética, Aplicaciones Industriales.*

**Abstract.**

This paper analyzes the technical, regulatory, and socioeconomic conditions that influence the development of a new energy vector in Peru. Based on a comparative approach with the Brazilian experience, it identifies the advantages and limitations of the national context in terms of resource availability, regulatory framework, and infrastructure. Application scenarios are presented in strategic sectors such as mining, transportation, and the chemical industry, as well as economic projections linked to the levelized cost of production. Finally, strategies are proposed to improve national competitiveness, considering the need for investment, technological innovation, and public policies that promote an inclusive and resilient energy transition.

**Keywords:** *Energy Transition, Decentralized Production, Levelized Cost, Energy Regulation, Industrial Applications.*

## INDICE

INDICE	1
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Esfuerzos globales de mitigación.	3
1.2 Perú y Brasil en la ruta de la reducción de emisiones	4
1.3 Justificativa	7
2 OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3 FUNDAMENTACIÓN	8
3.1 El hidrogeno de baja emisión	9
3.2 Tecnologías para la Producción y Uso del hidrógeno: Electrolizadores y Celdas de combustible	12
3.2.1 Electrolizadores	12
3.2.2 Células de combustible	12
3.3 Hidrógeno e integración sectorial: Concepto P-t-X (Power-to-X)	13
3.4 Escenario local Perú Brasil	14
3.5 Crecimiento y Distribución de Proyectos de Hidrógeno en Perú	16
4 METODOLOGIA	21
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES	25
5.1 Aspectos climáticos, energéticos y sociales asociados a la transición energética en Perú.	25
5.1.1 Aspectos Climáticos: Vulnerabilidad y Cambio Climático en Perú	26
5.1.2 Aspectos Energéticos: Dependencia de Energías No Renovables y Potencial para la Transición	26
5.1.3 Aspectos Sociales: Impactos de la Transición Energética	29
5.2 Marco regulatorio y las políticas públicas relacionadas con la producción y uso del hidrógeno verde en el país.	29
5.3 Comparación del potencial renovable de la matriz energética y la producción de hidrógeno renovable en Perú con otros países de la región, especialmente Brasil.	31
5.3.1 Potencial Renovable de Perú	31
5.3.2 Producción de Hidrógeno de Baja Emisión en Perú	32
5.3.3 Comparativa con Brasil	32
5.3.4 Comparativa Regional	32
5.3.5 Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	35
5.4 Casos de éxito en otros países donde ya se produce hidrógeno verde	37
5.4.1 Alemania: Pionero en el Desarrollo del Hidrógeno Verde	37
5.4.2 Chile: Liderazgo Regional en Hidrógeno Verde	38
5.4.3 Australia: Potencial para Producción y Exportación de Hidrógeno Verde	38
5.4.4 Lecciones para Perú	38
5.5 Nichos de aplicación para la electrificación y el hidrógeno verde.	39
5.5.1 Sectores estratégicos para la aplicación del hidrógeno verde	39
5.5.2 Aplicaciones Potenciales del Hidrógeno Verde en Perú	41
5.6 Potencial de las principales fuentes renovables disponibles en Perú para la producción de hidrógeno.	43
5.6.1 Potencial Solar	43
5.6.2 Potencial Eólico	43
5.6.3 Potencial Hidroeléctrico	44
5.6.4 Potencial Geotérmico	45
5.7 Viabilidad de las tecnologías actuales de electrólisis, análisis económico de costos y beneficios de la producción de hidrógeno verde en Perú y Evaluación del potencial geográfico	45
5.7.1 Viabilidad de las Tecnologías de Electrólisis	45
5.7.2 Análisis Económico de Costos y Beneficios	46

5.7.3	Evaluación del Potencial Geográfico del Perú por región	50
		50
5.7.4	LCOH por Tecnología de Electrólisis y por Región	51
5.8	Análisis de la variabilidad del costo de electricidad en Perú y su impacto en el LCOH	52
6	CONCLUSIONES	59
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

# 1 INTRODUCCIÓN

En 25 de julio de 2024, el secretario general de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) hizo un llamado para realizar un esfuerzo urgente y concertado con el fin de mejorar la cooperación internacional para hacer frente al calor extremo [NU, 2024]. En este llamado se propone trabajar en 4 áreas críticas como lo son: velar por los más vulnerables, proteger a los trabajadores, estimular la resiliencia de las economías y las sociedades mediante el uso de datos y la ciencia, y, por último, limitar el aumento de la temperatura 1.5 °C mediante la eliminación progresiva de los combustibles fósiles y una mayor inversión en energías renovables [NU, 2024]. Este llamado obedece a la actual emergencia climática que evidencia el acelerado proceso de desequilibrio planetario que se da por el efecto humano.

El 2 de junio de 2024, se celebró el Día de Acción contra el Calor, una iniciativa global destinada a concienciar sobre los riesgos del calor extremo y promover estrategias de mitigación y adaptación. Este evento reunió a gobiernos, organizaciones no gubernamentales y ciudadanos en un esfuerzo conjunto para desarrollar políticas y medidas de protección contra los impactos del cambio climático. Este tipo de iniciativas resaltan la necesidad de cooperación internacional para enfrentar los desafíos derivados del calentamiento global [CLIMATECENTRAL, 2024].

En la COP29, celebrada en noviembre de 2024 en Bakú, Azerbaiyán, los países más ricos acordaron destinar 300.000 millones de dólares en 2035 para apoyar a las naciones en desarrollo en su lucha contra los efectos del cambio climático, incluido el calor extremo. Este compromiso refuerza la importancia de la cooperación internacional para abordar los impactos ambientales y garantizar la resiliencia de las comunidades más vulnerables.[Gregory, 2024]

## 1.1 ESFUERZOS GLOBALES DE MITIGACIÓN.

Desde hace varias décadas existe la conciencia del cambio climático y se intentan compromisos globales para su enfrentamiento, pero los esfuerzos todavía son insuficientes. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988, auspiciado por la Organización Meteorológica Mundial, ( World Meteorological Organization WMO) para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta [IPCC, s.d.]. La UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es el tratado marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. El tratado fue firmado en la Conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, conocida como la Cumbre de la Tierra, realizada en Río de Janeiro. La COP es la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Se trata de un tratado internacional resultante de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, conocida como la Cumbre de la Tierra, llevada a cabo en Río de Janeiro en 1992. Este tratado establece las obligaciones básicas de las 196 Partes (Estados) y de la Unión Europea para combatir el cambio climático [CEBDS, 2023].

Las Conferencias de las Partes (COP) son reuniones anuales de los países que han ratificado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Desde su inicio en 1995, las COP han sido fundamentales para coordinar esfuerzos internacionales contra el cambio climático. Uno de los hitos más destacados es el Acuerdo de París, adoptado en la COP21 en 2015. Este acuerdo tiene como objetivo principal limitar el aumento de la temperatura global en este

siglo por debajo de 2°C respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C. Además, establece que los países revisen y actualicen sus compromisos climáticos cada cinco años y promueve el apoyo financiero a las naciones en desarrollo para mitigar y adaptarse al cambio climático. [ONU, 2015]

Las Conferencias de las Partes (COP) han sido fundamentales en la lucha contra el cambio climático. Las COP03, celebrada en Kyoto, Japón, en 1997, resultó en la adopción del Protocolo de Kyoto, el primer acuerdo internacional que estableció objetivos vinculantes para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en países desarrollados. Posteriormente, la COP20 en Lima, Perú en 2014, produjo el “Llamado de Lima para la Acción Climática”, sentando las bases para un nuevo acuerdo global. Este esfuerzo culminó en la COP21 en París, Francia, en 2015, comprometiendo a las naciones a limitar el calentamiento global por debajo de 2°C y a esforzarse por no superar 1,5°C. Estos hitos demuestran el compromiso internacional con la descarbonización y la transición hacia fuentes de energía más limpias, como el hidrógeno de baja emisión, tema central de este trabajo. [COP03, 1997; COP20, 2014; COP21, 2015]

Desde finales del siglo XX, la comunidad científica ha alertado sobre los riesgos del cambio climático. En 1988, se creó el IPCC con el propósito de evaluar de manera integral el conocimiento científico sobre el cambio climático, sus causas, impactos potenciales y estrategias de respuesta. A lo largo de las décadas, las COP han servido como plataforma para que los países negocien y acuerden medidas colectivas. El tratado que culminó en la COP21 es un ejemplo clave de estos esfuerzos, estableciendo un marco global para abordar el cambio climático y sus efectos adversos. [ONU, 2015]

El cambio climático es una realidad indiscutible que ha sido impulsada principalmente por la actividad humana, con el uso intensivo de combustibles fósiles como el factor clave en el aumento de las temperaturas globales. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), la temperatura media global ya ha aumentado aproximadamente 1,5 °C respecto a niveles preindustriales, lo que ha intensificado eventos extremos como olas de calor, sequías e inundaciones, afectando a los ecosistemas impactando la seguridad, energética y alimentaria y el acceso al agua [IPCC, 2023]. A pesar de los avances en políticas climáticas, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) continúan en niveles alarmantes, haciendo que la meta de limitar el calentamiento a 2°C en 2050 sea cada vez más desafiante [IPCC, 2023]

Si las emisiones no se reducen de manera drástica y urgente, se espera que el calentamiento global supere los límites establecidos, aumentando significativamente los riesgos climáticos, especialmente para comunidades vulnerables. Se requiere una transición rápida hacia una economía baja en carbono, combinando medidas de mitigación y adaptación, con un enfoque en energías renovables y reducción de la dependencia de combustibles fósiles [IPCC,2023]. En este contexto, el hidrógeno de baja emisión, especialmente el hidrógeno de baja emisión, también conocido como hidrogeno verde, surge como una estrategia clave para reducir la huella de carbono del sector energético y apoyar los compromisos climáticos internacionales. Países como Perú y Brasil tienen un gran potencial para su producción, pero enfrentan desafíos en términos de inversión, regulación y desarrollo tecnológico. [IPCC,2023]

## **1.2 PERÚ Y BRASIL EN LA RUTA DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES**

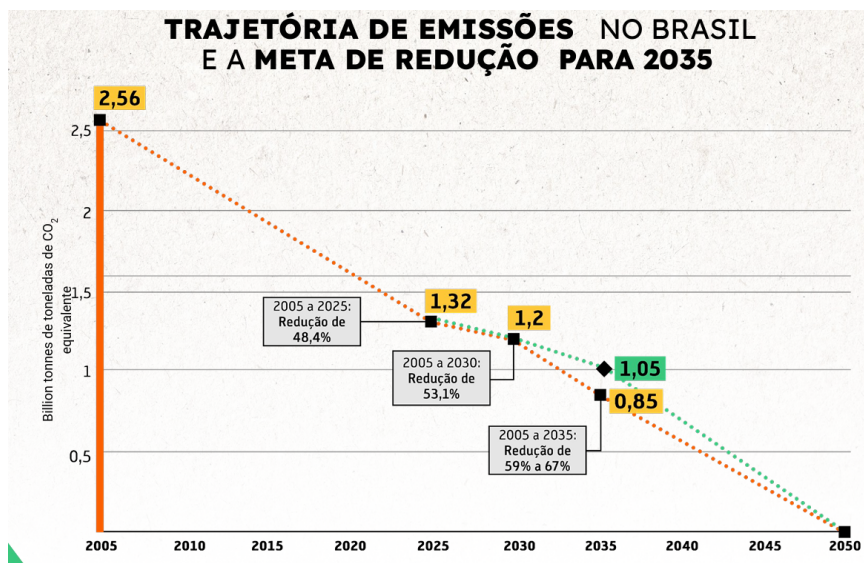
Las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) son compromisos asumidos por los países para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y enfrentar el cambio climático. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las NDC 'encarnan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático [UNFCCC, s.d.]. En este contexto, tanto

Perú como Brasil han establecido metas ambiciosas que se alinean con la promoción del hidrógeno verde como vector energético clave en sus estrategias de descarbonización.

Perú, en su actualización de las NDC, se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para el año 2030, en comparación con los niveles proyectados, sujeto a la disponibilidad de financiamiento internacional. Para alcanzar esta meta, el país ha identificado al hidrógeno verde como una herramienta esencial. En enero de 2022, mediante el Decreto Supremo N° 003-2022-MINAM, se priorizó el desarrollo de tecnologías y programas relacionados con la producción y uso de hidrógeno verde, reconociendo su potencial para descarbonizar sectores clave y contribuir al cumplimiento de las NDC. [SANTIVÁÑEZ, R, 2024]

En la COP29 celebrada en Bakú, Azerbaiyán, Brasil presentó su nueva Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), comprometiéndose a reducir sus emisiones netas de gases de efecto invernadero entre un 59% y un 67% para 2035, en comparación con los niveles de 2005, como es mostrado en la Figura 1 que representa la trayectoria de emisiones en Brasil y la de reducción para el año 2035. Este objetivo equivale a alcanzar entre 850 millones y 1.050 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Esta ambiciosa meta refleja el alineamiento de Brasil con los objetivos del Acuerdo de París y su compromiso con la transformación ecológica del país. [MMA, 2024; MMA, 2024]

Figura 1: Trayectoria de Emisiones en Brasil y Meta de Reducción para 2035



Fuente: Adaptado de Nova NDC de Brasil para 2035

En 2021, el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE) estableció al hidrógeno como una prioridad en la asignación de recursos para investigación y desarrollo. Posteriormente, se presentaron directrices para un Programa Nacional del Hidrógeno, que busca integrar este vector energético en la matriz energética brasileña, promoviendo su producción a partir de fuentes renovables y su aplicación en diversos sectores industriales. [IEA,2023]

En 2024, Brasil avanzó significativamente en su política energética y ambiental [CCAC, s.d.]. El 2 de agosto, se promulgó la Ley 14.948/2024, que establece un marco regulatorio integral para el desarrollo del mercado de hidrógeno de baja emisión de carbono [GRAFFIGNA, 2024]. Esta legislación define la Política Nacional del Hidrógeno, introduce incentivos fiscales y crea el Régimen Especial de Incentivos para la Producción de Hidrógeno de Baja Emisión de Carbono (Rehidro),

vigente desde el 1 de enero de 2025 [GARCÍA, 2024]. Además, se implementó el Sistema Brasileño de Certificación del Hidrógeno (SBCH<sup>2</sup>), que permite la certificación voluntaria basada en la intensidad de emisiones durante el ciclo de vida del producto [XINHUA, 2024].

El 12 de diciembre de 2024, el presidente Luiz Inácio Lula da Silva sancionó la Ley 15.042, que crea el Sistema Brasileño de Comercio de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (SBCE). Esta ley establece un mercado regulado de carbono en el país, fijando límites para la emisión de gases de efecto invernadero y permitiendo la comercialización de créditos de carbono. Las empresas que reduzcan sus emisiones por debajo de los límites establecidos pueden vender sus créditos a aquellas que excedan dichos límites, incentivando la reducción de emisiones en diversos sectores económicos [GOV, 2024].

Asimismo, se presentó la Política Nacional de Transición Energética (PNTE), aprobada en una reunión del Consejo Nacional de Política Energética (CNPE). Esta iniciativa busca organizar y coordinar la transición energética en Brasil, creando sinergia entre las políticas gubernamentales, como la Política Nacional de Cambio Climático y el Plan de Transformación Ecológica, con el objetivo de fortalecer la nueva economía global, generando empleo e ingresos en el país y promoviendo una transición justa e inclusiva [GOV, 2024].

Brasil ha tomado medidas concretas en esta dirección con el decreto presidencial del 3 de septiembre de 2024, que establece directrices para la descarbonización del sector de petróleo y gas, alineando la política energética nacional con objetivos climáticos. Estas acciones se suman a la creación del Plan Nacional de Transición Energética (PLANTE) y del Foro Nacional de Transición Energética (FONTE), que buscan consolidar un marco legal para la producción de hidrógeno de baja emisión de carbono. [AGÊNCIA BRASIL, 2024] [MME BRASIL, 2024]

La inclusión del hidrógeno verde en las NDC de ambos países refleja un compromiso claro con la transición hacia economías bajas en carbono. Esta estrategia no solo busca mitigar los efectos del cambio climático, sino también posicionar a Perú y Brasil como líderes en la producción y uso de energías limpias en la región, aprovechando sus abundantes recursos naturales para impulsar el desarrollo sostenible [XINHUA, 2024; Wikipedia, s.d.].

El desarrollo económico y social de las sociedades está intrínsecamente ligado al acceso a fuentes de energía confiables y sostenibles. En América Latina, se proyecta que la demanda de energía aumentará más de un 50% hasta 2050, impulsada por el crecimiento poblacional y económico [VASQUEZ, 2023]. Perú, en particular, el sector transporte fue el principal consumidor de energía en Perú, representando el 41,4% del consumo final nacional, lo que equivale a 399 260,2 TJ. La industria y minería, con un consumo de 270 633,1 TJ, representaron el 28,0%, mientras que los sectores residencial, comercial y público sumaron 241 849,6 TJ, con una participación del 25,1%. Finalmente, el sector agropecuario y pesca tuvo un consumo de 10 802,4 TJ, equivalente al 1,1% del total. [BNE, 2022].

En este contexto, la proyección de crecimiento de emprendimientos en hidrógeno en Perú ha aumentado considerablemente en los últimos años, especialmente en la zona litoral, donde se han identificado diversas iniciativas en distintas fases de implementación. Este crecimiento responde a la necesidad de diversificar la matriz energética y avanzar en la descarbonización de sectores clave como la industria y el transporte. En la Figura 3, se puede observar la distribución geográfica de futuros proyectos de producción y consumo de hidrógeno en Perú hasta 2024. Esta visualización permite identificar zonas estratégicas donde se planea desarrollar infraestructura para la producción de hidrógeno, considerando tanto fuentes renovables como procesos industriales que incluyen la electrólisis del agua y la reforma de gas natural con captura de CO<sub>2</sub>.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

La transición hacia una producción de hidrógeno baja en emisiones es fundamental para avanzar en los compromisos climáticos globales. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), los gobiernos deben establecer hojas de ruta claras para descarbonizar la producción de hidrógeno, evitando la fragmentación del mercado mediante regulaciones armonizadas y certificaciones basadas en la intensidad de emisiones [IEA, 2023]. Actualmente, distintos marcos regulatorios buscan definir los atributos de sostenibilidad del hidrógeno, pero la falta de alineación podría generar barreras en el comercio internacional. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2021), un marco contable globalmente aceptado facilitaría la inversión y el desarrollo de cadenas de suministro eficientes, asegurando la competitividad del hidrógeno de bajas emisiones en los mercados internacionales [BID, 2021]

En el ámbito del comercio internacional, la Organización Mundial del Comercio (OMC, 2022) resalta que el hidrógeno verde puede desempeñar un papel clave en la transición energética, siempre que se establezcan reglas claras que eliminen barreras comerciales y fomenten la cooperación regulatoria entre países [OMC, 2022] Además, estudios recientes de Hinicio (2022) han analizado estándares de certificación en el mercado del hidrógeno, destacando la importancia de unificar criterios de sostenibilidad para asegurar el acceso equitativo a incentivos y financiamiento [HINICIO, 2022].

La transición hacia una producción de hidrógeno baja en emisiones es fundamental para avanzar en los compromisos climáticos globales. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), los gobiernos deben establecer hojas de ruta claras para descarbonizar su producción de hidrógeno, evitando la fragmentación del mercado mediante regulaciones armonizadas y certificaciones basadas en la intensidad de emisiones. Actualmente, distintos marcos regulatorios buscan definir los atributos de sostenibilidad del hidrógeno, pero la falta de alineación podría generar barreras en el comercio internacional. Un marco contable globalmente aceptado facilitaría la inversión y el desarrollo de cadenas de suministro eficientes [IEA, 2023].

La clasificación del hidrógeno según su método de producción ha generado debates sobre su sostenibilidad real. Mientras que el hidrógeno verde es producido con energías renovables y sin emisiones, el hidrógeno azul implica captura de CO<sub>2</sub>, y el hidrógeno rosa usa energía nuclear, generando controversia en la Unión Europea, que ha decidido incluirlo en su estrategia de descarbonización del transporte. La nueva Directiva de Energía Renovable (RED III) establece que, para 2030, al menos 42% del hidrógeno deberá provenir de fuentes renovables o de bajas emisiones, aumentando a 60% en 2035. Esta normativa resalta la urgencia de desarrollar tecnologías sostenibles para cumplir con los plazos de reducción de emisiones. [GENIA Global, 2023]

La próxima década es crucial para la acción climática. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2023), las decisiones que se tomen en este periodo definirán la capacidad de los países para mitigar los impactos del cambio climático. El informe resalta que la implementación de políticas integradas que fomenten la eficiencia energética, el uso de energías renovables y la conservación de ecosistemas será determinante para alcanzar reducciones significativas de emisiones [IPCC, 2023]. Además, la innovación tecnológica y la inversión en energías limpias, como el hidrógeno verde, jugarán un papel clave en la descarbonización de sectores difíciles de electrificar. Según un análisis del Clean Air Task Force (2022), el hidrógeno bajo en carbono puede ser esencial para reducir las emisiones en sectores industriales y de transporte donde la electrificación directa no es viable [CATF, 2022]. Este vector energético no solo contribuirá a la reducción de emisiones, sino que también impulsará la economía mediante la generación de empleo y nuevas oportunidades en el sector energético. De acuerdo con Enagás (2025), los avances regulatorios previstos para los próximos años facilitarán la expansión del mercado de hidrógeno verde, promoviendo su integración en las estrategias nacionales de transición energética [ENAGÁS, 2025].

La transición energética sostenible y con justicia social es un motor de competitividad, productividad y calidad de vida en Perú. Para lograrla, es esencial el desarrollo de una industria ecológica que genere empleo y fomente nuevas capacidades en el país. En este contexto, el hidrógeno verde se posiciona como un pilar fundamental, ya que permite la electrificación y descarbonización de sectores con altas emisiones de CO<sub>2</sub>, al tiempo que impulsa la integración sectorial en una economía sostenible [H<sub>2</sub>PeruPaper, 2021].

Como vector energético, el hidrógeno verde tiene la capacidad de almacenar y liberar energía cuando se requiere, además de servir como combustible y materia prima. Cuando se produce a partir de energía 100% renovable, sin generar emisiones de gases de efecto invernadero [H<sub>2</sub>PeruPaper, 2021]. Su adopción está directamente vinculada con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como la energía asequible y no contaminante (ODS 7), el trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), y el desarrollo de infraestructura sostenible (ODS 9).

El hidrógeno verde puede transformar ciudades y comunidades (ODS 11) al integrarse en el transporte urbano limpio y la producción de energía local. Su desarrollo también impulsa un modelo de producción y consumo responsable (ODS 12), optimizando el uso de recursos naturales y reduciendo la huella ecológica del país. Finalmente, su potencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> lo convierte en un aliado clave en la lucha contra el cambio climático (ODS 13), especialmente en sectores difíciles de descarbonizar, como el transporte y la industria pesada [H<sub>2</sub>PeruPaper, 2021].

## 2 OBJETIVOS

Evaluar el potencial de producción de hidrógeno con fines energéticos en el Perú, considerando diferentes rutas tecnológicas y su viabilidad económica, con énfasis en la transición hacia el hidrógeno de origen renovable.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Discutir aspectos climáticos, energéticos y sociales asociados a la transición energética.
- ii. Analizar la existencia de marco regulatorio y políticas públicas relacionadas a la producción y uso del hidrógeno verde en Perú.
- iii. Comparar el potencial renovable de la matriz energética e la producción de hidrogeno de baja emisión del Perú, con otros países de la región en especial con Brasil.
- iv. Investigar y analizar caso de éxito en otros países o regiones en las cuales ya se produce hidrógeno verde para identificar mejores prácticas y lecciones aprendidas.
- v. Determinar nichos de aplicación para la electrificación y el hidrogeno verde a partir de informaciones sobre fuentes y consumos de energía actuales en el Perú.
- vi. Evaluar el potencial de las principales fuentes renovables disponibles en Perú visando la producción de hidrogeno.
- vii. Analizar la viabilidad de las tecnologías actuales de electrólisis, así como un análisis económico en costos y beneficios de la producción de hidrógeno verde para el Perú.
- viii. Analisar la Variabilidad del Costo de Electricidad en Perú y su Impacto en el LCOH

Estos objetivos permitirán una comprensión integral del potencial de la producción de hidrógeno en Perú, así como su contribución a la sostenibilidad y la transición energética.

## 3 FUNDAMENTACIÓN

El cambio climático es uno de los mayores desafíos del siglo XXI, impulsado principalmente por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>). Estas emisiones han generado un aumento global de las temperaturas, afectando

patrones climáticos y ecosistemas. Para limitar el calentamiento global y mitigar impactos como el aumento del nivel del mar, fenómenos climáticos extremos y pérdida de biodiversidad, es urgente reducir la dependencia de los combustibles fósiles [IPCC, 2023].

América Latina, y en particular Perú, poseen un notable potencial para llevar a cabo una transición energética justa. La región cuenta con una diversidad significativa de recursos energéticos; sin embargo, históricamente ha dependido de los hidrocarburos, especialmente en el sector del transporte. No obstante, el potencial de las energías renovables permite avanzar hacia una matriz energética más limpia y sostenible [AIE, 2023]

Países como Brasil, México y Chile han implementado con éxito proyectos de energía solar, eólica e hidroeléctrica, aprovechando sus condiciones naturales favorables. En particular, Brasil ha desarrollado una capacidad eólica significativa, mientras que Chile ha avanzado en la integración de energía solar en su matriz energética [ZERO CARBON ANALYTICS, 2023]. Además, Uruguay se ha consolidado como un referente en la transición energética, logrando que más del 98% de su electricidad provenga de fuentes renovables, gracias a una combinación de energía eólica, solar e hidroeléctrica [URUGUAY XXI, 2024].

La diversificación energética en Perú es una prioridad para reducir la vulnerabilidad ante la variabilidad climática y garantizar la seguridad energética. Actualmente, el país depende en gran medida de las hidroeléctricas, que representan la mayor parte de la electricidad generada (49,7%), pero enfrenta desafíos debido a la variabilidad de los recursos hídricos y al crecimiento de la demanda energética [BNE, 2022]. En este sentido, las energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica, ofrecen una alternativa viable para fortalecer la resiliencia energética y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Actualmente, Perú cuenta con Plantas Operativas de Hidrógeno en Perú, así como futuros proyectos en prefactibilidad en todo el país, como es mostrado en el Mapa de proyectos de Hidrógeno en Perú

El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua con electricidad renovable, se perfila como una solución clave en la transición energética. Su capacidad para almacenar y transportar energía limpia permite su integración en sectores estratégicos como la industria, el transporte y la generación de electricidad, facilitando la descarbonización de diversas actividades [Hydrogen Council, 2022].

En Perú, el desarrollo del hidrógeno verde representa una oportunidad estratégica para aprovechar el potencial de sus recursos renovables. Su producción podría estabilizar la red eléctrica, permitiendo almacenar excedentes de energía solar y eólica. Además, la implementación de plantas de hidrógeno en operación y en fase de prefactibilidad refleja el creciente interés por este vector energético en el país [Mapa de Proyectos de Hidrógeno en Perú, 2024].

Este estudio analiza el impacto del hidrógeno verde en Perú, comparando su desarrollo con la experiencia de Brasil, país que ha avanzado en marcos regulatorios y políticas de incentivo para la producción de hidrógeno de bajas emisiones. La identificación de barreras tecnológicas, económicas y regulatorias permitirá establecer estrategias viables para su implementación a gran escala.

### **3.1 EL HIDROGENO DE BAJA EMISIÓN**

El hidrógeno es un vector energético clave en la transición hacia sistemas energéticos de bajas emisiones. Tradicionalmente, se ha producido a través de la reforma del gas natural, un proceso que emite gases de efecto invernadero. No obstante, existen diversas formas de obtención de hidrógeno. Una de ellas es el hidrógeno geológico, extraído directamente de reservas subterráneas, aunque su disponibilidad es limitada. Otra es el hidrógeno verde, definido en la legislación peruana como aquel obtenido del agua mediante procesos que utilizan como fuente de energía a los recursos energéticos

renovables, como la eólica o la solar. También existe el hidrógeno azul, generado a partir de combustibles fósiles con captura y almacenamiento de carbono. El término 'hidrógeno verde' es preferible en el contexto peruano, ya que se alinea con la definición establecida en la legislación nacional. [GARRIGUES, 2024; SPR, 2024; H2LAC, 2024; ENERGIMINAS, 2024; H2 Perú, 2025].

Según IRENA (2020), el hidrógeno se puede producir con múltiples procesos y fuentes de energía, sin embargo, los responsables políticos deberían diseñar políticas utilizando una medida objetiva del impacto basada en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del ciclo de vida, especialmente porque puede haber casos que no se ajusten completamente a un color (por ejemplo, fuentes mixtas de hidrógeno, electrólisis con electricidad de la red, etc.)

La clasificación del hidrógeno por colores es ampliamente utilizada para distinguir las tecnologías y las emisiones asociadas a cada tipo de producción.

Para IRENA (2020), define con 4 colores a la forma de obtención de hidrógeno. Como lo es el hidrógeno gris, a veces referido como hidrógeno negro o hidrógeno marrón; hidrógeno azul, una ruta alternativa al reformado de metano a vapor (SMR por sus siglas en inglés) podría ser un proceso llamado reformado autotérmico, para el cual se estima que es posible una tasa de captura de hasta el 94,5 % del CO<sub>2</sub> emitido; hidrógeno turquesa que combina el uso de gas natural como materia prima sin producir CO<sub>2</sub> mediante el proceso de pirólisis el carbono del metano se convierte en negro de humo sólido; y finalmente el hidrógeno verde en la cual existen otras soluciones basadas en energías renovables para producir hidrógeno como por ejemplo gasificación y pirólisis de biomasa, división termoquímica de agua, fotocatalisis, gasificación de biomasa con agua supercrítica, fermentación oscura combinada y digestión anaeróbica.

El uso de hidrógeno gris conlleva importantes emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que hace que estas tecnologías de hidrógeno no sean adecuadas para alcanzar las cero emisiones netas. Según el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (2024), el hidrógeno gris se encuentra en un valor de 4 (USD/ kg H<sub>2</sub>) y de acuerdo con Energiminas (2023), la producción de hidrógeno gris en Perú se da en las refinerías para remover el azufre (S) de los combustibles, como el diésel y la gasolina. Es un punto de partida, ya que esto incentiva a los sectores, como el de hidrocarburos, a avanzar hacia la transición energética y considerar la inclusión de energías renovables, y transformar el hidrógeno que se produce actualmente en Perú, en hidrógeno verde.

La producción de hidrógeno genera diferentes niveles de emisiones según el método utilizado. Actualmente, los combustibles fósiles sin reducción son la principal fuente, lo que exige una disminución de emisiones para cumplir con los objetivos climáticos. La captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, (CCS y CCUS) junto con las tecnologías de biocombustibles, influyen en las emisiones. La producción con combustibles fósiles puede generar hasta 27 kg de CO<sub>2</sub> -eq/kg de hidrógeno, mientras que el uso de biomasa con captura de CO<sub>2</sub> puede lograr emisiones negativas. En escenarios futuros, se espera que las emisiones disminuyan significativamente, con un objetivo de menos de 1kg CO<sub>2</sub> – eq/kg para 2050. [IEA, 2023]

La intensidad de las emisiones del hidrógeno producido por electrólisis se determina en función de las emisiones de la electricidad que se utiliza. Utilizando la metodología desarrollada por la Asociación Internacional para el Hidrógeno y las Pilas de Combustible en la Economía (IPHE), electricidad renovable. La generación de electricidad a partir de fuentes renovables no presenta emisiones directas en su uso final, tank-to-wheel. Según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a diferentes fuentes de energía varían considerablemente. Por ejemplo, la energía hidroeléctrica tiene emisiones que oscilan entre 1 y 2200 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, con un promedio de 24 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. La energía eólica presenta emisiones entre 7 y 56 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, con un promedio de 11.5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. Por su parte, la energía solar fotovoltaica tiene emisiones que van de 18 a 180 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, con un promedio de 48 gCO<sub>2</sub>eq/kWh.

Sin embargo, considerando el ciclo de vida del hidrógeno. [LOWCARBONPOWER, 2022] Las emisiones well-to-tank dependen de la tecnología y materiales utilizados en la producción de la electricidad renovable [ICCT, 2023]. En el caso de la electricidad de la red, la intensidad de las emisiones varía mucho entre las horas de carga máxima y las horas de carga base, dependiendo de la tecnología que se utilice para satisfacer la demanda adicional de los electrolizadores. Por lo tanto, para reducir las emisiones, es importante garantizar que los electrolizadores conectados a la red no provoquen un aumento de la generación de electricidad basada en combustibles fósiles. [IEA, 2023]

Figura 2: Producción de Hidrógeno de bajas emisiones



Fuente: Adaptado de Energía Estratégica

Las tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS, por sus siglas en inglés) pueden reducir significativamente las emisiones directas en la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, persisten desafíos en las fases iniciales y medias del proceso de producción, donde se generan emisiones adicionales de metano y dióxido de carbono. La producción convencional de hidrógeno a partir de gas natural, mediante reformado de metano con vapor (SMR) sin medidas de control, presenta una intensidad de emisiones de aproximadamente 9 kg CO<sub>2</sub>-eq por kg de H<sub>2</sub> [GRZ, 2024]. Además, las emisiones fugitivas de metano en la extracción y procesamiento del gas natural pueden contribuir significativamente al impacto ambiental del hidrógeno basado en combustibles fósiles [GONZÁLEZ, 2022].

La modernización de las plantas de producción de hidrógeno con tecnologías CCS puede reducir la intensidad de las emisiones. Por ejemplo, con una tasa de captura del 60%, la intensidad de las emisiones de CO<sub>2</sub> puede reducirse a un rango de 5 a 8 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>. Tecnologías más avanzadas pueden lograr tasas de captura superiores al 90%, disminuyendo la intensidad de emisiones a valores entre 0,8 y 6 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>. No obstante, aún no existen plantas comerciales a gran escala que empleen estas tecnologías avanzadas de captura con total eficiencia [IEA, 2023].

Estos datos resaltan la necesidad de estrategias complementarias, como la reducción de emisiones en la cadena de suministro del gas y la implementación de sistemas más eficientes de captura y almacenamiento de carbono, para hacer viable la producción de hidrógeno con bajas emisiones en el contexto de la transición energética global.

Con altas tasas de captura, la intensidad de las emisiones de la producción de hidrógeno está dominada por las emisiones ascendentes y descendentes, que representan entre 0,7 y 5 kg de CO<sub>2</sub> -eq/kg de H<sub>2</sub>, lo que subraya la importancia de reducir las emisiones de metano de las operaciones de gas natural. [IEA, 2023]

## 3.2 TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DEL HIDRÓGENO: ELECTROLIZADORES Y CELDAS DE COMBUSTIBLE

### 3.2.1 ELECTROLIZADORES

La electrólisis es el proceso mediante el cual se descompone el agua ( $H_2O$ ) en sus elementos constituyentes, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), mediante el uso de electricidad. Este método es una de las principales formas de producir hidrógeno verde cuando la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables. Para producir 1 kg de hidrógeno a través de la electrólisis del agua, se requieren aproximadamente 9 litros de agua y entre 50 y 55 kWh de electricidad, dependiendo de la tecnología empleada [IRENA, 2020; IEA, 2022].

Además, la cantidad de hidrógeno necesaria para generar 1 kWh de electricidad varía según la tecnología de conversión utilizada. En celdas de combustible de hidrógeno, la eficiencia promedio es del 50-60%, lo que significa que se requieren aproximadamente 0.02 kg de  $H_2$  por kWh generado [EERE, 2023].

En cuanto a su producción, existen diferentes tecnologías de electrólisis en distintas etapas de madurez comercial [Batech Energy, 2023] como es presentado a continuación:

- **Electrólisis Alcalina (AWE):** Es la tecnología más madura y utilizada comercialmente. Destaca por su bajo costo de inversión, pero tiene menor eficiencia y requiere electrodos resistentes a la corrosión.
- **Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM):** Más eficiente y con respuesta rápida, pero con un costo elevado debido al uso de catalizadores de metales preciosos.
- **Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC):** Posee la mayor eficiencia y puede aprovechar calor residual de procesos industriales, aunque aún está en fase de desarrollo con altos costos.
- **Electrólisis de Membrana de Intercambio Aniónico (AEM):** Se encuentra en desarrollo, con potencial para reducir costos en el futuro sin necesidad de metales preciosos.

Para Batech Energy (2023) los electrolizadores alcalinos (AEL) son los más consolidados, seguidos por los PEM (Membrana de Intercambio de Protones), que permiten una mayor eficiencia y pureza del hidrógeno. Otras tecnologías emergentes incluyen la electrólisis de óxidos sólidos (SOEC), con mayor eficiencia energética, y la membrana de intercambio de aniones (AEM), que busca combinar las ventajas de AEL y PEM. Adicionalmente, el desarrollo de celdas de combustible permitirá su uso en generación de electricidad y transporte, destacando las PEMFC, DMFC y SOFC como alternativas viables para la movilidad y la industria [Batech Energy, 2023].

### 3.2.2 CÉLULAS DE COMBUSTIBLE

Las células de combustible son dispositivos que combinan el oxígeno y el hidrógeno para producir energía eléctrica, calor y agua. Son la principal fuente de aplicación del hidrógeno, ya que genera electricidad mientras se le sea suministrado por hidrógeno teniendo como emisiones al agua pura y calor. Es un dispositivo muy eficiente en cuanto a la producción de energía eléctrica [Bolaños, 2005].

La reacción de que se produce en las células de combustible es la opuesta a la electrólisis. Esta cuenta con dos placas metálicas cargadas de forma opuesta, un cátodo y un ánodo, y entre ambos se coloca un electrolito. El calor y el agua son subproductos de esta reacción que pueden ser capturados y usados con otros propósitos. Una pila de combustible está formada por células combustibles apiladas.

Según Bolaños (2005) clasifican principalmente por el tipo de electrolito que utilizan, ya que esto determina la reacción química que se producen en la célula, el tipo de catalizador necesario, el rango de temperaturas en las que funciona, el combustible necesario y otros factores. Dependiendo del electrolito que utilicen las células de combustible se clasifican en:

- Poliméricas (PEMFC, polymer electrolyte membrane or proton exchange membrane)
- Alcalinas (AFC, alkaline fuel cell)
- De ácido fosfórico (PAFC, phosphoric acid fuel cell)
- De carbonatos fundidos (MCFC, molten carbonate fuel cell)
- De óxido sólido (SOFC, solid oxide fuel cell)
- De conversión directa de metanol (DMFC, direct methanol fuel cell)

Las células de combustible PEMFC son ideales para vehículos y aplicaciones móviles, tienen arranque rápido y buena densidad de potencia y requieren hidrógeno muy puro. Las SOFC tienen una alta eficiencia ya que pueden usar otros combustibles además de H<sub>2</sub> (biogás, metano) y es adecuada para generación estacionaria. Las AFC son históricamente usadas en programas espaciales, son costosas y sensibles al CO<sub>2</sub>.

Algunas ventajas de las células de combustible son que cuando se les suministra hidrógeno no producen gases de efecto invernadero (GEI) ni emisiones tóxicas, el hidrógeno es abundante y una fuente ubicua de energía y no es un combustible tóxico, las células de combustible son escalables, lo que permite que puedan ser utilizadas en miles de aplicaciones, pueden tener usos estacionarios y móviles, al utilizarlas con hidrógeno H<sub>2</sub> se reduce la dependencia de combustible.

### **3.3 HIDRÓGENO E INTEGRACIÓN SECTORIAL: CONCEPTO P-T-X (POWER-TO-X)**

El término Power-to-X (P-t-X) se refiere a tecnologías que convierten electricidad en otros portadores de energía o productos químicos. Estas conversiones permiten almacenar energía y utilizarla en diferentes aplicaciones, facilitando la integración de fuentes renovables en diversos sectores [EL PERIÓDICO DE LA ENERGÍA, 2019]. Las principales rutas de P-t-X incluyen [4E CHILE, s.d.; SIEMENS ENERGY, s.d.]:

- Power-to-Power: Almacenamiento de electricidad para su uso posterior.
- Power-to-Mobility: Uso de electricidad para el transporte, como vehículos eléctricos o de hidrógeno.
- Power-to-Industry: Aplicación de electricidad en procesos industriales.
- Power-to-Chemicals: Producción de productos químicos, como amoníaco o metanol, a partir de electricidad.
- Power-to-Heat: Conversión de electricidad en calor para calefacción.
- Power-to-Gas: Producción de gases combustibles, como hidrógeno o metano sintético, a partir de electricidad.

Estas tecnologías permiten descarbonizar sectores de difícil electrificación directa, como el transporte pesado, la aviación, la siderurgia y la industria química. En el contexto peruano, con alta disponibilidad de recursos renovables y una geografía favorable, el enfoque Power-to-Hydrogen representa una vía estratégica para transformar excedentes de electricidad limpia en productos de valor agregado para consumo interno o exportación.

### 3.4 ESCENARIO LOCAL PERÚ BRASIL

Perú, ubicado en la costa occidental de América del Sur, posee una geografía diversa que incluye la Amazonía, la Cordillera de los Andes y una extensa costa. Su economía se basa en sectores clave como la minería, la agricultura y la pesca [EY, 2023]. En términos energéticos, Perú cuenta con reservas de gas natural y un potencial significativo para el desarrollo de energías renovables, especialmente hidroeléctrica, eólica y solar. En 2022, la producción de energía eléctrica en el país se componía en un 50,8% de hidroeléctricas, 44,3% de termoeléctricas, 3,44% de eólicas y 1,46% de solares, lo que muestra su dependencia de fuentes renovables y térmicas [EY, 2023].

Brasil, el país más grande de América del Sur, presenta una geografía que abarca vastas regiones amazónicas, extensas llanuras y una larga línea costera. Su economía es diversificada, destacando en la agricultura, la industria y los servicios [GEM, 2021]. Su matriz energética es una de las más renovables del mundo, con una alta participación de energía hidroeléctrica y avances en bioenergía, eólica y solar. En el ámbito de los combustibles fósiles, Brasil fue el principal productor de petróleo y otros líquidos de América Latina en 2020, con una producción de 3,79 millones de barriles diarios, y el mayor consumidor regional en 2018, con más de 3 millones de barriles diarios [GEM, 2021].

Ambos países enfrentan desafíos y oportunidades en su transición hacia fuentes de energía más limpias. En este contexto, el hidrógeno de bajas emisiones podría desempeñar un papel clave en sus estrategias energéticas. Brasil ha avanzado significativamente en este sector con la aprobación de su segunda Ley del Hidrógeno en 2024, que establece un marco regulatorio para la producción y exportación de hidrógeno verde a gran escala, creando un entorno favorable para la inversión nacional e internacional [MEDINILLA, 2024]. Por su parte, Perú tiene el potencial de convertirse en un actor competitivo en la producción y exportación de hidrógeno verde, con costos estimados entre 1,6 y 2,6 USD/kg de H<sub>2</sub>, similares a los de Chile, lo que permitiría abastecer tanto el mercado interno como mercados internacionales como Europa y Asia [H2PE, 2024].

En el caso específico de Perú, vemos que, en el 2019, las emisiones netas tenían como principal productor sectores como el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura con 47,9 %, seguidos de la energía con 30,1 %, la agricultura con 13,5 %, desechos con 5,0 %, y los procesos industriales y uso de productos con 3,6 %. [Ingei, 2019]

Es importante destacar que la producción de energéticos primarios del Perú a 2022 estaba representada principalmente por fuentes no renovables como el gas natural y líquido de gas natural con el 65,5% seguida por 7,9 % de petróleo crudo, carbón mineral 0,5%, Uranio 5,4%, mientras que fuentes de energía primaria como la hidroenergía con -6,8%, así como la leña con -5,1%, el bagazo 6,3%, la bosta y la yareta con un 1,4%, energía solar con 2,5% y energía eólica con 6,0%. [BENPeru, 2022] La producción de energía secundaria del Perú está compuesta principalmente por derivados de hidrocarburos (79,4 %), y de electricidad (20%), [BENPeru, 2022]

El consumo final nacional de energía ascendió a 934.699,1 TJ, y dentro de este consumo, el 64,3% correspondió a diversos hidrocarburos, y el 20,1% la electricidad. [BENPeru, 2022]

Por otro lado, es importante destacar el potencial energético renovable del Perú que asciende a 22 432 MW en el potencial eólico, a 60 000 MW el potencial hidroeléctrico, a 5,5 a 6,5 kW por metro cuadrado en la zona sur de Perú y el potencial de geotermia estará por encima de 3 000 MW [H2PerúPaper].

En el caso específico de Brasil, en 2023, las emisiones antrópicas asociadas a la matriz energética alcanzaron 427,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Mt CO<sub>2</sub>-eq). Los principales sectores emisores fueron el transporte (217 Mt CO<sub>2</sub>-eq), la industria (73,9 Mt CO<sub>2</sub>-eq), los hogares (18,4 Mt CO<sub>2</sub>-eq) y otros sectores como el agropecuario, servicios, energético y eléctrico (118,4 Mt CO<sub>2</sub>-eq)[BEN, 2024].

Es importante destacar que la producción de energéticos primarios en Brasil en 2023 estuvo representada por una participación de 49,1% de fuentes renovables y 50,9% de fuentes no renovables. Entre las fuentes no renovables destacan el petróleo y sus derivados (35,1%), el gas natural (9,6%), el carbón mineral (4,4%) y el uranio (1,2%). En cuanto a las fuentes renovables, la biomasa de caña representó 16,9%, la hidráulica 12,1%, la eólica 2,6%, la solar 1,7%, la leña y el carbón vegetal 8,6%, y el licor negro y otras renovables 7,2% [BEN, 2024].

La producción de energía secundaria en Brasil está compuesta principalmente por derivados de hidrocarburos y electricidad. La electricidad representó 53,003 TWh en 2023, con un crecimiento del 5,2% respecto a 2022 [BEN, 2024].

El consumo final nacional de energía en Brasil alcanzó 282,5 Mtep en 2023, representando un aumento del 4,0% respecto a 2022. Dentro de este consumo, los principales sectores fueron el transporte (33%), la industria (31,8%), el sector energético (8,8%), los hogares (10,7%), el sector servicios (5,1%) y la agropecuaria (5,0%) [BEN, 2024].

Por otro lado, el potencial energético renovable de Brasil es significativo. La capacidad instalada de energía eólica alcanzó los 28.682 MW, con un crecimiento del 20,7% en 2023, mientras que la energía solar alcanzó 37.843 MW, con un impresionante crecimiento del 54,8% en el mismo período. Brasil continúa avanzando en la integración de energías renovables, con una matriz eléctrica compuesta en un 89,2% por fuentes renovables, incluyendo energía hidráulica, biomasa, eólica y solar [BEN, 2024].

Perú es un país con una gran riqueza hídrica, albergando aproximadamente el 4.6% del agua dulce renovable del mundo y alrededor del 22% del agua disponible en América del Sur [ANA, 2022]. Sin embargo, esta distribución no es uniforme, ya que el 97% de los recursos hídricos se encuentran en la vertiente amazónica, mientras que solo el 1.8% está en la costa, donde se concentra el 70% de la población [MINAM, 2022].

Algunas de las principales fuentes de agua en el país incluyen:

- Ríos y Cuencas Hidrográficas: Perú tiene 159 cuencas hidrográficas principales y más de 1,000 ríos, de los cuales destacan el Amazonas, el Marañón y el Ucayali [ANA, 2022].
- Lagos y Lagunas: Existen más de 8,600 lagos y lagunas en el país, con el Titicaca como el más grande y compartido con Bolivia [ANA, 2022].

La calidad del agua es fundamental para su uso en la electrólisis, ya que la presencia de impurezas afecta la eficiencia de los electrolizadores y su durabilidad. Según el Ministerio del Ambiente [MINAM, 2022], el 30% de los cuerpos de agua en Perú presentan contaminación significativa debido a actividades mineras, industriales y urbanas.

Para garantizar un suministro adecuado de agua para la producción de hidrógeno verde, se deben considerar:

- Monitoreo de la calidad del agua: La contaminación por metales pesados y residuos industriales es común en regiones como Cajamarca y Puno, por lo que es necesario implementar procesos de purificación y tratamiento [ANA, 2021].

- Sistemas de tratamiento de agua: Tecnologías como la ósmosis inversa y la filtración avanzada pueden eliminar impurezas, asegurando agua apta para la electrólisis.

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis requiere un consumo considerable de agua. Se estima que para producir 1 kg de hidrógeno se necesitan aproximadamente 9 litros de agua pura [IRENA, 2022].

- Perú cuenta con un potencial hídrico renovable de 2,002 km<sup>3</sup>/año, pero solo utiliza el 1.5% de este total [ANA, 2022].
- El sector agrícola es el mayor consumidor de agua, utilizando el 89% del recurso, mientras que la industria y el sector doméstico representan el 10% y 1%, respectivamente [ANA, 2021].

Para evitar conflictos en el uso del agua, se pueden implementar:

- Fuentes alternativas como agua de mar desalada: La costa peruana podría aprovechar plantas desalinizadoras para evitar presiones sobre los recursos de agua dulce [ANA, 2022].
- Reutilización de aguas residuales tratadas: Tecnología ya aplicada en sectores industriales para reducir la demanda de agua potable [ANA, 2022].

Actualmente, Perú ya cuenta con regulaciones enfocadas en la gestión sostenible del agua, incluyendo:

- Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338): Establece principios de gestión integrada del agua y prioriza el acceso al agua potable [PERÚ, 2009].
- Plan Nacional de Recursos Hídricos (2021-2040): Define estrategias para la preservación del recurso hídrico ante el cambio climático y el crecimiento industrial [ANA, 2013].

### 3.5 CRECIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE PROYECTOS DE HIDRÓGENO EN PERÚ

En los últimos años, la proyección de crecimiento de emprendimientos en hidrógeno en Perú ha aumentado considerablemente, especialmente en la zona litoral, donde se han identificado diversas iniciativas en distintas fases de implementación. Este crecimiento responde a la necesidad de diversificar la matriz energética y avanzar en la descarbonización de sectores clave como la industria y el transporte. En la Figura 1, se puede observar la distribución geográfica de futuros proyectos de producción y consumo de hidrógeno en Perú hasta 2024. Esta visualización permite identificar zonas estratégicas donde se planea desarrollar infraestructura para la producción de hidrógeno, considerando tanto fuentes renovables como procesos industriales que incluyen la electrólisis del agua y la reforma de gas natural con captura de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, en la Tabla 1, se presenta un detalle más específico de los proyectos, incluyendo la ciudad de ubicación, el año de inicio, la empresa responsable, el tipo de hidrógeno producido (verde, azul o gris) y la tecnología empleada. Este cuadro permite analizar la evolución del sector del hidrógeno en Perú, diferenciando entre proyectos en operación y aquellos en etapa de prefactibilidad. Asimismo, resalta el papel de diversas industrias en la implementación de esta tecnología y su posible impacto en el mercado energético del país.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
 Instituto Latino-Americano de Tecnologia Infraestrutura e Território / Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

Curso de Ingeniería de Energía

Tabla 1: Proyectos de Hidrógeno en Perú

PROYECTOS DE HIDRÓGENO EN PERÚ 1965 - 2024							
CIUDAD	AÑO	PROYECTO	EMPRESA	TIPO DE H2	TECNOLOGÍA	ESTADO	USO
Cusco	1965	Industrias Cachimayo - Hidroeléctrica	ENAEEX	Verde	Electrolizador Alcalino	Activo	Amoniaco / Nitrato de Amonio
Lima	2016	Refinería de Pampilla - Callao	PRAXAIR -REPSOL	Gris	SMR - Metano	Activo	Tecnologías de reformado de Metano-PSA Gas Natural
Piura	2023	Refinería de Talara - Piura	PETROPERU - Piura	Gris	PHP - Metano	Activo	Tecnologías de Unidad de Producción / Purificación de H2
Lima	2024	Centro de Energía Renovable - UNI	Universidad Nacional de Ingeniería - UNI Lima	Verde	Electrolizador PEM	Proceso de Implementación	Miniplanta Fotovoltáica
					Electrolizador AEM		
Lima	2024	Central Eléctrica Térmica - Chilca	Fenix Power-COLBUN	Verde	Electrólizador PEM	Activo	Refrigeración de 03 generadores
Piura	2024	Proyecto Prefactibilidad - Piura	Enerside / UNI	Verde	Electrólisis	Prefactibilidad	Planta Solar Piura
Pisco	2025	LNG / Planta Solar - Eólica	Peru LNG	Azul	SMR - CCU	Prefactibilidad	Captura de CO2 / Metano Sintético
Arequipa	2025	Centro de Investigación-VR-UNSA	Universidad Nacional de San Agustín. - UNSA Arequipa	Verde	Electrolizador AEM	Prefactibilidad	Proyecto Prefactibilidad - Arequipa
Arequipa	2025	Planta Solar	PHELAND ENERGY	Verde	Electrolizador AEM	Prefactibilidad	LH2 / Amoniaco
Arequipa	2025	Proyecto Prefactibilidad - Arequipa	YURA	Verde	Electrolizador AEM	Prefactibilidad	Catalizador de Hornos - Cemento
Arequipa	2024	Planta Solar - Casma	HORIZONTE VERANO	Verde	Electrolizador Alcalino	Prefactibilidad	Amoniaco / H2
Arequipa	2024	Planta Solar - Caylloma	HORIZONTE VERANO	Verde	Electrolizador Alcalino	Prefactibilidad	Amoniaco / H2
Moquegua	2024	Planta Solar - Eólica	MMEX Resources C.	Verde	Electrólisis	Prefactibilidad	Metanol / Amoniaco
Tacna	2025	Planta Solar - Tacna	Ladrillera MAXX	Verde	Electrólisis	Prefactibilidad	Catalizador de Hornos - Ladrillos

Fuente: Adaptado de FARGE, 2024



Universidade Federal da Integração Latino-Americana  
Instituto Latino-Americano de Tecnologia Infraestrutura e Território / Centro  
Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Curso de Ingeniería de Energía

El hidrógeno verde es un vector energético que se perfila como un actor clave en la transición energética global. Su capacidad para almacenar energía renovable y su versatilidad en aplicaciones industriales lo convierten en una alternativa viable a los combustibles fósiles. En Perú, su desarrollo podría fortalecer la matriz energética y reducir la dependencia de importaciones de derivados del amoníaco, como la urea, cuya demanda se abastece mayormente de países como Rusia, Argelia y China [SUNAT/ADUANET, 2019].

Históricamente, Perú ha dependido de las importaciones de urea para satisfacer la demanda agrícola. En 2021, el país importó aproximadamente 325,8 mil toneladas de urea, de las cuales el 68,4% provinieron de Rusia y el 26,7% de China [MIDAGRI, 2022]. Sin embargo, el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania en 2022 afectó significativamente el suministro de fertilizantes a nivel mundial, impactando también a Perú. Durante el primer trimestre de 2022, las importaciones peruanas de urea se redujeron en un 84%, lo que equivale a un déficit de más de 80 mil toneladas en comparación con el año anterior [IPE, 2022].

Esta situación evidenció la vulnerabilidad de Perú debido a su alta dependencia de proveedores externos de fertilizantes [FLORES, 2022]. El desarrollo de una industria nacional de hidrógeno verde permitiría la producción local de amoníaco y urea, reduciendo la dependencia de importaciones y fortaleciendo la seguridad alimentaria del país. Además, contribuiría a la diversificación de la matriz energética y al cumplimiento de los compromisos internacionales en materia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero .

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, y aunque actualmente el 95% de su producción proviene de fuentes fósiles, existen tecnologías sostenibles como la electrólisis del agua, la gasificación de biomasa y otras rutas de fuentes de energía renovables en desarrollo [SIGAL, 2015; RIVERA, 2016].

En este contexto, el presente estudio analiza la viabilidad del hidrógeno verde en Perú, considerando su potencial técnico y económico, y comparándolo con la experiencia de Brasil, país que ha avanzado en regulaciones y estrategias para la producción de hidrógeno de bajas emisiones.

En los últimos años, diversos estudios han analizado el potencial del hidrógeno en Perú, abordando aspectos como su producción, costos, viabilidad económica y oportunidades de exportación. Sin embargo, aún existen vacíos de información que requieren ser explorados para lograr una estrategia efectiva de transición energética basada en hidrógeno en el país.

Uno de los estudios más relevantes es el informe de H2 Perú (2021), que identifica las zonas norte y sur del país como regiones clave para la producción de hidrógeno debido a su alto potencial en energía solar y eólica. Según este estudio, los costos nivelados de hidrógeno verde en Perú podrían alcanzar 2.6 USD/kg en 2030, 1.9 USD/kg en 2040 y 1.3 USD/kg en 2050, lo que lo haría altamente competitivo a nivel internacional [ENGIE Impact; H2 Perú, 2021]. Este trabajo se enfocará en actualizar estos datos, incorporando el impacto de avances tecnológicos recientes y políticas energéticas actuales.

Por otro lado, H2LAC (2021) analizó el mercado del hidrógeno verde en Perú y concluyó que el país podría producir hidrógeno verde a precios altamente competitivos, pero que su comercialización y masificación se darían principalmente después de 2040 [MACEDA, 2023] Esta investigación buscará adelantar la competitividad del hidrógeno en Perú antes de esa fecha, analizando incentivos fiscales, mejoras en infraestructura y esquemas de financiamiento.

Otro estudio realizado por H2LAC (2021), es sobre la viabilidad de un "Valle del Hidrógeno" en el sur de Perú, el cual plantea la creación de seis hubs de producción en regiones como Ica,

Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno para abastecer el mercado local y generar oportunidades de exportación [MOQUEGUA CRECE; H2 Perú., 2021]. Este estudio se complementará con un análisis de viabilidad económica y técnica de estos hubs, considerando aspectos como infraestructura necesaria, mercados potenciales y estrategias de exportación.

En el ámbito de políticas públicas, el informe de EDP (2023) menciona que Perú se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero entre un 30% y 40% para 2030, y que el hidrógeno verde jugará un papel clave en esa transición [EDP, 2023]. Esta investigación ampliará el análisis sobre cómo el hidrógeno verde puede integrarse en la política energética nacional y contribuir al cumplimiento de estos objetivos.

Desde una perspectiva internacional, estudios como el de BNamericas (2021) han destacado el potencial de Perú para instalar hasta 120,000 MW de generación renovable y convertirse en un exportador clave de hidrógeno limpio [BNamericas, 2023]. Este trabajo evaluará los desafíos y oportunidades específicos que permitirían a Perú posicionarse como un actor competitivo en el comercio global del hidrógeno.

En el ámbito académico, el estudio de CIDE-PUCP (2021) explica que el hidrógeno verde en Perú podría producirse principalmente mediante electrólisis del agua usando energía renovable [ROBLES VILCA, 2023]. Este estudio se diferenciará al analizar su integración en sectores específicos como el transporte y la industria pesada.

Comparando con otros países, el estudio de ResearchGate (2022) sobre Ecuador analiza el potencial de producción y consumo de hidrógeno en ese país, lo que permite obtener un marco de referencia regional [GARCÍA, J.; PEREZ, M., 2023]. Este estudio incorporará una comparación con la realidad ecuatoriana, adaptando las mejores prácticas a la situación peruana.

De acuerdo con Vector Renewables (2022), el costo nivelado del Hidrógeno (LCOH por sus siglas en inglés) es una variable que nos indica cuánto cuesta producir 1 Kg de Hidrógeno Verde teniendo en cuenta los costos estimados de la inversión requerida como el costo de la explotación de los activos involucrados en su producción. Se calcula tomando primero el valor actual neto del coste total de construcción y operación de una planta de hidrógeno. Esta cifra se divide posteriormente entre la producción total de hidrógeno a lo largo de su vida útil.

El CAPEX (gasto de capital) y el OPEX (gastos operativos) son dos tipos de gasto que definirán el coste nivelado general. Los Gastos de Capital representan los fondos utilizados para adquirir, actualizar y mantener los activos físicos asociados con una planta, como propiedades, edificios, tecnología, equipos, tuberías y otras partes de la planta. Los Gastos Operativos son costos asociados con la fabricación de bienes y generalmente incluyen el costo del material, el costo de la mano de obra y los gastos generales de fabricación [TOPSOE, ]

Finalmente, el informe de Clean Air Task Force (2022) sobre el transporte de hidrógeno a larga distancia modela el costo de diferentes vías de exportación [CATF, 2023]. Este trabajo analizará las opciones de exportación de hidrógeno desde Perú, considerando los costos y desafíos logísticos.

En base a la revisión de estos estudios, esta investigación aportará actualizaciones de datos, explorará nuevas estrategias de financiamiento y regulación, analizará la integración del hidrógeno verde en sectores estratégicos y evaluará la viabilidad de Perú como un exportador de hidrógeno verde. Al abordar estos vacíos, se espera contribuir al desarrollo de una estrategia efectiva para la producción y comercialización de hidrógeno en el país.

## 4 METODOLOGIA

Este estudio se realizará mediante un enfoque descriptivo y comparativo. Se utilizarán datos secundarios provenientes de informes gubernamentales y académicos sobre el hidrógeno verde y las energías renovables del Perú y Brasil. Se analizarán las políticas públicas y se realizarán comparaciones estadísticas sobre el potencial renovable de ambos países. Adicionalmente, se tomarán en cuenta la información extraída de capacitaciones, conferencias y foros con expertos en energía para obtener una perspectiva cualitativa sobre el desarrollo del hidrógeno verde en Perú.

Es crucial destacar que este trabajo se fundamenta en una investigación de naturaleza conceptual, la cual se centra en la exploración y análisis de conceptos fundamentales relacionados con la producción de hidrógeno con fines energéticos en el contexto peruano.

El enfoque metodológico se orienta hacia la comprensión profunda y la evaluación crítica de teorías, modelos y principios fundamentales que sustentan la viabilidad y el potencial de este recurso energético en el país. Esta investigación conceptual no solo busca examinar la factibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde por electrólisis del agua, sino también proporcionar una base teórica sólida para la formulación de estrategias y políticas energéticas a nivel regional y nacional.

Para evaluar el estado del hidrógeno verde en Perú, es fundamental establecer una comparación con Brasil, un país que ha avanzado significativamente en la diversificación de su matriz energética y en la promoción del hidrógeno de bajas emisiones. Brasil se posiciona como un referente en la región, liderando procesos de transición energética con una fuerte integración de energías renovables y el desarrollo de políticas para el hidrógeno verde. Por ello, su experiencia servirá como parámetro de referencia para analizar el nivel de avance y las oportunidades de Perú en este sector.

El análisis comparativo se basará en datos provenientes de los balances energéticos nacionales de ambos países, incluyendo información sobre matriz energética, emisiones, capacidad de producción de hidrógeno y políticas de incentivo. Estos datos serán organizados en tablas comparativas, facilitando la identificación de diferencias y similitudes entre ambos escenarios.

El escenario de otro país, como Brasil, en relación con su matriz energética, emisiones, producción de hidrógeno, etc. es necesario hacer una comparación para poder ver hasta dónde está el avance en Perú. Haciendo tablas comparativas de datos suministrados por los Balances Nacionales de Energía de los países en mención.

Asimismo, permite identificar áreas de investigación y desarrollo que pueden impulsar la adopción y la implementación exitosa de tecnologías innovadoras en el campo energético. Por lo tanto, cada paso de nuestra metodología está diseñado para profundizar en la comprensión conceptual de este tema, contribuyendo así al avance del conocimiento y a la toma de decisiones informadas en el ámbito energético del Perú.

Según el estudio realizado por H2PERU (2021), la identificación de zonas con potencial para la producción de hidrógeno en Perú se realizó en etapas, comenzando con un análisis a nivel nacional y luego priorizando regiones como el norte, oriente, centro y sur. Posteriormente, se estimó el costo nivelado del hidrógeno (LCOH), considerando criterios como la presencia de zonas industriales, la infraestructura eléctrica, el acceso a agua y gas, la conectividad (camino, puertos y líneas férreas), el desglose del consumo energético y la topografía del territorio [H2PERU, 2021]. De acuerdo con H2PERU (2021), la empresa ENGIE desarrolló un software interno para la optimización de la cadena de valor del hidrógeno, el cual fue utilizado para calcular los costos de producción. Asimismo, para los cálculos de transporte, se consideró el uso de tuberías hacia los principales centros de consumo por departamento. La Economía del Hidrógeno debe ser analizada de forma integrada, considerando múltiples departamentos con el fin de optimizar la satisfacción de la demanda y aprovechar economías de escala en las tecnologías presentes a lo largo de la cadena de valor del H<sub>2</sub>.

El Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés, Levelized Cost of Hydrogen) es el resultado de la división del Valor Presente del Gasto de Capital (CAPEX, Capital Expenditure) y los Costos Operacionales y de Mantenimiento (OPEX, Operational Expenditure) de las instalaciones relacionadas con la producción de hidrógeno, entre el valor del hidrógeno producido durante el período de análisis del proyecto.

- CAPEX (Capital Expenditure): Inversiones realizadas por una empresa para adquirir, mejorar o mantener activos a largo plazo, como edificios, terrenos, maquinaria o equipos. Estos gastos suelen ser significativos y afectan la situación financiera y la rentabilidad futura de la empresa [MUNICH BUSINESS SCHOOL, 2025].
- OPEX (Operating Expenditure): Gastos asociados al funcionamiento diario de una empresa, incluyendo costos como alquileres, salarios, servicios públicos, marketing y ventas, material de oficina y otros similares. Estos gastos impactan directamente en el beneficio de la empresa en un ejercicio fiscal determinado. [MUNICH BUSINESS SCHOOL, 2025].

La fórmula del LCOH es una herramienta fundamental para evaluar la competitividad de proyectos de producción de hidrógeno, permitiendo comparaciones entre distintas alternativas de producción y evaluando cómo diversos aspectos de diseño influyen en los costos a lo largo de la vida útil del proyecto [MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE, 2024].

Entonces el LCOH es resultado de la división del Valor Presente del CAPEX y OPEX de las instalaciones relacionadas al hidrógeno, y el valor del hidrogeno producido durante el periodo de análisis del proyecto. Según AgoraEnergywende (2022) el Costo Nivelado de hidrógeno LCOH puede ser calculado conforme la ecuación 1 que se muestra a continuación.

Ecuación 1: Fórmula del LCOH

$$LCOH = \frac{LHV}{\eta_{sys,LHV}} \left( \left( \left( \frac{\frac{i}{100} * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^n}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1} + \frac{OPEX}{100} \right) \frac{CAPEX}{\tau} + E \right) \right)$$

Fuente: Adaptado de Agora Energywende (2022)

**LCOH:** Costo Nivelado de Energía  $\left[ \frac{\text{USD}}{\text{kg H}_2} \right]$

**LHV:** Poder Calorífico Inferior del H<sub>2</sub> (del inglés Lower Heating Value)  $\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2} \right]$

**$\eta_{sys,LHV}$ :** Eficiencia del sistema en base al LHV

**$i$ :** Tasa de descuento [%]

**$n$ :** Vida útil del sistema [años]

**OPEX:** Gasto Operativo anual como % del CAPEX

**CAPEX:** Costo de Inversión  $\left[ \frac{\text{USD}}{\text{kW}} \right]$

**$\tau$ :** Horas de Operación plena al año [H]

**E:** Precio de la electricidad  $\left[ \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \right]$

De acuerdo con AgoraEnergywende (2023) e IRENA (2020), el CAPEX es el costo de inversión por unidad de potencia instalada el cual oscila entre los 500 a 1400 [USD/kW], para un electrolizador alcalino (AWE) estima un valor de 1000 [USD/kW]. El poder calorífico inferior del H<sub>2</sub> es de 33,33 kWh/kg, lo que significa que 1 kg de hidrógeno produce 33,33 kWh de energía. La eficiencia del sistema con base al LHV es la cantidad de energía útil [H<sub>2</sub>] que se obtiene por unidad de electricidad consumida, que se estima para un electrolizador AWE entre un 60 – 70 %, para PEM y SOEC, las eficiencias son mayores, pero con costos elevados. Las Horas equivalente a plena carga ( $\tau$ ) son la cantidad de horas/año que el sistema funciona a plena capacidad; dependiendo de la fuente renovable, como por ejemplo la fuente solar de 2000-3000 h/año, eólica 3000-5000 h/año y por último un sistema híbrido o conectado con la red, hasta 8000 h/año. La vida útil del sistema ( $n$ ), es decir, cuantos años se espera que opere el sistema, típicamente es de 10 - 20 años para electrolizadores, pues depende mucho de los materiales, las condiciones de operación y del mantenimiento. La tasa de descuento ( $i$ ), es una tasa usada para traer valor presente los costos futuros, se toma 8% como valor estándar internacional, pero también nos indica que para países en desarrollo esta tasa varía desde los 6 – 12%. El costo de electricidad [E], es el costo de energía por electrolizador, para el caso de Perú se utilizará 0,03 [USD/kWh] según datos de los Pliegos Tarifarios de Osinergmin (2025), los cuales establecen las tarifas eléctricas aplicables en Perú [OSINERGMIN, 2025].

Actualmente, existen cálculos del Costo Nivelado de Hidrógeno LCOH en Perú según H<sub>2</sub>Perú, pero se ha añadido diferentes escenarios sobre cómo cambia el LCOH en función del costo de electricidad renovable, costo del CAPEX con tecnologías más avanzadas y futuras reducciones; y los factores de carga de las energías renovables, como hidroeléctrica, solar y eólica en distintas zonas del país. Para lo cual utilizaremos un gráfico de sensibilidad mostrando como cambia el LCOH según variaciones en los costos claves. Una comparación con diferentes tecnologías de electrólisis, incluyendo tecnologías emergentes que H<sub>2</sub>Perú no haya evaluado, como electrólisis de alta temperatura, para lo cual se realizará una tabla comparativa con el LCOH estimado para cada Tecnología en Perú. Se construirá un modelo de las diferentes regiones con sus costos estimados de producción en Perú, ya que no todas las zonas del país tienen el mismo costo de electricidad ni la misma disponibilidad hídrica. Se proyectará en un gráfico como el OPEX disminuiría con economías a escala, evaluando la reducción de costos por masificación del hidrógeno. Para finalizar, se realizará un gráfico comparativo mostrando el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) en diferentes países, con el objetivo de analizar la competitividad de Perú en este sector. Además, se llevarán a cabo simulaciones avanzadas, las cuales evaluarán el impacto de la variabilidad del costo de la electricidad en la producción de hidrógeno en Perú, permitiendo estimar escenarios de estabilidad y fluctuación de precios. Asimismo, se modelará el efecto de subsidios gubernamentales sobre el LCOH, considerando distintos esquemas de incentivos económicos aplicables al sector del hidrógeno y su impacto en la reducción de costos en un período determinado.

Un estudio de H<sub>2</sub> Perú (2021) y ENGIE Impact (2021) proyecta una disminución del LCOH en Perú a lo largo del tiempo:

- 2025: 2.6 USD/kg H<sub>2</sub>

- 2040: 1.9 USD/kg H<sub>2</sub>
- 2050: 1.3 USD/kg H<sub>2</sub>

Estas reducciones se atribuyen a avances tecnológicos y economías de escala en la producción de hidrógeno verde [BANCOMUNDIAL, 2023]. Se estima que para 2030, el LCOH en Perú oscilará entre 3 y 6 USD/kg H<sub>2</sub>, con una reducción del 40% para 2050, alcanzando precios competitivos a nivel internacional. [H2PERÚ, 2024]. Proyecciones indican que para 2050, el LCOH en Perú podría situarse entre 1.13 y 1.61 USD/kg H<sub>2</sub>, dependiendo de la zona de producción [ENERGÍA ESTRATÉGICA, 2021]. Se menciona que, en 2018, el costo de producir hidrógeno verde mediante electrólisis con membranas poliméricas (PEM) fue de aproximadamente 3.50 USD/kg H<sub>2</sub> [LIZÁRRAGA, 2024]. Aunque las fuentes mencionadas no detallan explícitamente el efecto de subsidios en el LCOH, es razonable inferir que políticas de apoyo, como incentivos fiscales y subsidios directos, podrían acelerar la reducción de costos. Estas políticas pueden incentivar inversiones en tecnología y producción, contribuyendo a alcanzar las proyecciones de costos más bajos en plazos más cortos.

Según IRENA (2020), los subsidios en infraestructura pueden desempeñar un papel clave en la competitividad del hidrógeno verde, destacando la importancia de políticas de apoyo financiero para reducir costos de inversión en plantas de electrólisis y fomentar su adopción a gran escala [IRENA, 2020]. De acuerdo con la IEA (2022), en regiones como Chile, la Unión Europea y Estados Unidos, los gobiernos han implementado incentivos financieros para proyectos de hidrógeno, priorizando esquemas de apoyo en CAPEX y OPEX para acelerar su desarrollo [IEA, 2022]. En el caso de Chile, el gobierno ha impulsado proyectos de hidrógeno verde a través de subsidios directos de hasta 30 millones de dólares para iniciativas de más de 10 MW, lo que ha permitido el desarrollo de infraestructura clave en el sector [BID, 2021]. Por su parte, H2Perú (2021) recomienda la implementación de incentivos fiscales y subsidios en infraestructura para reducir el costo de producción del hidrógeno en el país y fortalecer su competitividad [ENGIE IMPACT; H2PERU, 2021]. Estas estrategias reflejan la relevancia de los incentivos económicos como un mecanismo para impulsar la transición energética y consolidar el hidrógeno verde como una alternativa viable en el mercado energético global.

Para la selección de las regiones de estudio en Perú, se han considerado las regiones norte y sur debido a sus ventajas en recursos naturales. La región norte destaca por su significativo potencial eólico, especialmente en departamentos como Piura y Lambayeque, que juntos poseen un potencial eólico estimado de 14 GW [PERUENERGIA, 2024]. Por otro lado, la región sur cuenta con excepcionales recursos solares, con valores de radiación directa que superan los 3,000 kWh/m<sup>2</sup>, superiores a los de otras zonas geográficas con proyectos en ejecución, como Marruecos y Emiratos Árabes [ENERGY NEWS, 2020].

Los centros de consumo y producción con potencial para el hidrógeno se encuentran en departamentos con alta concentración de actividades como minería, manufactura, electricidad, gas, agua y transporte. Por ejemplo, en el primer trimestre de 2024, la producción del departamento de Moquegua creció un 15.2%, impulsada por la actividad minera, mostrando dinamismo por siete trimestres consecutivos [INEI, 2024]. Además, departamentos como Piura y Lambayeque han destacado en sectores como agropecuario, manufactura y transporte [INEI, 2023]. Esta combinación de recursos naturales y actividades industriales posiciona a las regiones norte y sur de Perú como áreas estratégicas para el desarrollo del hidrógeno verde.

El cálculo del costo de importación de electrolizadores en Perú considera diversos factores que influyen en el precio final del equipo al momento de su nacionalización. Estos incluyen el precio base del proveedor extranjero, los costos de transporte internacional (flete) y seguro, así como los tributos y aranceles aplicables en el país. En Perú, los derechos arancelarios (Ad-Valorem) varían

entre 0%, 4%, 6% y 11%, dependiendo de la subpartida nacional del producto [SUNAT, 2025] Además, se aplican impuestos como el Impuesto General a las Ventas (IGV) del 18%, el Impuesto de Promoción Municipal (IPM) del 2% sobre el IGV y, en algunos casos, el Impuesto Selectivo al Consumo (ISC) [GOB.PE, 2025]

A estos costos se suman los gastos de despacho aduanero, que incluyen honorarios de agentes de aduana, costos de documentación y trámites administrativos para la nacionalización del equipo. También se consideran los costos de transporte interno y acarreo, que dependen de la distancia desde el puerto de ingreso hasta el destino final del electrolizador, así como los gastos bancarios y financieros relacionados con la transacción internacional. Es importante señalar que en la estimación final se excluyen los impuestos que pueden ser utilizados como crédito tributario, así como los intereses derivados de la financiación de la compra, en caso de existir. Para determinar con precisión el costo total de importación, se recomienda realizar una evaluación detallada considerando las regulaciones vigentes y las particularidades del producto importado [OSINERGMIN, 2025].

Según la información proporcionada por el Centro de Hidrógeno del Parque Tecnológico Itaipu (PTI), el Módulo de Electrólisis HYTRON modelo HyPEM 20-40 tiene un valor unitario de R\$ 2.650.000,00. Este dato sirve como referencia para comprender los costos asociados a la infraestructura de producción de hidrógeno mediante electrólisis, sin que este valor haya sido considerado en los cálculos de la presente investigación.

## **5 RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **5.1 ASPECTOS CLIMÁTICOS, ENERGÉTICOS Y SOCIALES ASOCIADOS A LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PERÚ.**

Perú, ubicado en la costa occidental de América del Sur, limita al norte con Ecuador y Colombia, al este con Brasil, al sureste con Bolivia, al sur con Chile y al oeste con el océano Pacífico. Con una superficie de 1.285.220 km<sup>2</sup>, es uno de los países más extensos de la región y cuenta con una geografía diversa, conformada por la costa, sierra y selva, lo que influye directamente en su matriz energética y en su vulnerabilidad al cambio climático [INEI, 2024]

En términos demográficos, Perú tiene una población de aproximadamente 33,8 millones de habitantes, concentrados principalmente en la capital, Lima, que es el centro político, económico e industrial del país [BANCOMUNDIAL, 2025]. La economía peruana es una de las más dinámicas de América Latina, con un Producto Interno Bruto (PIB) de USD 241,6 mil millones en 2023 y un crecimiento proyectado del 2,7% para 2024 [BCRP, 2023]. Su desarrollo económico está impulsado por sectores como la minería, manufactura, agroindustria y servicios, siendo la minería un pilar fundamental, ya que representa alrededor del 10% del PIB y más del 60% de las exportaciones nacionales [MINEM, 2024].

Sin embargo, a pesar de su crecimiento económico, Perú enfrenta desafíos en su transición energética, ya que sigue dependiendo en gran medida de fuentes no renovables como el gas natural y el petróleo. No obstante, posee un gran potencial en energías renovables, especialmente en energía solar en el sur, eólica en el norte e hidroeléctrica en la sierra, lo que lo convierte en un país estratégico para el desarrollo del hidrógeno verde como una alternativa sostenible en su matriz energética [IRENA, 2024].

En el ámbito agrícola, el cambio climático ha incrementado la sensibilidad de los cultivos en los Andes peruanos, favoreciendo procesos de erosión del suelo y reduciendo la fertilidad, lo que compromete la seguridad alimentaria. Además, el retroceso de los glaciares andinos, que actúan como reservas hídricas naturales, ha llevado al deterioro de cuencas fluviales y a una disminución en la disponibilidad de agua, afectando tanto a las actividades agrícolas como al consumo humano. Estas

alteraciones también impactan negativamente en la infraestructura del país, incrementando la vulnerabilidad de las comunidades rurales y urbanas frente a desastres naturales [SEI, 2021].

### 5.1.1 ASPECTOS CLIMÁTICOS: VULNERABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN PERÚ

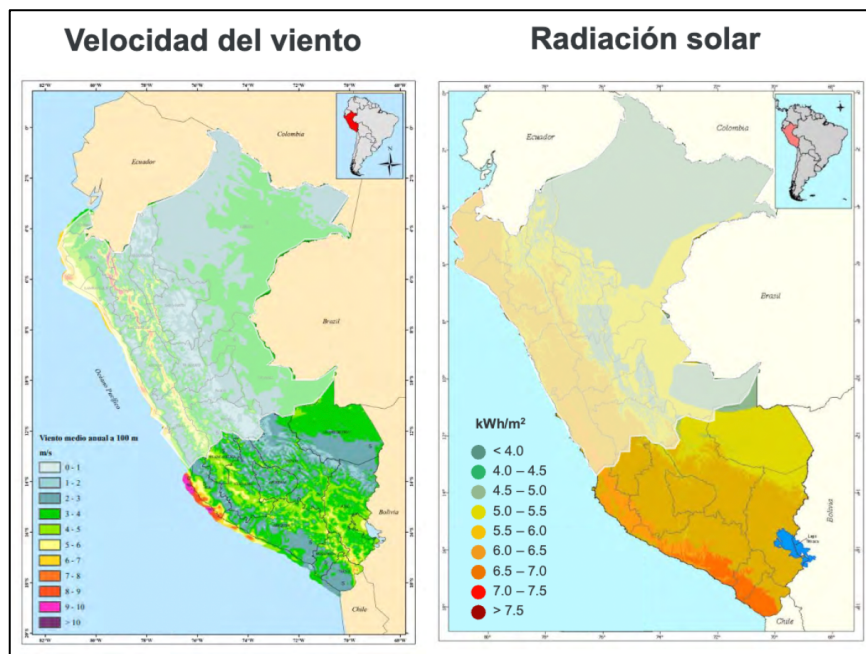
Perú es uno de los países más vulnerables al cambio climático debido a su diversidad geográfica, lo que lo expone a fenómenos extremos como sequías, inundaciones y desglaciación de los Andes. Según el IPCC (2023), el aumento de la temperatura global impactará gravemente sectores clave como la agricultura, el acceso al agua y la infraestructura del país. Además, el retroceso de los glaciares andinos compromete la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades productivas, lo que hace urgente la implementación de estrategias de mitigación y adaptación [IPCC, 2023]

### 5.1.2 ASPECTOS ENERGÉTICOS: DEPENDENCIA DE ENERGÍAS NO RENOVABLES Y POTENCIAL PARA LA TRANSICIÓN

Actualmente, Perú depende en gran medida de fuentes no renovables, como el gas natural y el petróleo, para abastecer su matriz energética. Sin embargo, el país cuenta con un gran potencial para expandir su capacidad en energía solar, eólica e hidroeléctrica [MINEM, 2023]. La descarbonización del sector energético es clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), alineando a Perú con los compromisos climáticos internacionales y con estrategias de desarrollo sostenible.

Energía Solar: La región sur del país cuenta con altos niveles de radiación solar, lo que la convierte en una de las zonas más favorables del mundo para la instalación de plantas fotovoltaicas [IRENA, 2023]. Para lo cual se muestra en la Figura 4 y en Figura 5 la adaptación del estudio que realizó H2PERU y resalta que, efectivamente, la zona sur del Perú tiene una radiación solar mayor que la zona norte del país, y van desde los 5.0 kWh/m<sup>2</sup> hasta los 7.0 kWh/m<sup>2</sup> [H2PERU, 2021].

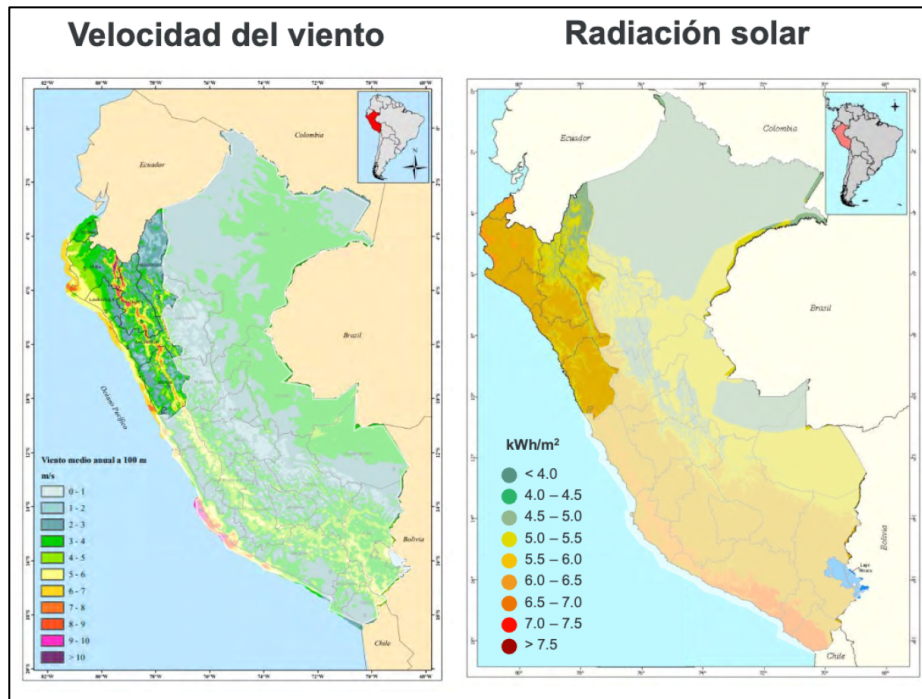
Figura 4: Mapa de Velocidad del Viento y radiación Solar H2peru (2021)



Fuente: Adaptado de H2Peru, 2021

Energía Eólica: Las regiones costeras del norte tienen un considerable potencial eólico, que ya ha comenzado a aprovecharse con la instalación de parques eólicos [IRENA, 2023]. Según H2Peru (2021), muestra que la velocidad del viento en la costa norte de Perú (Figura 5) es mayor (5 m/s – 7 m/s) que en la costa sur del Perú (3 m/s – 5 m/s).[H2Peru, 2021].

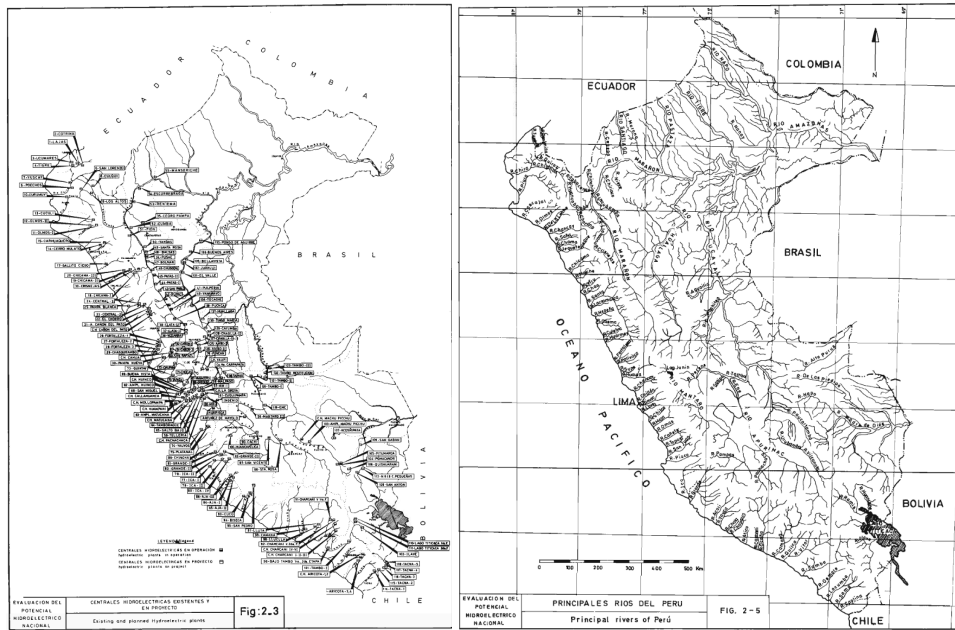
Figura 5: Mapa de Velocidad del Viento y radiación Solar H2peru (2021) del norte del Perú



Fuente: Adaptado de H2Peru, 2021

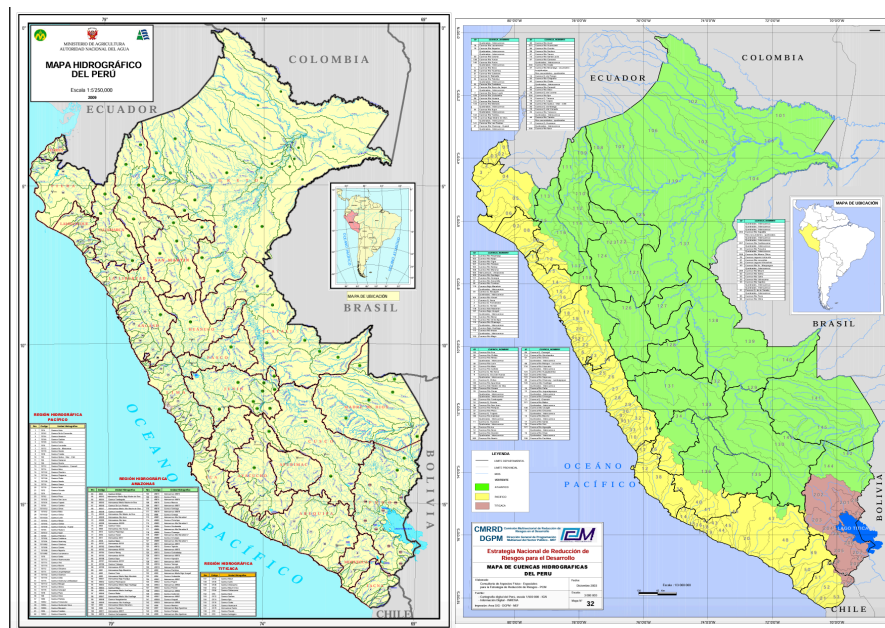
Energía Hidroeléctrica: Representa una parte importante de la matriz energética peruana, pero enfrenta desafíos como la variabilidad hídrica y la necesidad de mejorar la eficiencia de las plantas existentes [OSINERGMIN, 2024]. Según el Ministerio de Energía y Minas MINEM (1979) nos muestra en la Figura 06 la evaluación del potencial hidroeléctrico nacional; siendo el mapa de la izquierda el mapa de centrales hidroeléctricas y existentes para ese año y en el mapa de la derecha el mapa de los principales ríos del Perú. [MINEM, 2009] Y, de acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua ANA (2009), nos muestra en la Figura 07 el Mapa hidrográfico del Perú de los años 2009 [ANA, 2009] y 2003 [ANA, 2003].

Figura 06: Mapa de la evaluación del potencial hidroeléctrico nacional



Fuente: Adaptado de MINEM, 2009

Figura 07: Mapa hidrográfico del Perú de los años 2009 [ANA, 2009] y 2003 [ANA, 2003].



Fuente: Adaptado de ANA, 2009 y ANA, 2003

### **5.1.3 ASPECTOS SOCIALES: IMPACTOS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA**

La transición hacia una matriz energética más limpia en Perú con la incorporación del hidrógeno verde tiene importantes implicancias sociales y económicas. Por un lado, el desarrollo de esta industria puede impulsar la creación de nuevos mercados y generar empleos en sectores clave [CEPAL, 2023]. Actualmente, la economía peruana se basa principalmente en la minería, manufactura, agroindustria y transporte, lo que representa una oportunidad para integrar el hidrógeno como un vector energético en estas áreas estratégicas [BCRP, 2024].

**Minería y manufactura:** La industria minera, que representa alrededor del 10% del PIB y más del 60% de las exportaciones nacionales, depende en gran medida de combustibles fósiles para sus operaciones. La adopción del hidrógeno verde como combustible para camiones mineros y procesos industriales permitiría reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>, mejorando la competitividad del sector en el marco de los acuerdos climáticos internacionales [MINEM, 2024].

**Agroindustria:** En este sector, el hidrógeno verde podría impulsar la producción local de fertilizantes sostenibles, como el amoníaco verde, reduciendo la dependencia de importaciones de urea desde países como Rusia, Argelia y China [SUNAT/ADUANET, 2019]. Esto fortalecería la seguridad alimentaria y reduciría costos para los productores agrícolas.

**Transporte y movilidad sostenible:** La introducción del hidrógeno en el transporte público y en el sector logístico podría ser una alternativa viable para la descarbonización de flotas pesadas, como autobuses y camiones de carga. Este modelo ya está siendo adoptado en países como Chile y Brasil, donde existen incentivos para la movilidad con hidrógeno [IEA, 2023].

**Generación de hidrógeno para exportación:** Con el alto potencial de energías renovables en Perú, el país podría posicionarse como un exportador de hidrógeno verde, especialmente hacia mercados como Asia y Europa, donde la demanda de hidrógeno de bajas emisiones está en crecimiento [IRENA, 2024].

Desde una perspectiva económica, la exportación de hidrógeno verde representa una fuente significativa de ingresos para el país, atrayendo inversiones y generando empleo en sectores vinculados a tecnologías limpias. Ambientalmente, su implementación contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero al sustituir el hidrógeno derivado de combustibles fósiles. [ARANIBAR, 2024] En sectores como la minería, su uso puede disminuir considerablemente la contaminación generada por el transporte pesado, mejorando así la calidad de vida de las poblaciones cercanas. Además, el desarrollo de esta industria impulsa la innovación, fomenta la formación técnica especializada y promueve una transición energética con impactos sociales positivos hacia una economía más sostenible [ARANIBAR, 2024]

En conclusión, el hidrógeno verde no solo contribuiría a la reducción de emisiones en sectores clave, sino que también abriría nuevas oportunidades económicas para el país, diversificando la matriz productiva y generando empleo en áreas estratégicas. Sin embargo, para que esto sea una realidad, es fundamental que existan políticas de incentivo y regulaciones claras que fomenten la inversión en esta tecnología en Perú.

## **5.2 MARCO REGULATORIO Y LAS POLÍTICAS PÚBLICAS RELACIONADAS CON LA PRODUCCIÓN Y USO DEL HIDRÓGENO VERDE EN EL PAÍS.**

El hidrógeno verde no es una tecnología nueva en sí misma, ya que la electrólisis para su producción ha sido conocida y utilizada durante décadas. Sin embargo, su aplicación como vector energético en la transición hacia una economía baja en carbono ha ganado relevancia en los últimos

años, impulsada por el desarrollo de tecnologías más eficientes y la necesidad de descarbonizar sectores difíciles de electrificar. Entre estas tecnologías destacan los avances en células de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) y células de combustible de óxido sólido (SOFC), que han mejorado la eficiencia y viabilidad del hidrógeno en aplicaciones industriales y de movilidad [GRZ Technologies, 2023].

En el caso de Perú, si bien el desarrollo de políticas específicas sobre hidrógeno verde aún está en sus primeras etapas, ya se observan algunos avances en la creación de marcos regulatorios que favorecen la incorporación de energías renovables y tecnologías limpias en la matriz energética. Como lo son mostrados a continuación:

- Ley de Promoción de la Inversión en Energías Renovables No Convencionales (ERNCC) (Ley N° 1002), promulgada en 2008, que establece incentivos para la inversión en energía solar, eólica, geotérmica y biomasa, siendo un primer paso hacia el aprovechamiento del hidrógeno verde, ya que la producción de hidrógeno verde requiere de fuentes renovables para ser verdaderamente sostenible. [PERÚ, 2008]
- Ley General del Ambiente (Ley N° 28611), que promueve el uso de tecnologías limpias y la protección del ambiente, lo que podría ser una base para la creación de futuros incentivos para la producción de hidrógeno verde. [PERÚ, 2005]
- Planes Nacionales de Energía: El gobierno de Perú ha incorporado en su Plan Energético Nacional 2014-2025 y en otros programas, como los reportes del MINEM, la necesidad de diversificar la matriz energética hacia energías limpias, donde el hidrógeno verde podría jugar un papel importante en los próximos años. [MINEM, 2024].

Desde el 23 de Marzo del 2024, según el MINAM, se publicó la Ley de Fomento del hidrógeno verde, la cual tiene por objeto fomentar la investigación, el desarrollo, la producción, la transformación, el almacenamiento, el acondicionamiento, el transporte, la distribución, la comercialización, la exportación y el uso del hidrógeno verde como combustible y como vector energético, en sus diferentes aplicaciones, para el aprovechamiento y utilización en la matriz energética nacional a fin de mejorar la calidad de vida de la población como resultado de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), coadyuvando al cumplimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) del país [PERÚ, 2024].

La reciente publicación de la Ley de Fomento del Hidrógeno Verde marca un primer paso en la estructuración de incentivos y regulaciones para su producción y uso en el país [MINAM, 2024]. A nivel regional, países como Chile y Brasil han implementado estrategias más avanzadas, con políticas claras de financiamiento y regulación, lo que representa un modelo de referencia para el desarrollo del hidrógeno en Perú [IEA, 2023].

En el escenario internacional, varios países ya han desarrollado estrategias específicas para la producción y uso del hidrógeno verde, muchos de ellos con el objetivo de cumplir con los compromisos de reducción de emisiones en el marco del Acuerdo de París. Perú, como signatario del Acuerdo, está en proceso de desarrollar políticas públicas en torno a esta nueva tecnología, aunque el proceso es lento en comparación con otros países de la región como Chile y Brasil.

Chile ya lanzó su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en 2020, con el objetivo de ser uno de los principales exportadores de hidrógeno verde en el mundo para 2040. Esto lo convierte en un caso relevante para el estudio comparativo en tu tercer objetivo, ya que Perú podría seguir el ejemplo de Chile en la implementación de una estrategia clara. [CHILE, 2020]

En el contexto del hidrógeno de bajas emisiones de carbono, Brasil ha avanzado significativamente en la creación de un marco legal y programas específicos para fomentar su desarrollo y uso. La Ley de Renovables y el Plan Nacional de Energía 2050 apoyan activamente la transición hacia tecnologías limpias, incluidas las de hidrógeno verde [BRASIL, 2020]. Perú puede tomar como referencia estas políticas para crear un ambiente favorable para las inversiones en hidrógeno [BRASIL, 2020].

A continuación, se destacan las principales leyes promulgadas recientemente:

- Ley N° 14.948, de 2 de agosto de 2024: Esta ley establece el marco legal del hidrógeno de baja emisión de carbono y dispone sobre la Política Nacional del Hidrógeno de Baja Emisión de Carbono. Además, instituye incentivos para la industria del hidrógeno de baja emisión y crea el Régimen Especial de Incentivos para la Producción de Hidrógeno de Baja Emisión de Carbono (Rehidro) [BRASIL, 2024]
- Ley N° 14.990, de 27 de septiembre de 2024: Esta ley instituye el Programa de Desarrollo del Hidrógeno de Baja Emisión de Carbono (PHBC) y modifica la Ley N° 14.948 [BRASIL, 2024]. El PHBC tiene como objetivo constituir una fuente de recursos para la transición energética a partir del uso del hidrógeno de baja emisión de carbono, ofreciendo créditos fiscales para incentivar su producción y consumo [SOARES, 2024].
- Ley N° 15.042, de 11 de diciembre de 2024: Esta ley establece el Sistema Brasileño de Comercio de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (SBCE), creando un mercado regulado para la comercialización de créditos de carbono, lo que puede beneficiar a proyectos de hidrógeno de baja emisión al generar ingresos adicionales por la reducción de emisiones [BRASIL, 2024].
- Ley N° 15.103, de 22 de enero de 2025: Esta ley instituye el Programa de Aceleración de la Transición Energética (PATEN), que busca promover la adopción de tecnologías limpias y la descarbonización de la matriz energética brasileña, incluyendo el fomento al hidrógeno de baja emisión de carbono [BRASIL, 2025].

Estas iniciativas legislativas en Brasil pueden servir como referencia para Perú en la formulación de su propio marco regulatorio y políticas públicas orientadas al desarrollo del hidrógeno verde. La implementación de leyes similares podría impulsar la producción y uso del hidrógeno de bajas emisiones en el país, contribuyendo a la transición hacia una matriz energética más sostenible y diversificada.

### **5.3 COMPARACIÓN DEL POTENCIAL RENOVABLE DE LA MATRIZ ENERGÉTICA Y LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO RENOVABLE EN PERÚ CON OTROS PAÍSES DE LA REGIÓN, ESPECIALMENTE BRASIL.**

#### **5.3.1 POTENCIAL RENOVABLE DE PERÚ**

Perú tiene un enorme potencial de energías renovables que, si se aprovecha adecuadamente, podría colocar al país en una posición destacada para la producción de hidrógeno verde. Los recursos renovables más prominentes en Perú son la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2022), estos son los aspectos clave del potencial renovable en el país:

- **Energía Solar:** Perú tiene una de las mayores tasas de radiación solar del mundo, particularmente en el sur del país, como en Arequipa, Moquegua y Tacna. Estas regiones presentan condiciones óptimas para el desarrollo de plantas solares fotovoltaicas. Según informes del MINEM (2022) Perú recibe entre 5 y 6 kWh/m<sup>2</sup>/día en estas zonas, lo que es ideal para la generación de electricidad renovable y, por ende, para la producción de hidrógeno verde [MINEM, 2022].
- **Energía Eólica:** El país también tiene importantes recursos eólicos, especialmente en las regiones costeras del norte (Piura, Tumbes y Lambayeque). Estudios del MINEM, 2022 muestran que Perú tiene un potencial eólico de 22 GW, de los cuales solo una pequeña fracción ha sido explotada hasta la fecha, con proyectos eólicos que han comenzado a operar en los últimos años [MINEM, 2022].
- **Energía Hidroeléctrica:** La energía hidroeléctrica ya juega un papel importante en la matriz energética del país. En 2022, la energía hidroeléctrica representó el 56% de la producción eléctrica del país. El país tiene un potencial de 69 GW de energía hidroeléctrica, pero menos del 10% de este ha sido explotado. Este recurso puede proporcionar una base estable para la producción de hidrógeno verde a través de electrólisis, ya que el agua es el principal insumo para este proceso [MINEM, 2022].

### 5.3.2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO DE BAJA EMISIÓN EN PERÚ

Perú aún no ha desarrollado una industria significativa de hidrógeno verde, pero organizaciones como H2Perú destacan el potencial del país debido a sus abundantes recursos renovables. Se estima que Perú podría instalar alrededor de 120.000 MW de generación renovable, posicionándose como un exportador competitivo de hidrógeno limpio [BNAMERICAS, 2023].

### 5.3.3 COMPARATIVA CON BRASIL

- **Energía Eólica en Brasil:** Brasil es líder en América Latina en producción de energía eólica, con una capacidad instalada que supera los 25 GW en 2023. La región noreste, incluyendo estados como Rio Grande do Norte y Bahía, concentra el 60% de la potencia de generación eólica nacional [CAF, 2024].
- **Energía Hidroeléctrica en Brasil:** Brasil cuenta con uno de los sistemas hidroeléctricos más grandes del mundo, con proyectos emblemáticos como la represa de Itaipú, y más del 90% de su red energética alimentada por energías renovables [DFSUD, 2024].
- **Proyectos de Hidrógeno Verde en Brasil:** Brasil ha activado diferentes iniciativas para impulsar la inversión en hidrógeno renovable, incluyendo el lanzamiento del Pacto de Hidrógeno Renovable en 2023, con el apoyo de gobiernos regionales, asociaciones privadas y organizaciones internacionales [GOODNEWENERGY, 2024].

### 5.3.4 COMPARATIVA REGIONAL

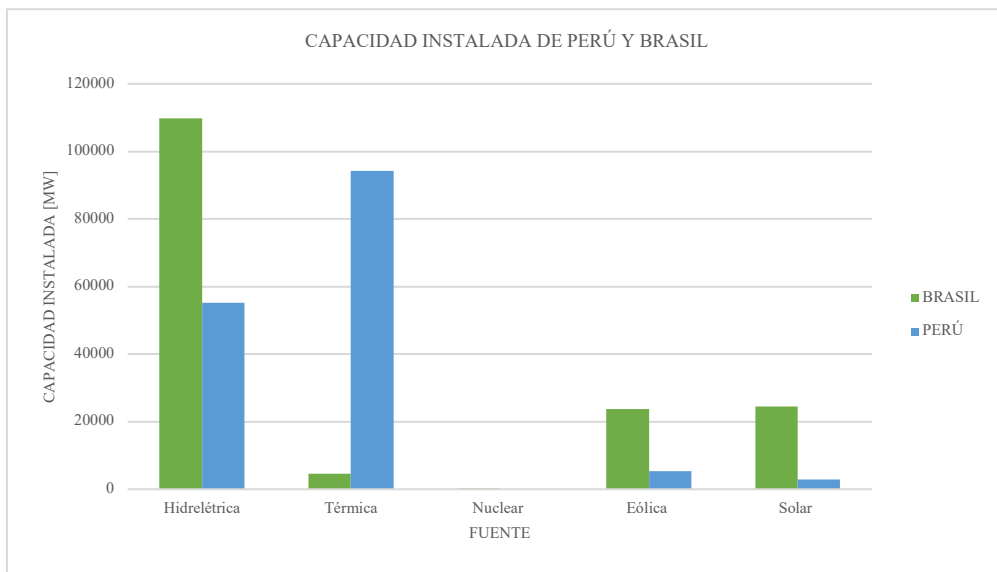
- **Chile:** Chile ha lanzado una ambiciosa estrategia de hidrógeno verde, con el objetivo de convertirse en uno de los principales exportadores de hidrógeno para 2030, aprovechando su excelente radiación solar en el Desierto de Atacama [MINISTERIODENERGIACHILE, 2023; GOBCHILE, 2020].
- **Brasil:** Brasil posee una infraestructura desarrollada para energías renovables y ha avanzado en políticas para incentivar la producción de hidrógeno verde, con proyectos piloto y planes a gran escala [GOODNEWENERGY, 2024].

- Perú: Aunque cuenta con un gran potencial en energías renovables, Perú aún está en fases tempranas en cuanto a la creación de un marco regulatorio específico para el hidrógeno verde. Sin embargo, se estima que el país podría producir hidrógeno de bajas emisiones para abastecer diversos sectores industriales y exportar a mercados internacionales [ENERGYMINAS, 2024]

Estas referencias actualizadas proporcionan una visión detallada del potencial renovable de Perú y su posición en comparación con otros países de la región en el ámbito del hidrógeno de baja emisión.

De acuerdo con el Balance Energético Nacional BEN (2022) [BEN, 2022] y el Balance Nacional de Energía BNE (2024) [BNE, 2024] se muestra la Figura 08 sobre la Capacidad Instalada de Perú [BEN, 2022] y de Brasil [BNE, 2024]. Si bien lo que más predomina en ambos países es la fuente hidroeléctrica, Brasil tiene una ventaja mayor con relación a la capacidad instalada en función a sus fuentes renovables como la Eólica y la Solar, lo que lo posiciona en un lugar más avanzado para la producción de hidrógeno verde.

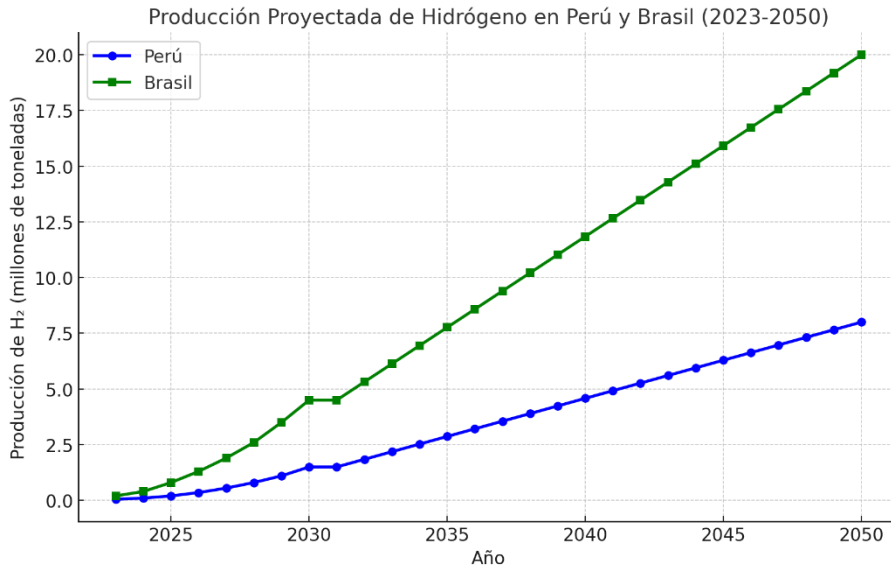
Figura 08: Gráfico de la Capacidad Instalada de Perú y Brasil



Fuente: Adaptado de BEN, 2022 y BNE, 2024

La Figura 09 muestra la proyección de producción de hidrógeno energético en Perú y Brasil con horizonte de 2050. Se puede ver que Brasil tiene un crecimiento mucho más acelerado, con una producción esperada de 3,2 GW para 2030, mientras que Perú proyecta alcanzar 1,0 GW para ese mismo año, comenzando un poco más tarde.

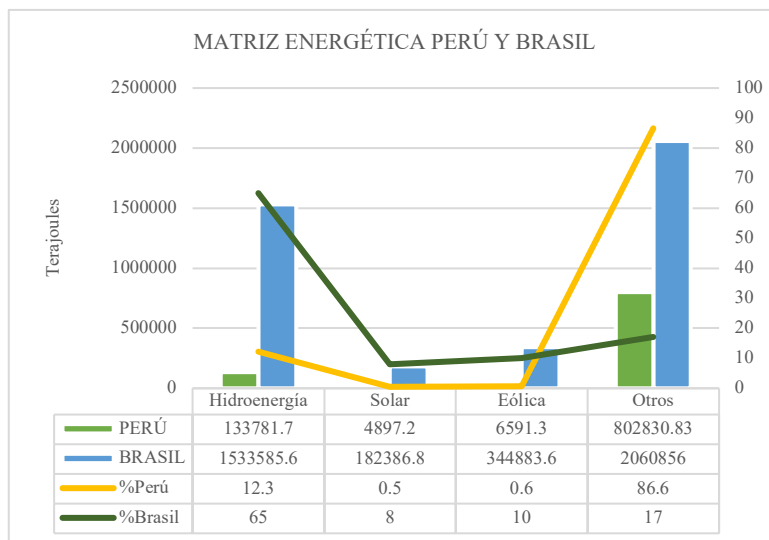
Figura 09: Gráfico de la Producción Proyectada de H2 en Perú y Brasil (2023-2050)



Fuente: Elaboración propia basados con datos de BEN, 2022 y BNE, 2024

La figura 10 muestra un comparativo de la composición de la matriz energética de Perú y Brasil. En Perú, el gas natural es el principal contribuyente a la matriz energética, que se encuentra en la sección de otros y la hidroelectricidad ocupa un segundo lugar importante, pero no dominante como en Brasil. La hidroelectricidad domina la matriz de Brasil, que también tiene una mayor proporción de energías eólica y solar, mientras que Perú aún depende más de fuentes de energía tradicionales o fósiles en su segmento de "otros".

Figura 10: Gráfico comparativo de la Matriz Energética de Perú y Brasil



Fuente: Elaboración propia basados con datos de BEN, 2022 y BNE, 2024

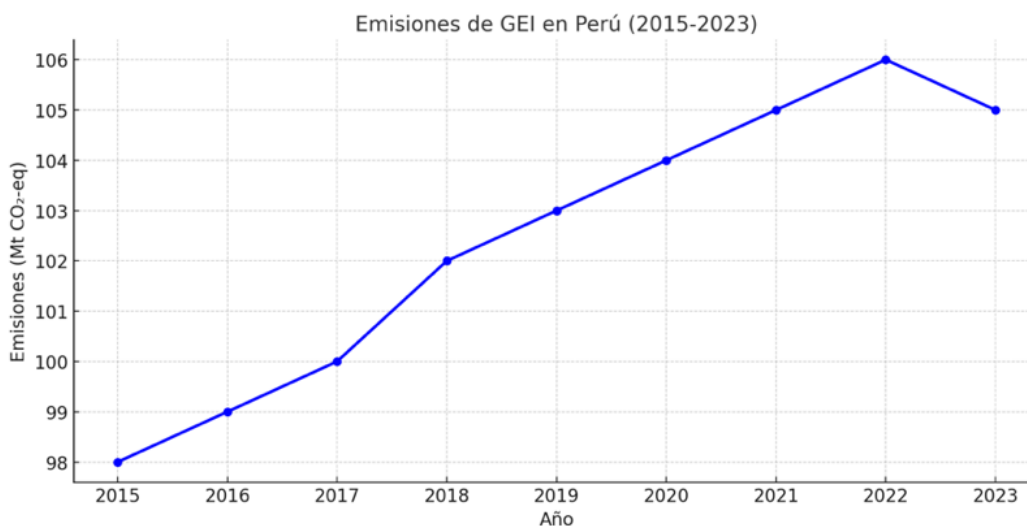
### 5.3.5 COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Un aspecto crucial en la comparación entre Perú y Brasil es el impacto en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Perú ha logrado mantener sus emisiones relativamente bajas debido a su alta proporción de energía hidroeléctrica, pero aún depende de combustibles fósiles para la generación térmica, lo que genera emisiones significativas. [MINEM, 2022] La producción de hidrógeno verde puede ayudar a descarbonizar sectores como la industria pesada y el transporte.

La figura 11 muestra la cantidad de emisiones en Mt CO<sub>2</sub> – eq que produce tanto Perú el cual tuvo un incremento pico en el año 2022 en los sectores principales como lo son el transporte, la industria, residencial, y otros sectores. De la misma forma la figura 12, muestra las emisiones producidas por Brasil, en la cual existe una diferencia de casi 20 veces las emisiones producidas en Perú.

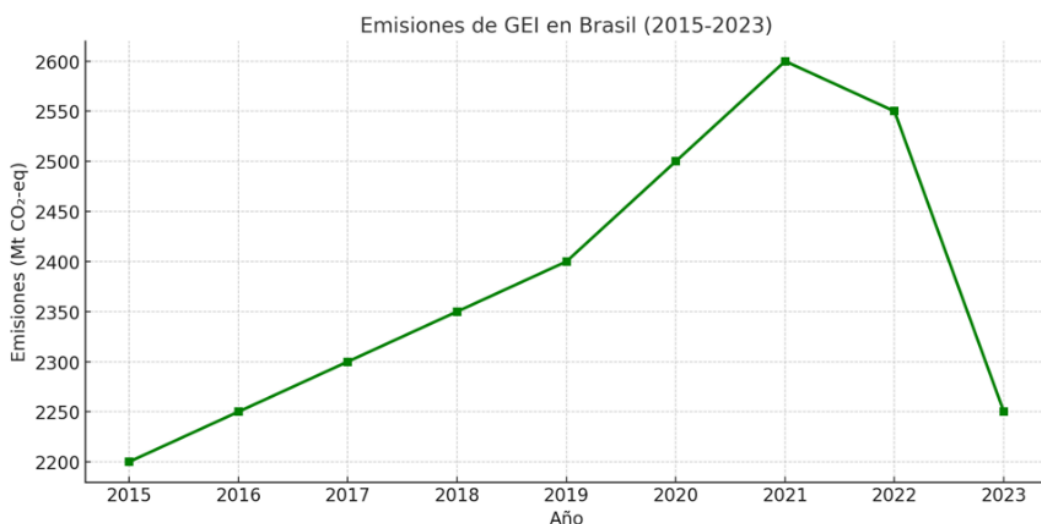
Según datos del Banco Mundial, la población de Perú ha mostrado un crecimiento anual, pasando de aproximadamente 30,97 millones en 2015 a 33,72 millones en 2023 [BANCO MUNDIAL, 2023]. La población de Brasil también ha crecido en este período, aumentando de aproximadamente 204,5 millones en 2015 a 214,3 millones en 2023 [EXPANSIÓN, 2025]

Figura 11: Gráfico de las Emisiones de GEI en Perú (2015-2023)



Fuente: Elaboración propia basados con datos de BANCO MUNDIAL, 2023 y MINEM 2022

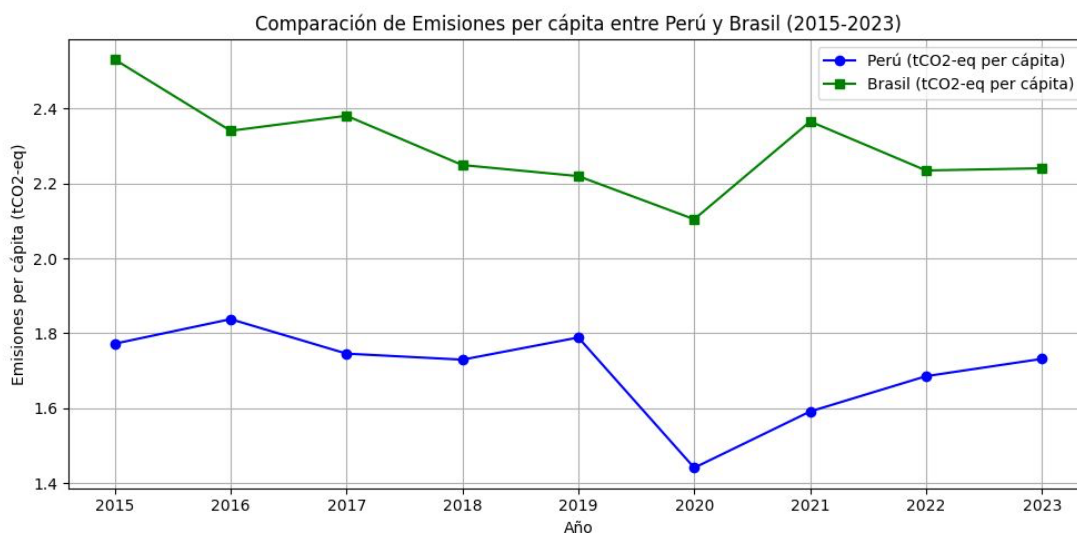
Figura 12: Gráfico de las Emisiones de GEI en Brasil (2015-2023) y EXPANSIÓN, 2025



Fuente: Autoría propia baseados con datos de BANCO MUNDIAL, 2023 y MINEM 2022

De acuerdo con la Figura 13, se hace una comparación efectiva de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre Perú y Brasil, en la cual es fundamental analizar las emisiones per cápita. Este enfoque permite ajustar las diferencias en la población de ambos países y proporciona una evolución temporal, es decir, cómo han cambiado las emisiones per cápita en cada sector desde 2015 hasta 2023.

Figura 13: Gráfico de la comparación de Emisiones per cápita entre Perú y Brasil (2015-2023)



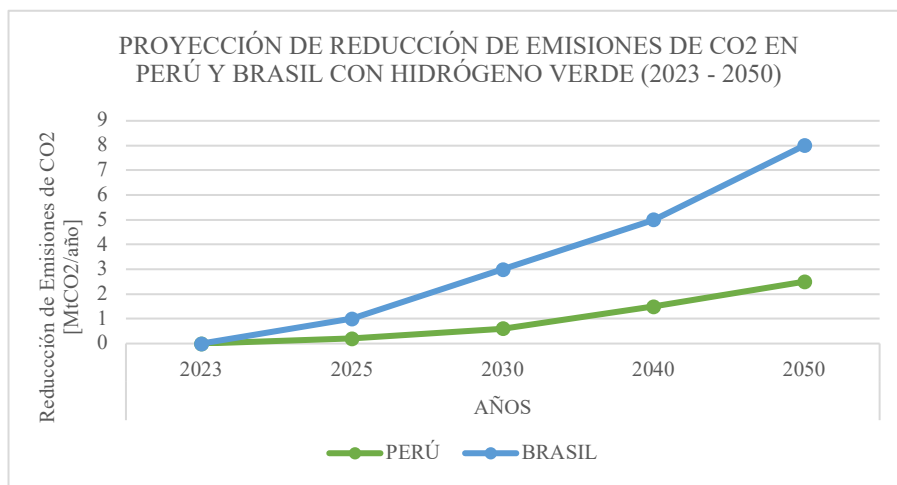
Fuente: Elaboración propia baseados con datos de BANCO MUNDIAL, 2023 y MINEM 2022

La Figura 13 muestra la evolución de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) per cápita en Perú y Brasil entre 2015 y 2023. Se observa una ligera disminución en ambos países. En el caso de Brasil, las emisiones pasaron de 2,51 t/hab en 2015 a 2,20 t/hab en 2023, lo que representa una

reducción significativa. En Perú, la variación fue más leve, de 1,75 a 1,70 t/hab. Estos resultados reflejan los avances moderados en la descarbonización del sector energético y de transporte en ambos países. [DATOSMACROPeru, 2025; DATOSMACROBrasil, 2025]

Con las figuras mostradas, podemos presentar el siguiente gráfico que muestra la proyección de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en Perú y Brasil con la adopción del hidrógeno verde entre 2023 y 2050. Como se observa, ambas naciones experimentan una tendencia de reducción significativa, con Brasil logrando mayores reducciones debido a su mayor capacidad de producción y uso del hidrógeno en sectores industriales clave.

Figura 14: Gráfico de la Proyección de Reducción de Emisiones de CO<sub>2</sub> en Perú y Brasil con H<sub>2</sub> Verde (2023-2050)



Fuente: Elaboración propia basados con datos de BANCO MUNDIAL, 2023 y MINEM 2022

Brasil, a pesar de su alta proporción de energías renovables en la matriz energética, sigue siendo un emisor significativo de gases de efecto invernadero (GEI). Esto se debe principalmente a actividades relacionadas con la agricultura, la deforestación y el cambio de uso del suelo, que en conjunto representan una parte sustancial de las emisiones del país [ICLEI, 2021]. La transición hacia el hidrógeno verde en Brasil puede desempeñar un papel fundamental en la reducción de emisiones en sectores de difícil electrificación, como las industrias siderúrgica y química. Por ejemplo, la empresa brasileña Vale planea utilizar hidrógeno verde para producir acero de bajo carbono, lo que podría reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción [SWISSINFO.CH., 2024].

## 5.4 CASOS DE ÉXITO EN OTROS PAÍSES DONDE YA SE PRODUCE HIDRÓGENO VERDE

### 5.4.1 ALEMANIA: PIONERO EN EL DESARROLLO DEL HIDRÓGENO VERDE

Alemania ha sido un líder global en el desarrollo de tecnologías de hidrógeno verde, impulsado por su Estrategia Nacional de Hidrógeno (2020). Este plan tiene como objetivo producir hidrógeno a partir de fuentes renovables y utilizarlo para descarbonizar sectores industriales de alta emisión, como la siderurgia y la química [BMWK, 2020; BCN, 2021].

Las claves del éxito de Alemania incluyen:

- Inversiones iniciales públicas significativas para el desarrollo de infraestructura de hidrógeno y apoyo a proyectos piloto [BCN, 2021]
- Colaboración público-privada para fomentar la innovación tecnológica [BCN, 2021]
- Implementación de proyectos de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno y conversión de excedentes de energía eólica y solar en hidrógeno, evitando desperdicio de electricidad [IEA, 2023].

#### **5.4.2 CHILE: LIDERAZGO REGIONAL EN HIDRÓGENO VERDE**

Chile se está posicionando como uno de los líderes en producción de hidrógeno verde en América Latina, aprovechando su alto potencial solar en el Desierto de Atacama y su capacidad eólica en la Patagonia. En 2020, lanzó su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, con el objetivo de convertirse en uno de los principales exportadores mundiales de hidrógeno para 2040 [MINISTERIO DE ENERGÍA CHILE, 2020].

- Proyecto Haru Oni en Magallanes: Combinación de energía eólica para producir hidrógeno y su uso en la producción de combustibles sintéticos [HIF GLOBAL, 2024].
- Atracción de inversiones extranjeras en proyectos de gran escala y un marco regulatorio sólido para incentivar la producción [CHILE, 2021; BCN, 2021].

#### **5.4.3 AUSTRALIA: POTENCIAL PARA PRODUCCIÓN Y EXPORTACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE**

Australia posee un gran potencial para la producción de hidrógeno verde debido a su abundante capacidad solar y eólica, junto con vastas extensiones de territorio disponibles para proyectos a gran escala. En 2019, el gobierno australiano lanzó su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, centrada en convertir al país en un exportador clave de hidrógeno [DCCEEW, 2024].

Algunos de los proyectos más destacados incluyen:

- Australian Renewable Energy Hub (AREH, 2020): Anteriormente Asian Renewable Energy Hub, un megaproyecto que planea generar hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica para exportación [AREH, s.d.].
- Hydrogen Energy Supply Chain (HESC, 2024): Proyecto de exportación de hidrógeno a Japón, con capacidad para reducir 1,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, equivalente a retirar 350,000 automóviles de circulación [HESC, 2024].

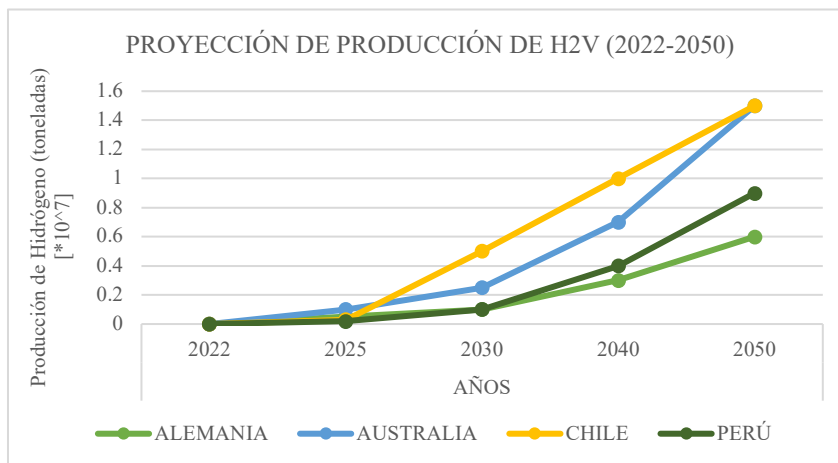
Australia ha establecido acuerdos comerciales con Japón y Corea del Sur, mercados clave para la exportación de hidrógeno, y ha invertido en tecnologías de almacenamiento y transporte de hidrógeno en forma de amoníaco [ARENA, 2022].

#### **5.4.4 LECCIONES PARA PERÚ**

Alemania, Chile y Australia han avanzado en el desarrollo del hidrógeno verde mediante políticas públicas sólidas, incentivos financieros y asociaciones público-privadas. Estos países han priorizado la inversión en infraestructura, regulaciones claras y acceso a financiamiento para proyectos estratégicos. Perú puede aprender de estos modelos exitosos y adaptarlos a su contexto, asegurando una transición eficiente hacia la producción de hidrógeno verde en el país [IEA, 2023].

De acuerdo con todos estos datos, es mostrado la Figura 15, proyección de la producción de hidrógeno en toneladas [ $t \cdot 10^7$ ] a lo largo de los próximos 30 años, haciendo una comparativa de los países como Alemania, Australia, y Chile con respecto a Perú.

Figura 15: Gráfico de Proyección de H2 Verde



Fuente: Elaboración Propia basados en datos proporcionados por BMWK, 2020, BCN, 2021, DCCEEW, 2024, AREH, 2020, HESC, 2024, ARENA, 2022 e IEA, 2023

## 5.5 NICHOS DE APLICACIÓN PARA LA ELECTRIFICACIÓN Y EL HIDRÓGENO VERDE.

La matriz energética de Perú en 2022 mostró una fuerte dependencia de la hidroelectricidad (55%) y el gas natural (30%), mientras que las fuentes renovables no convencionales (solar, eólica, biomasa) representaron solo un 4% [BNE PERU, 2022]. Este panorama resalta la necesidad de diversificar las fuentes energéticas con alternativas de bajas emisiones, donde el hidrógeno verde podría desempeñar un papel clave.

### 5.5.1 SECTORES ESTRATÉGICOS PARA LA APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE

El consumo final de energía en Perú en 2022 se concentró en los siguientes sectores [BNE PERU, 2022] y es mostrado en la Figura 16.

- Transporte: 41%
- Industria: 23%
- Residencial: 19%
- Comercial y Público: 8%
- Agricultura y Otros: 9%

Dado que transporte e industria representan más del 60% del consumo energético del país, estos sectores emergen como los principales nichos para la aplicación del hidrógeno verde y la electrificación.

### 5.5.1.1 Sector Transporte: Oportunidades para la Descarbonización

El transporte en Perú depende en gran medida de combustibles fósiles, lo que genera un alto nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>. La implementación de buses y camiones a hidrógeno en el transporte público y de carga podría reducir significativamente las emisiones en las principales ciudades. Además, la infraestructura portuaria y aeroportuaria podría integrar el hidrógeno como combustible alternativo en operaciones logísticas [BNE PERU, 2022].

### 5.5.1.2 Sector Industrial: Integración del Hidrógeno en Procesos Productivos

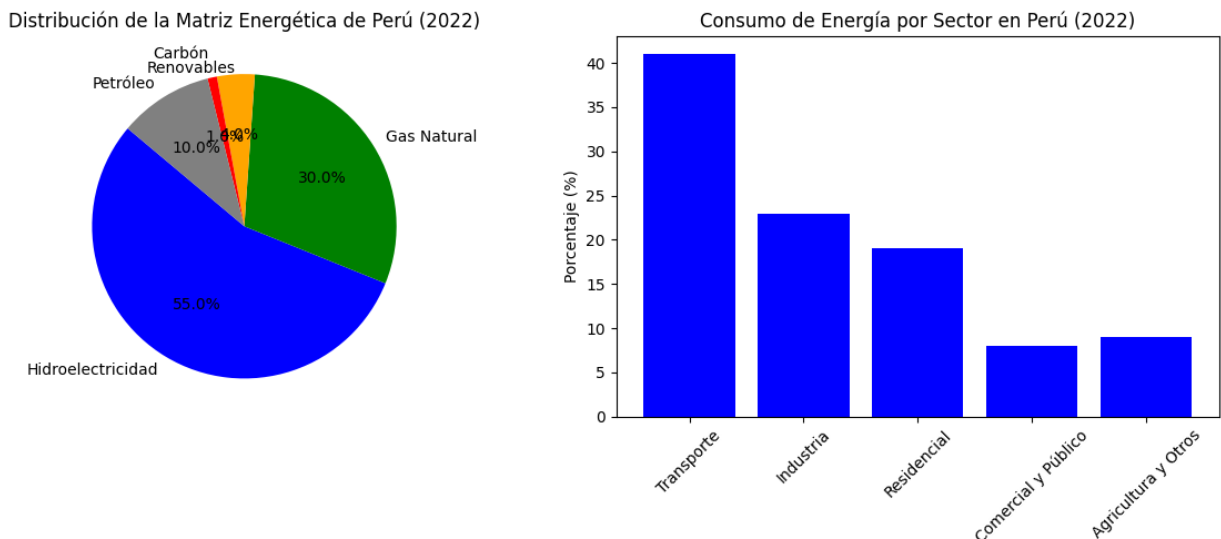
Las industrias de minería, manufactura y producción química requieren grandes cantidades de energía. La minería, en particular, utiliza combustibles fósiles para maquinaria y transporte interno, lo que representa una oportunidad para reemplazarlos por hidrógeno verde. Además, industrias como la siderurgia pueden beneficiarse del hidrógeno en la reducción de emisiones en sus procesos productivos [BNE PERU, 2022].

### 5.5.1.3 Generación de Energía y Complemento a la Hidroelectricidad

Si bien la hidroelectricidad es la principal fuente de electricidad en Perú, su vulnerabilidad a eventos climáticos extremos hace necesario diversificar la matriz energética. La producción de hidrógeno verde a partir del excedente de energía hidroeléctrica permitiría almacenar energía y utilizarla en momentos de baja disponibilidad hídrica [BNE PERU, 2022].

La electrificación y el hidrógeno verde presentan una oportunidad significativa para reducir la dependencia de combustibles fósiles en sectores clave de la economía peruana. Con inversiones en infraestructura y regulaciones adecuadas, Perú puede avanzar hacia una transición energética más limpia, aprovechando su alto potencial renovable.

Figura 16: Gráfico de la Matriz Energética de Perú y el Consumo de Energía por Sector en Perú

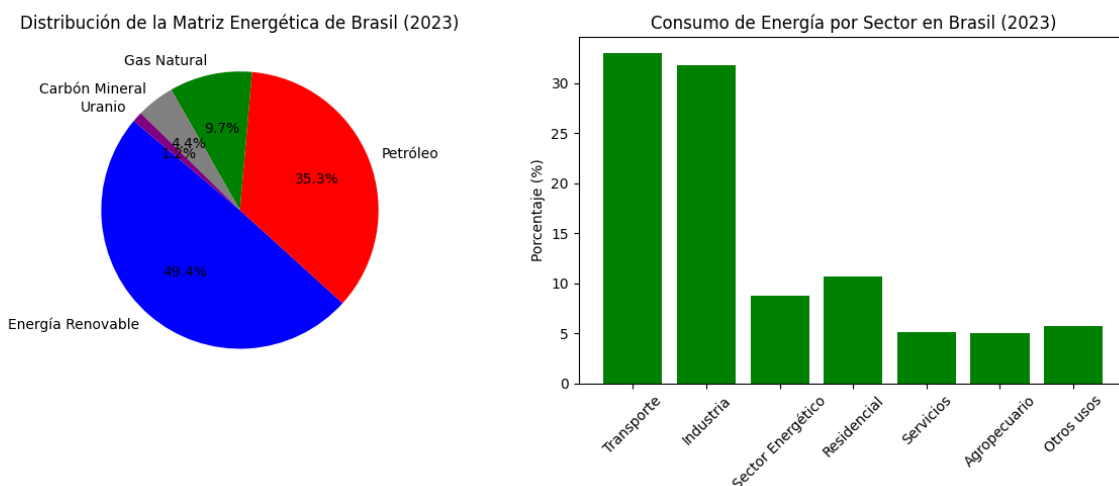


Fuente: Elaboración Propia basados en datos proporcionados en MINEM 2022 y BNE PERU, 2022

En la Figura 17 se muestra la distribución Matriz Energética de Brasil se incluyó en este objetivo porque permite realizar una comparación regional estratégica con Perú, identificando similitudes y diferencias en el uso de fuentes energéticas y oportunidades para la implementación del hidrógeno verde. Brasil es un referente en América Latina en la producción de energías renovables y ha avanzado más en la adopción del hidrógeno, lo que lo convierte en un caso de estudio relevante.

Esta comparación es clave para entender cómo Perú puede aprovechar su potencial energético y diseñar estrategias eficaces para la electrificación y la incorporación del hidrógeno verde en su matriz energética.

Figura 17: Gráfico de la Matriz Energética de Brasil y el Consumo de Energía por Sector en Brasil



Fuente: Elaboración Propia basados en datos proporcionados en BEN 2024

Al hacer esta comparación podemos identificar oportunidades de diversificación para Perú, considerando que ambos países dependen de la hidroelectricidad, pero Brasil ha logrado integrar más fuentes renovables en su matriz. Evaluar cómo Brasil ha incorporado el hidrógeno verde en sectores clave, especialmente en la industria y el transporte, sectores que en Perú representan la mayor parte del consumo energético y tomar referencias de políticas públicas y estrategias de transición energética que han impulsado la producción y el uso del hidrógeno en Brasil y que podrían adaptarse a la realidad peruana [BNE, 2022; BEN, 2024].

Según un estudio realizado por Engie Impact y la Asociación Peruana de Hidrógeno (H2 Perú), el país podría desplegar hasta 12 GW de capacidad de electrólisis para el año 2050, con un costo objetivo de 1 USD/kg de hidrógeno verde [H2LAC, 2023]. Este avance permitiría sustituir el 100% de los combustibles fósiles en industrias como la del acero y el cemento [ENERGÍA ESTRATÉGICA, 2023].

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2022 publicado por el Ministerio de Energía y Minas, el consumo energético total en Perú fue de 53 millones de barriles de petróleo equivalentes (BPE). El sector transporte fue el mayor demandante, con 22 millones de BPE, seguido por la industria, que consumió 12 millones de BPE [BNE, 2022].

## 5.5.2 APLICACIONES POTENCIALES DEL HIDRÓGENO VERDE EN PERÚ

### 5.5.2.1 Sector Minero

La minería es uno de los pilares de la economía peruana y consume grandes cantidades de energía. La electrificación de procesos industriales pesados utilizando hidrógeno verde puede reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Según la Propuesta de Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde

en el Perú al 2050, la demanda interna de hidrógeno verde en el sector minero podría alcanzar 112,338 toneladas por año en 2050 [H2 BUSINESS NEWS, 2022].

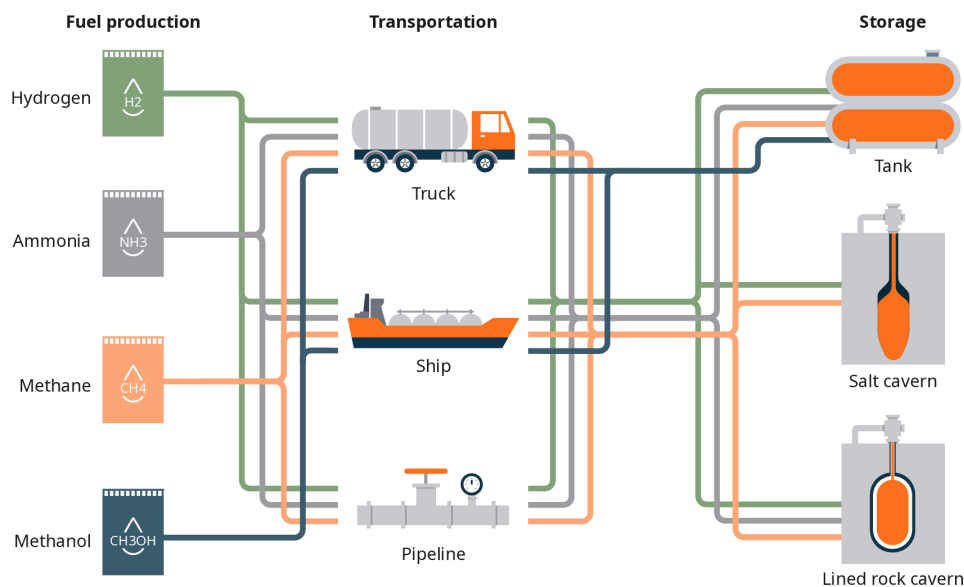
### 5.5.2.2 Sector Transporte

El transporte es el mayor consumidor de energía en Perú [BNE, 2022]. El hidrógeno verde ofrece una alternativa para descarbonizar vehículos pesados, como camiones y autobuses, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones asociadas.

### 5.5.2.3 Exportación de Derivados del Hidrógeno

Perú tiene el potencial de producir hidrógeno verde a precios competitivos a nivel internacional, entre 1.5 y 2.5 USD/kg a partir de 2040. Esto abre oportunidades para la exportación de derivados como amoníaco y metanol, posicionando al país como un hub exportador de hidrógeno y sus derivados. [H2 BUSINESS NEWS, 2022].

Figura 18: Gráfico de la Cadena de Valor de los combustibles P2X



Fuente: Adaptación de Wärtsilä

- Los sectores con mayor potencial para aplicar hidrógeno verde en Perú incluyen la minería, que es uno de los pilares de la economía peruana, y que consume grandes cantidades de energía. La electrificación de procesos industriales pesados utilizando hidrógeno verde puede reducir significativamente las emisiones [ENGIE Impact; H2 Perú, 2021]
- El sector transporte también es otra área clave, donde el hidrógeno verde podría usarse para descarbonizar vehículos pesados, como camiones y autobuses.
- El concepto de Power to X aplicado en Perú utilizando hidrógeno verde (H<sub>2</sub>) puede adaptarse a las características específicas de la matriz energética, los sectores económicos principales y

los recursos naturales del país. Como por ejemplo Power-to-power, Power-to-mobility, Power-to-industry, Power-to-chemicals, Power-to-heat, Power-to-gas. En Perú las principales aplicaciones sobre el Power to X serían en la minería, el transporte y la exportación de amoníaco y metanol. Teniendo como potencial reducir la dependencia del petróleo importado, descarbonizar sectores clave y posicionar a Perú como un hub exportador de hidrógeno y derivados.

## **5.6 POTENCIAL DE LAS PRINCIPALES FUENTES RENOVABLES DISPONIBLES EN PERÚ PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.**

Perú cuenta con un alto potencial en fuentes de energía renovable que pueden utilizarse para la producción de hidrógeno verde a través de electrólisis. Entre estas fuentes destacan la energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, cada una con sus propias ventajas y desafíos.

### **5.6.1 POTENCIAL SOLAR**

Perú posee una de las mejores condiciones de radiación solar en América Latina, especialmente en la región sur del país, donde se encuentran las zonas de Arequipa, Moquegua y Tacna. Estas áreas tienen una radiación solar promedio de entre 5.5 y 6.5 kWh/m<sup>2</sup>/día [MINEM, 2022]. Capacidad instalada actual (2022): 418 MW [MINEM, 2022].

- Potencial técnico estimado: Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el potencial solar del país podría superar los 100 GW [IRENA, 2021].
- Aplicación para la producción de hidrógeno verde: La energía solar es ideal para alimentar electrolizadores debido a su bajo costo de generación y disponibilidad en amplias zonas del país.
- Perspectiva a futuro: Con inversiones en infraestructura solar y sistemas de electrólisis, Perú podría convertirse en un exportador de hidrógeno verde producido con energía solar.

### **5.6.2 POTENCIAL EÓLICO**

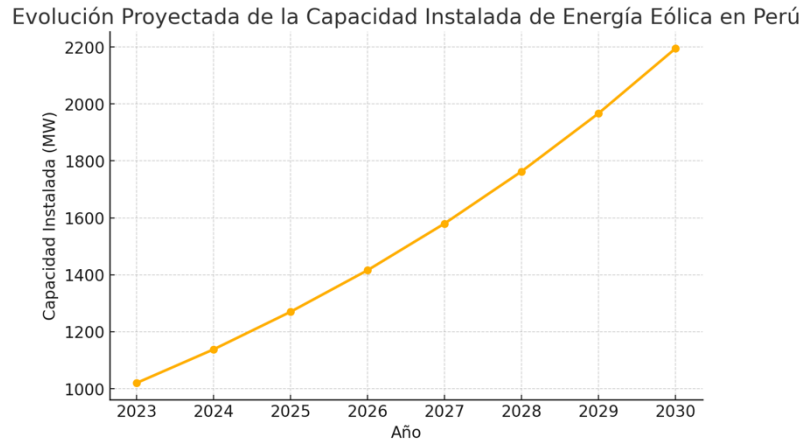
El potencial eólico de Perú es considerable, especialmente en las regiones costeras del norte, como Piura, Lambayeque y La Libertad, donde la velocidad media del viento es superior a 7 m/s [MINEM, 2022].

- Capacidad instalada actual (2022): 409 MW [MINEM, 2022].
- Potencial técnico estimado: Según el MINEM, el potencial eólico de Perú podría alcanzar los 22 GW, especialmente en las áreas costeras [IEA, 2022].
- Aplicación para la producción de hidrógeno verde: La energía eólica es intermitente, pero su combinación con la solar permitiría una producción continua de hidrógeno verde.
- Perspectiva a futuro: Se espera que el crecimiento de la energía eólica en Perú continúe en los próximos años, con nuevas licitaciones y proyectos en desarrollo. Según las proyecciones actuales, la capacidad instalada de energía eólica en Perú experimentará un crecimiento significativo en los próximos años. En 2023, se espera que la capacidad instalada alcance los 1.02 GW, lo que representa un incremento del 148% en comparación con años anteriores [ENERGÍA ESTRATÉGICA, 2023]. Además, se anticipa que el mercado peruano de energía

eólica crezca a una tasa compuesta anual de más del 11.6% durante el período previsto [MORDOR INTELLIGENCE, 2024].

- A continuación, se presenta la figura 18 que ilustra la evolución proyectada de la capacidad instalada de energía eólica en Perú desde 2023 hasta 2030 [MORDOR INTELLIGENCE, 2024].

Figura 18: Gráfico de la Evolución proyectada de la Capacidad Instalada de Energía Eólica en Perú



Fuente: Elaboración propia con adaptación de datos proporcionados por MORDOR INTELLIGENCE, 2024 y ENERGÍA ESTRATÉGICA, 2023

### 5.6.3 POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

Perú ya cuenta con una infraestructura hidroeléctrica significativa, que representa más del 50% de la generación eléctrica nacional. Sin embargo, el aprovechamiento de excedentes hidroeléctricos para la producción de hidrógeno verde dependerá de factores como la variabilidad climática y la regulación del caudal de los ríos.

- Capacidad instalada actual (2022): 5,642 MW [MINEM, 2022].
- Potencial técnico estimado: El potencial hidroeléctrico no explotado en Perú se estima en 60-70 GW, particularmente en la región andina y la Amazonía [IRENA, 2022].
- Impedimentos ambientales: La expansión de proyectos hidroeléctricos enfrenta desafíos ambientales, como la afectación de ecosistemas acuáticos y la posible reubicación de comunidades. La regulación ambiental es clave para el desarrollo sostenible de esta fuente de energía.
- Historial de lluvias y excedentes: La generación hidroeléctrica en Perú está directamente relacionada con la variabilidad climática. En años de lluvias abundantes, se generan excedentes que podrían utilizarse para la producción de hidrógeno verde [SENAMHI, 2023].
- Perspectivas de expansión: Si bien la hidroenergía es una fuente confiable, su desarrollo debe equilibrarse con consideraciones ambientales y de disponibilidad de agua en el largo plazo.

#### 5.6.4 POTENCIAL GEOTÉRMICO

A diferencia de las otras fuentes renovables, la energía geotérmica en Perú aún no ha sido desarrollada a gran escala, a pesar de su alto potencial en regiones con actividad volcánica como Arequipa, Moquegua y Tacna.

- Capacidad instalada actual: 0 MW [MINEM, 2022].
- Potencial técnico estimado: Se estima que Perú tiene un potencial geotérmico de 3 GW, con varios proyectos en estudio [IEA, 2022].
- Aplicación para la producción de hidrógeno verde: A diferencia de la energía solar y eólica, la geotermia ofrece generación constante de electricidad, lo que la convierte en una opción ideal para la producción estable de hidrógeno verde.
- Estado actual de la tecnología: Si bien en Perú esta fuente aún está en fase de exploración, la tecnología geotérmica está consolidada en países como Islandia, donde se usa con éxito para generar electricidad y calor [IRENA, 2022].
- Perspectiva a futuro: Con la exploración de nuevos sitios y la atracción de inversión extranjera, la geotermia podría desempeñar un papel importante en la transición energética del país.

El potencial renovable de Perú es vasto y diversificado, con oportunidades significativas para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis. La combinación de energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica podría posicionar a Perú como un líder en la producción de hidrógeno en América Latina. Sin embargo, el éxito de esta transición dependerá del desarrollo de infraestructura, políticas públicas adecuadas y un enfoque sostenible que minimice impactos ambientales y sociales.

### 5.7 VIABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES DE ELECTRÓLISIS, ANÁLISIS ECONÓMICO DE COSTOS Y BENEFICIOS DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN PERÚ Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOGRÁFICO

#### 5.7.1 VIABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS DE ELECTRÓLISIS

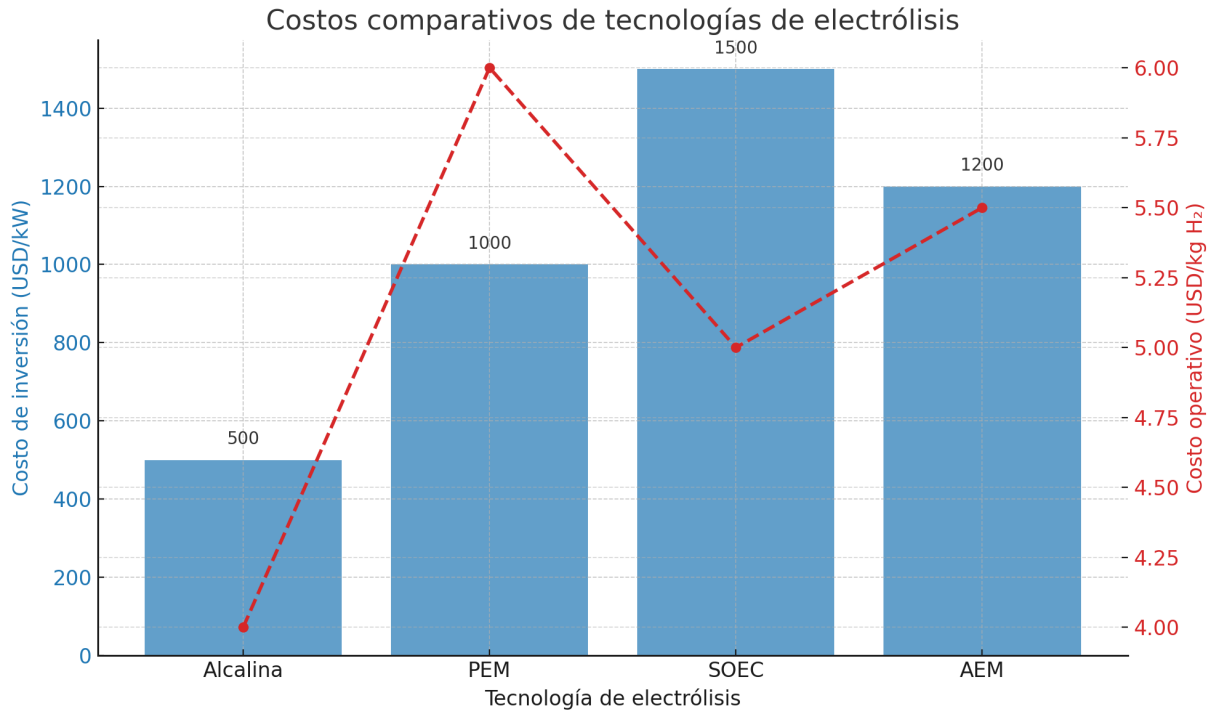
La Figura 19 compara cuatro tecnologías de electrólisis en términos de costo de inversión (USD/kW) y costo operativo (USD/kg H<sub>2</sub>). Se observa que la electrólisis alcalina presenta el menor costo de inversión, situándose cerca de los 500 USD/kW, lo que la convierte en una opción atractiva para proyectos de gran escala con presupuestos limitados. Sin embargo, su costo operativo es también el más bajo (4,0 USD/kg H<sub>2</sub>), lo que refuerza su competitividad en entornos con bajo costo eléctrico.

Por el contrario, la tecnología PEM (membrana de intercambio de protones) muestra un costo de inversión intermedio (~1000 USD/kW) pero un costo operativo elevado (6,0 USD/kg H<sub>2</sub>), debido al uso de membranas y catalizadores más costosos. No obstante, su mayor eficiencia y flexibilidad operativa la hacen adecuada para integración con energías renovables intermitentes como la solar y la eólica.

La electrólisis SOEC, aún en fase de desarrollo, tiene el costo de inversión más alto (~1500 USD/kW), aunque promete ventajas en eficiencia si se dispone de calor residual industrial. Finalmente, la tecnología AEM, emergente, combina costos moderados con buena eficiencia, aunque todavía presenta barreras tecnológicas para su masificación.

En conjunto, este gráfico permite visualizar de forma clara las compensaciones entre madurez tecnológica, inversión inicial y costos de operación, siendo esencial considerar estas variables en estudios de viabilidad económica para producción de hidrógeno en el contexto peruano.

Figura 19: Comparación de Tecnologías de Electrólisis

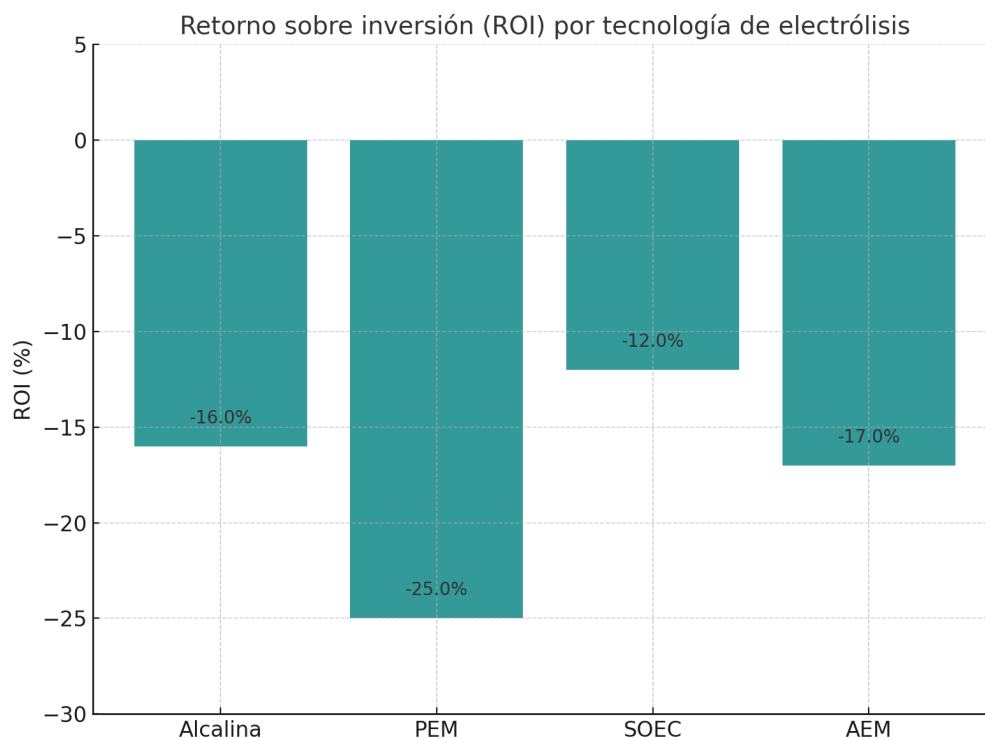


Fuente: Elaboración propia con base en datos de IRENA (2020), IEA (2021), Fraunhofer ISE (2020) y cálculos propios.

### 5.7.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE COSTOS Y BENEFICIOS

Analizar económicamente la producción de hidrógeno verde en Perú según las tecnologías disponibles, considerando eficiencia, inversión, operación e ingresos estimados. El enfoque es comparar costos (CAPEX + OPEX) frente a posibles beneficios (ingresos por venta de hidrógeno), evaluando el retorno económico estimado (ROI). En el presente análisis económico se asumió una operación anual de 4000 horas, lo cual representa un valor de referencia ampliamente utilizado en estudios internacionales de viabilidad de electrolizadores conectados a fuentes renovables variables o a la red. Esta cifra refleja un escenario intermedio entre operación intermitente y continua, considerando que, en contextos como el peruano, la disponibilidad constante de energía renovable puede estar limitada. Según IRENA (2020) e IEA (2021) sugieren rangos de 3000 a 5000 horas para este tipo de sistemas, dependiendo del recurso renovable y la infraestructura eléctrica local.

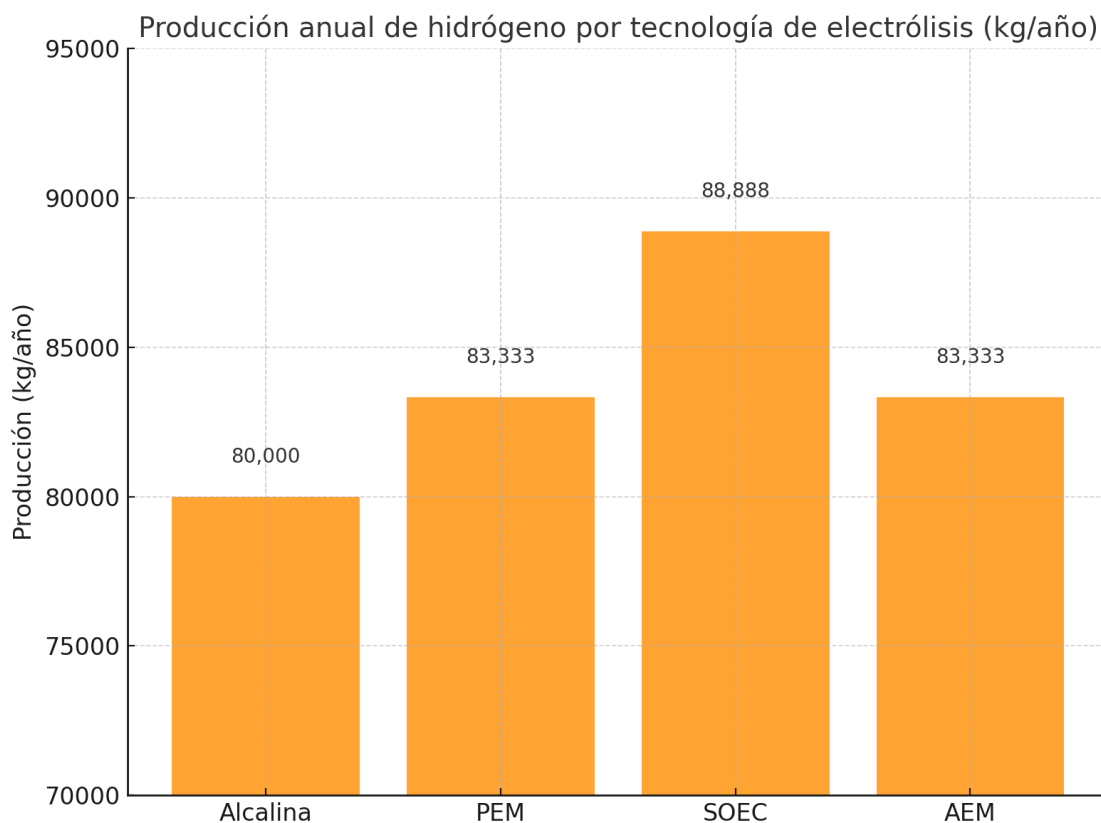
Figura 20: Retorno sobre inversión (ROI) por tecnología



Fuente: Elaboração própria com base em IRENA (2020), IEA (2021), cálculos próprios.

La Figura 20 muestra el retorno sobre inversión (ROI) estimado para una planta tipo de 1 MW bajo diferentes tecnologías de electrólisis. Se observa que ninguna opción alcanza un ROI positivo, destacando que, con los precios actuales de electricidad y los costos operativos típicos, el modelo de negocio aún no es económicamente viable sin incentivos o subsidios. La tecnología SOEC, aunque con mayor inversión inicial, presenta el ROI menos negativo (-12%), atribuible a su mayor eficiencia energética. Por otro lado, la tecnología PEM, con costos operativos elevados, refleja el ROI más bajo (-25%). Este análisis refuerza la importancia de políticas que reduzcan el CAPEX y el OPEX, o que garanticen acceso a electricidad renovable de bajo costo para que el hidrógeno verde sea competitivo.

Figura 21: Producción anual de H2 por Tecnología de Electrólisis

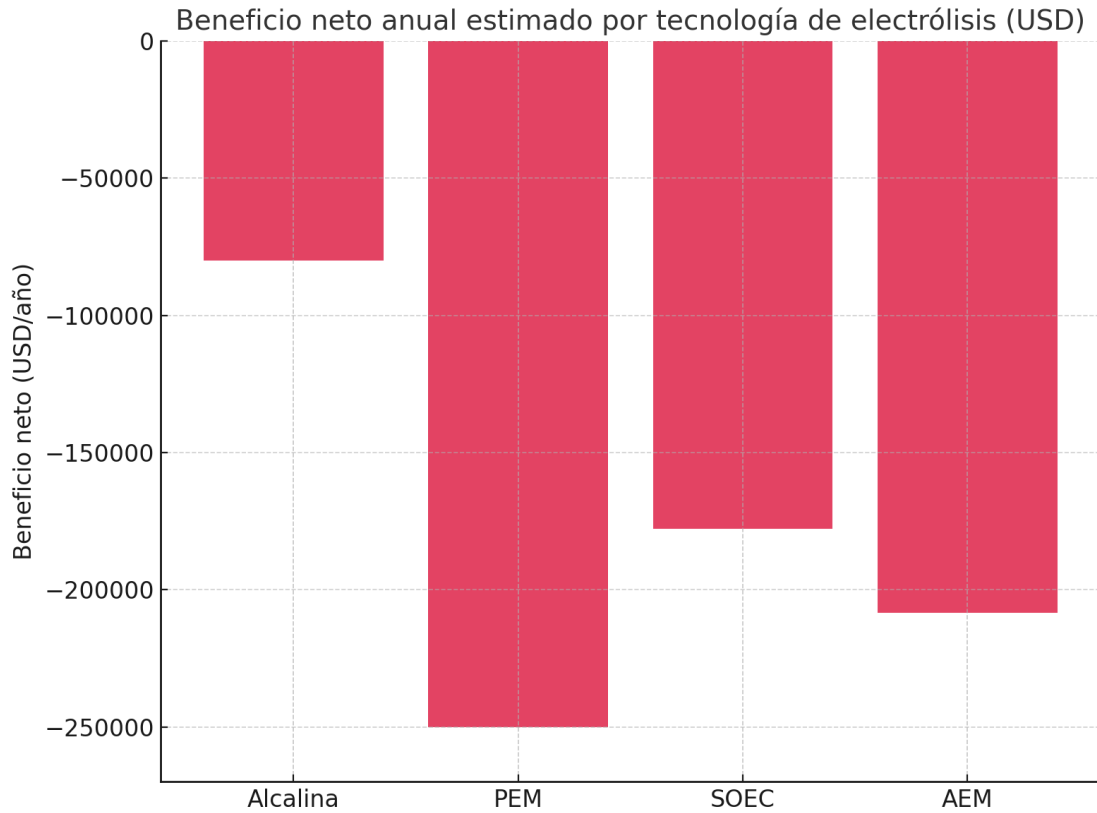


Fuente: Elaboração própria com base em Fraunhofer ISE (2020), IRENA (2020), cálculos próprios.

La Figura 21 presenta la producción anual estimada de hidrógeno para una planta tipo de 1 MW bajo diferentes tecnologías de electrólisis, considerando 4000 horas de operación al año. Se observa que la tecnología SOEC, gracias a su mayor eficiencia eléctrica (consumo específico de 45 kWh/kg), permite producir aproximadamente 88.889 kg de H<sub>2</sub> por año, la cifra más alta entre las opciones evaluadas. En cambio, la tecnología alcalina, con un consumo específico de 50 kWh/kg, alcanza una producción de 80.000 kg/año. Aunque las diferencias no son extremas, este análisis evidencia cómo la eficiencia técnica influye directamente en la productividad anual y, por tanto, en los ingresos y beneficios potenciales del proyecto.

Esta diferencia en productividad se traduce directamente en ingresos y afecta el análisis de rentabilidad, ya que mayor producción significa mayor ingreso potencial por venta de hidrógeno, siempre que el mercado lo absorba. Además, este gráfico permite entender por qué tecnologías más eficientes, aunque más caras en CAPEX, pueden tener un mejor desempeño económico a largo plazo.

Figura 22: Beneficio neto anual estimado por Tecnología de electrólisis



Fuente: Elaboração própria com base em dados técnicos da IEA (2021), IRENA (2020), cálculos próprios.

La Figura 22 presenta el beneficio neto anual estimado para una planta de electrólisis de 1 MW operando 4000 horas al año, utilizando cuatro tecnologías distintas: Alcalina, PEM, SOEC y AEM. Este beneficio fue calculado como la diferencia entre los ingresos por venta de hidrógeno (a un precio de 3 USD/kg) y los costos operativos anuales específicos de cada tecnología.

Como se observa, ninguna de las tecnologías analizadas presenta un beneficio neto positivo, reflejando la realidad actual del mercado del hidrógeno verde en contextos no subsidiados. La tecnología SOEC, con el mayor rendimiento energético (45 kWh/kg), muestra la menor pérdida anual (-177.778 USD), gracias a su mayor producción de hidrógeno por unidad de energía. En cambio, la tecnología PEM presenta la mayor pérdida (-250.000 USD), debido a sus elevados costos operativos (6 USD/kg H<sub>2</sub>), a pesar de una eficiencia relativamente buena.

La tecnología alcalina, aunque es la más económica en términos de inversión inicial, también muestra pérdidas significativas (-80.000 USD), principalmente debido al bajo precio de venta asumido y al OPEX aún elevado. En un escenario real, estos valores podrían mejorar con economías de escala, reducción del precio de la electricidad, mejora en la eficiencia o acceso a subsidios/incentivos gubernamentales.

Este análisis refuerza la idea de que, en el corto plazo, la producción de hidrógeno verde no es rentable bajo condiciones de mercado convencionales en Perú, y su desarrollo dependerá de políticas públicas activas, acuerdos de compra de energía (PPAs Power Purchase Agreement), e incentivos fiscales o regulatorios que compensen las brechas de rentabilidad. [BNEF, 2020]

### 5.7.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOGRÁFICO DEL PERÚ POR REGIÓN

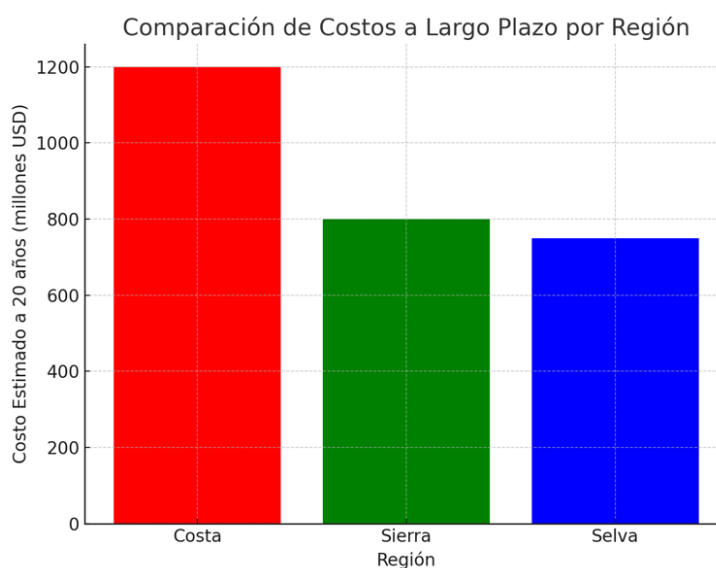
La Figura 23 muestra una comparación de los costos acumulados a 20 años para la producción de hidrógeno verde en tres regiones del Perú: Costa, Sierra y Selva. Estos costos incluyen tanto el CAPEX (inversión inicial en equipos e infraestructura) como el OPEX (gastos operativos anuales relacionados con electricidad, mantenimiento y tratamiento de agua).

Se observa que la Costa presenta el mayor costo total (1.200 millones USD), debido principalmente a dos factores: (1) la necesidad de desalinizar el agua por la escasez hídrica y (2) la dependencia de fuentes renovables intermitentes (solar y eólica), que requieren sistemas de respaldo o almacenamiento. A pesar de tener una buena radiación solar, la Costa enfrenta barreras técnicas y económicas que reducen su viabilidad para proyectos de hidrógeno sin apoyo estatal.

Por otro lado, las regiones de la Sierra y la Selva muestran menores costos a largo plazo, estimados en 800 y 750 millones USD, respectivamente. Esto se explica por la alta disponibilidad de energía hidroeléctrica, que permite el uso de tecnologías como la electrólisis alcalina (AWE) con buena eficiencia y bajo costo de inversión. Además, ambas regiones cuentan con recursos hídricos abundantes, lo cual elimina la necesidad de procesos costosos de tratamiento o desalinización.

Por lo tanto, desde una perspectiva de costo-beneficio regional, la Sierra y la Selva ofrecen condiciones significativamente más favorables para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, tanto por disponibilidad de insumos clave como por menores costos de implementación.

Figura 23: Gráfico de la Comparación de Costos por Región



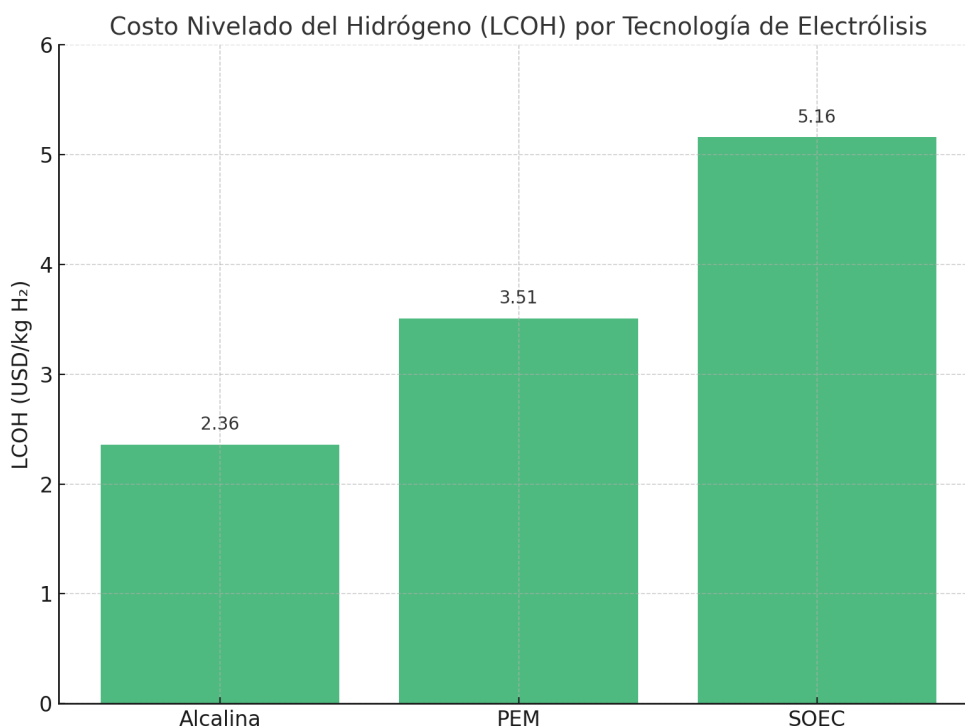
Fuente: Elaboración propia con base en datos de IRENA (2020), IEA (2021), Fraunhofer ISE (2020) y cálculos propios.

#### 5.7.4 LCOH POR TECNOLOGÍA DE ELECTRÓLISIS Y POR REGIÓN

La Figura 24 presenta el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) calculado para tres tecnologías de electrólisis aplicadas en el contexto peruano. La tecnología alcalina ofrece el menor costo (2,36 USD/kg H<sub>2</sub>), seguida por PEM (3,51 USD/kg H<sub>2</sub>) y SOEC (5,16 USD/kg H<sub>2</sub>). Esta diferencia refleja el impacto del costo de capital (CAPEX), los costos operativos (OPEX) y la eficiencia energética de cada sistema en el resultado final.

La tecnología alcalina, más madura y de menor inversión inicial, se consolida como la más competitiva económicamente en el corto plazo. En contraste, la tecnología SOEC, aunque potencialmente más eficiente, todavía enfrenta barreras económicas por su alto costo de desarrollo e implementación. Estos resultados son coherentes con estudios internacionales (IRENA, IEA, Fraunhofer) y refuerzan la necesidad de apoyo financiero o subsidios para tecnologías emergentes.

Figura 24: LCOH por Tecnología de Electrólisis



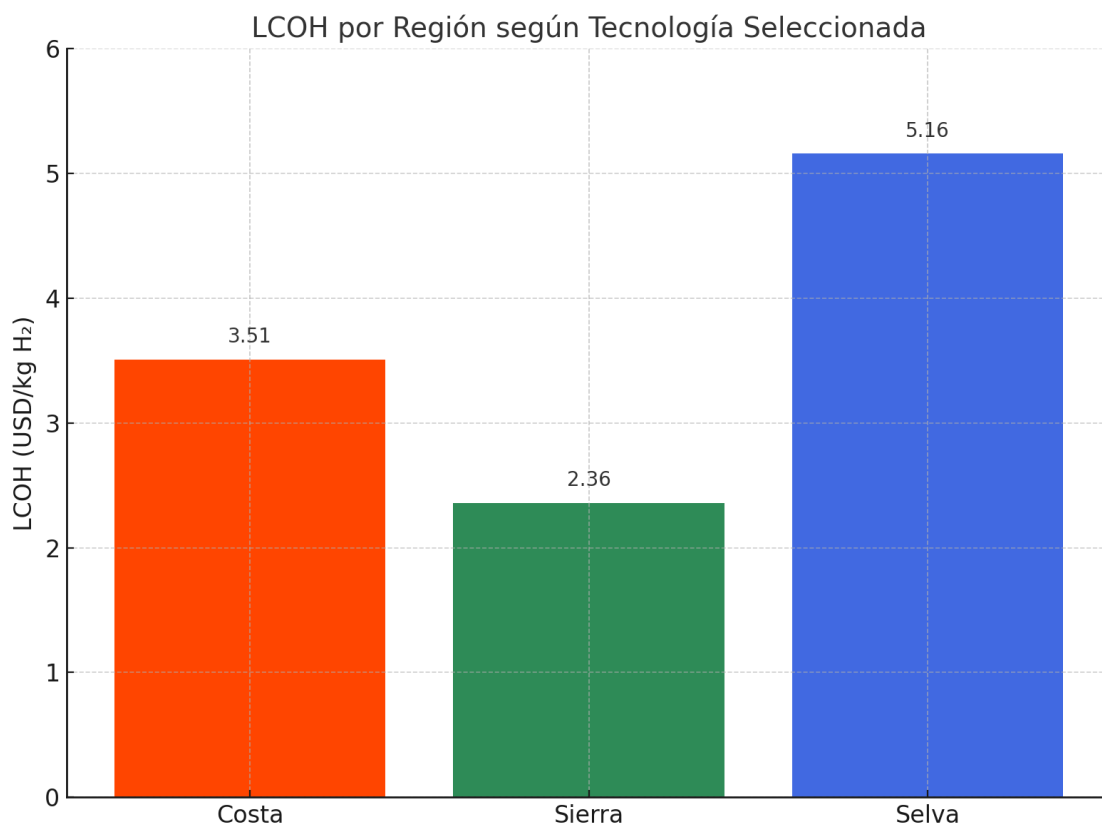
Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones de CAPEX, OPEX y datos regionales de Perú, cálculos propios.

Aunque la tecnología de electrólisis AEM (membrana de intercambio aniónico) representa una alternativa emergente con potencial a futuro, no fue incluida en el presente análisis económico debido a la limitada disponibilidad de datos técnicos estandarizados sobre su eficiencia, costos y durabilidad a escala industrial. Esto impide una evaluación precisa y comparable del LCOH frente a tecnologías más consolidadas como la alcalina, PEM y SOEC.

La Figura 25 presenta el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) ajustado por región, considerando la tecnología de electrólisis más adecuada en cada contexto según disponibilidad de agua, energía y madurez tecnológica. Los valores fueron calculados con base en la fórmula completa del LCOH, aplicando parámetros técnicos específicos para cada caso.

Se observa que la región más competitiva es la Sierra, donde la electrólisis alcalina permite aprovechar energía hidroeléctrica estable y agua disponible a bajo costo. La Costa, aunque tecnológicamente avanzada con sistemas PEM, presenta mayores costos debido a la necesidad de desalinización y menor estabilidad energética. Por otro lado, la Selva, a pesar de tener abundante energía y agua, se asocia con la tecnología SOEC, que aún implica altos costos de inversión, lo cual se traduce en un LCOH elevado en esta etapa de desarrollo tecnológico.

Figura 25: LCOH por Región según Tecnología seleccionada



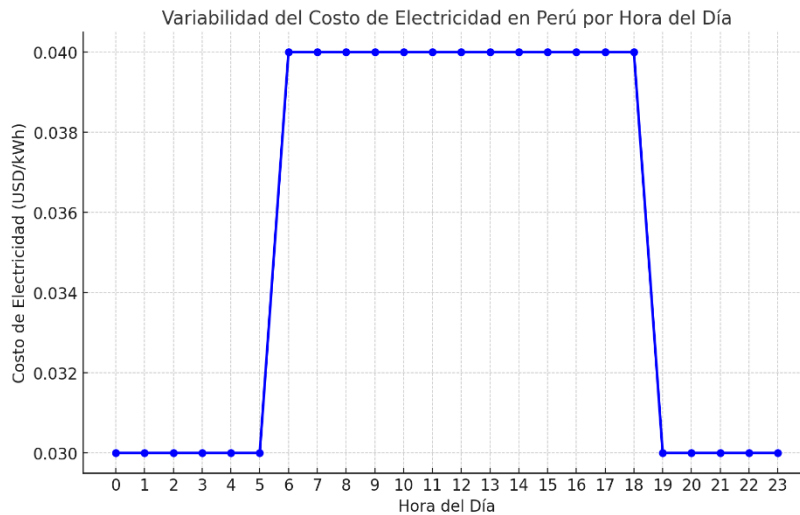
Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones de CAPEX, OPEX y datos regionales de Perú, cálculos propios.

## 5.8 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL COSTO DE ELECTRICIDAD EN PERÚ Y SU IMPACTO EN EL LCOH

El costo de la electricidad en Perú varía a lo largo del día y entre estaciones del año, lo que influye directamente en la competitividad del hidrógeno verde. Para evaluar estos efectos, se presentan dos escenarios: la variabilidad del Costo de Electricidad en Perú por Hora del Día y la variabilidad Estacional del Costo de Electricidad en Perú.

En la Figura 26 muestra la variabilidad por hora de día, resalta que el costo de electricidad más alto durante el día es de 0.04 USD/kWh debido a la alta demanda y el costo más bajo en la noche es de 0.03 USD/kWh cuando la demanda es menor.

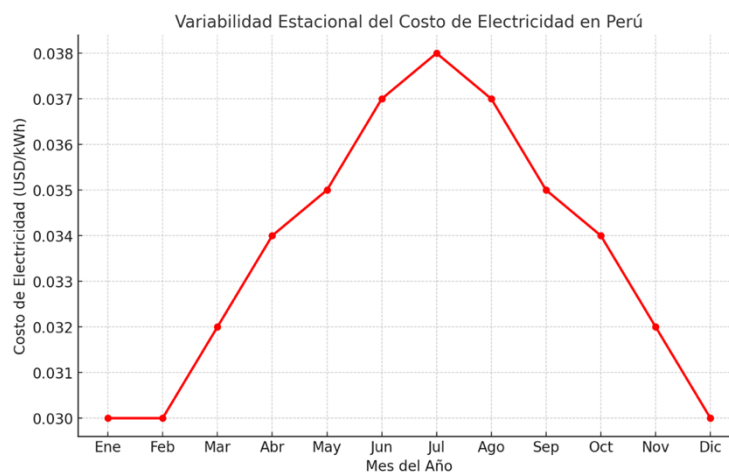
Figura 26: Gráfico de la Variabilidad del Costo de Electricidad en Perú por Hora del Día



Fuente: Elaboración propia basados en la adaptación de datos de los Pliegos Tarifarios de Osinergmin.

La Figura 27 evidencia que el costo de electricidad aumenta en meses secos (junio - agosto) debido a la menor generación hidroeléctrica, alcanzando 0.038 USD/kWh. En contraste, en meses lluviosos (enero - marzo), la producción hidroeléctrica es mayor, lo que reduce el costo a 0.03 USD/kWh.

Figura 27 : Gráfico de la Variabilidad Estacional del Costo de Electricidad en Perú



Fuente: Elaboración propia basados en la adaptación de datos de los Pliegos Tarifarios de Osinergmin.

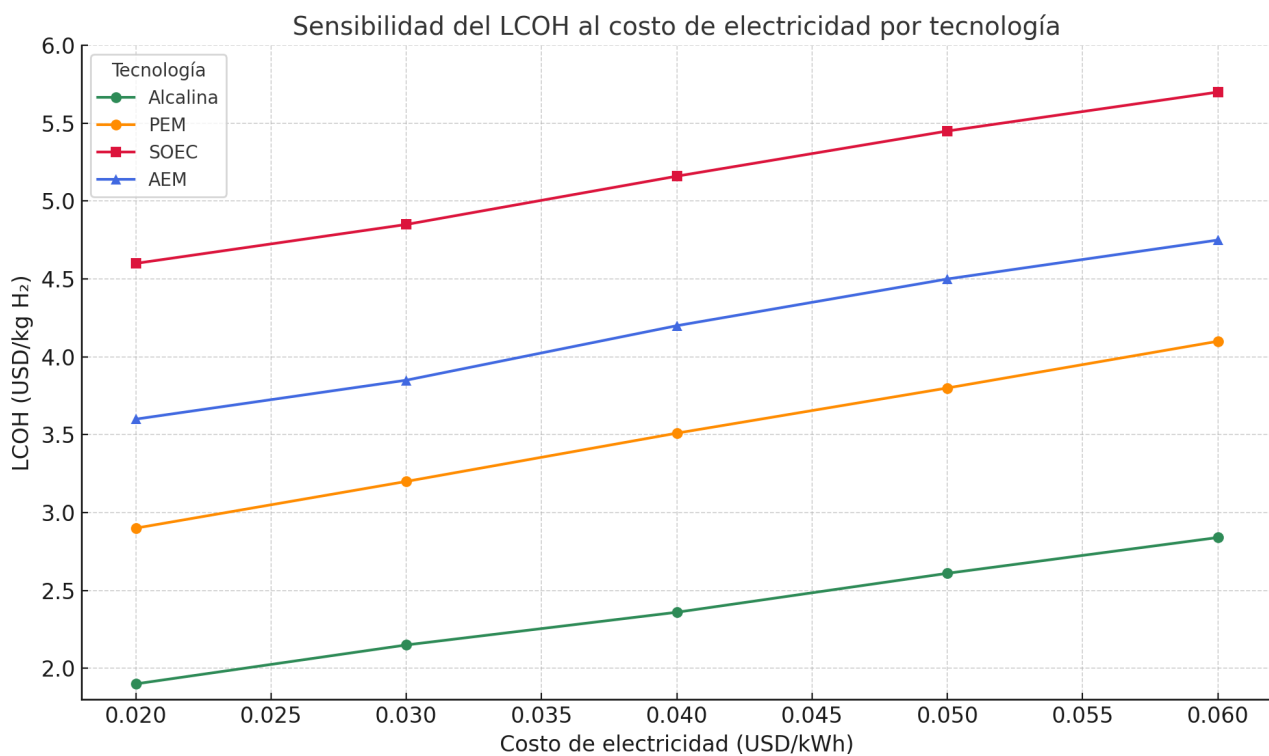
Para optimizar la producción de hidrógeno verde, se recomienda operar durante las noches y en la temporada de lluvias, cuando la electricidad es más barata.

La Figura 28 presenta una comparación integral de la sensibilidad del Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) al costo de la electricidad para las principales tecnologías de electrólisis. Se confirma que todas las tecnologías responden de manera positiva al aumento del precio de la energía, aunque con distintas pendientes según sus características técnicas y económicas.

La tecnología alcalina, con menor CAPEX y OPEX, muestra el LCOH más bajo y una sensibilidad moderada. Por el contrario, SOEC, aunque más eficiente, tiene el LCOH más elevado debido a su alto costo de inversión. Las tecnologías PEM y AEM se posicionan entre ambas, siendo PEM ligeramente más costosa en este análisis.

Este gráfico ofrece evidencia clara de que la selección tecnológica debe considerar no solo el desempeño técnico, sino también la estructura de costos energéticos locales, ya que el LCOH depende fuertemente del precio del kWh disponible en cada región o escenario.

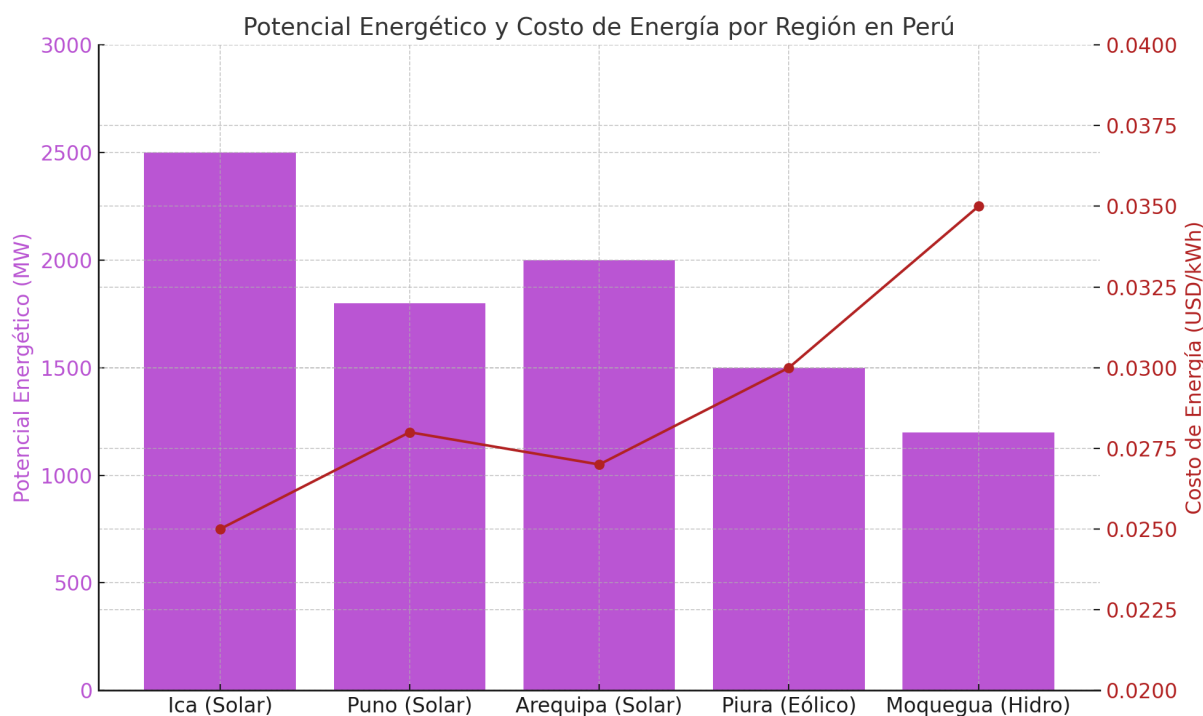
Figura 28: LCOH por Región según Tecnología seleccionada



Fuente: Elaboración propia a partir de datos técnicos de IRENA (2020), IEA (2021), Fraunhofer ISE (2020), cálculos propios.

La figura 29 muestra que las regiones con mayor potencial energético solar (como Ica y Arequipa) coinciden también con costos eléctricos más bajos, lo cual las hace particularmente competitivas para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde. En contraste, Moquegua, que depende de energía hidroeléctrica, tiene el menor potencial energético y el mayor costo por kWh, lo que puede afectar su viabilidad a corto plazo, a pesar de la estabilidad de su generación.

Figura 29: Potencial Energético y Costo de Energía por Región en Perú



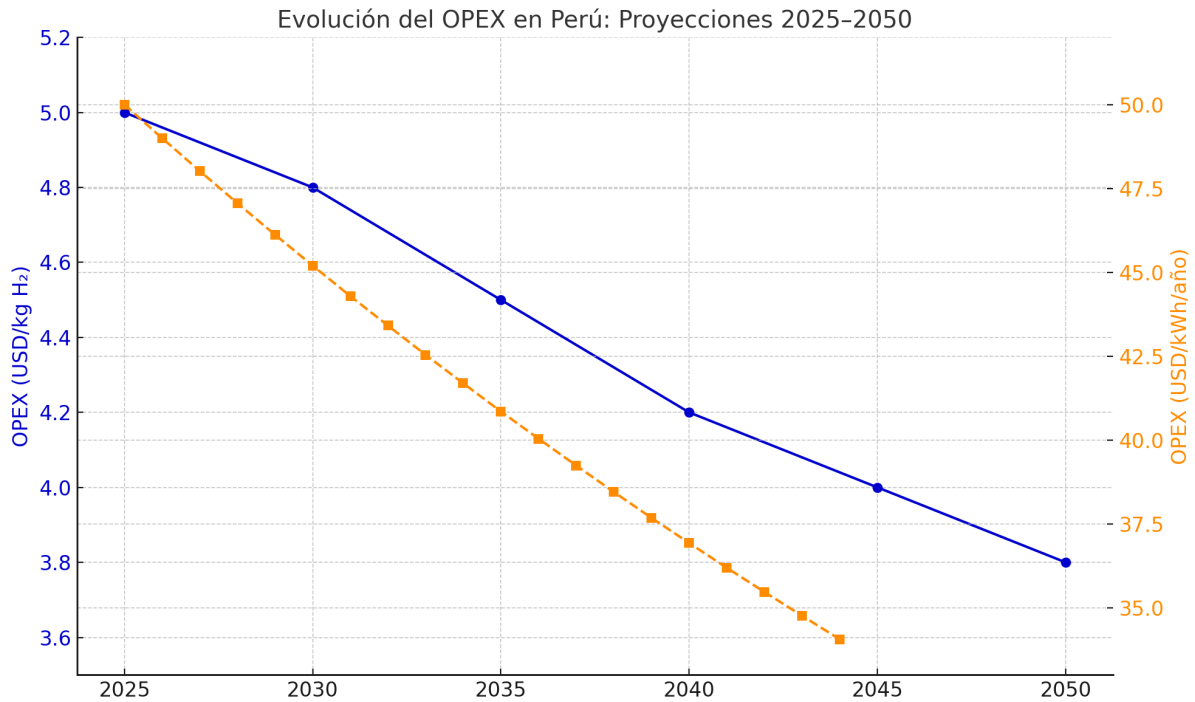
Fuente: Elaboración propia a partir de datos técnicos de MINEM (2022), IRENA (2023) y estudios de viabilidad regional, cálculos propios.

El OPEX (Gasto Operativo) representa un factor clave en la competitividad del hidrógeno verde, ya que incluye costos de electricidad, mantenimiento, insumos y tratamiento del agua para la electrólisis. La Figura 30 compara dos escenarios de evolución del OPEX (Costo Operativo) en la producción de hidrógeno verde en Perú. La curva azul representa una proyección quinquenal de referencia, donde el OPEX disminuye de 5,00 a 3,80 USD/kg H<sub>2</sub> entre 2025 y 2050. La curva naranja, más detallada, muestra una reducción progresiva del OPEX anualizado de 50 a 34,06 USD/kWh/año en un periodo de 20 años.

Ambos escenarios reflejan la tendencia esperada de optimización de costos operativos a medida que aumentan la eficiencia tecnológica, la capacidad instalada de energías renovables y las economías de escala. Esto refuerza la idea de que el hidrógeno verde será progresivamente más competitivo a largo plazo.

Un menor OPEX permitirá que el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) se acerque a niveles competitivos con combustibles fósiles. Perú podrá fortalecer su competitividad regional, optimizando costos frente a otros países como Chile y Brasil. La sostenibilidad económica del hidrógeno verde dependerá de políticas gubernamentales y financiamiento para infraestructura renovable.

Figura 30: Evolución del OPEX en Perú



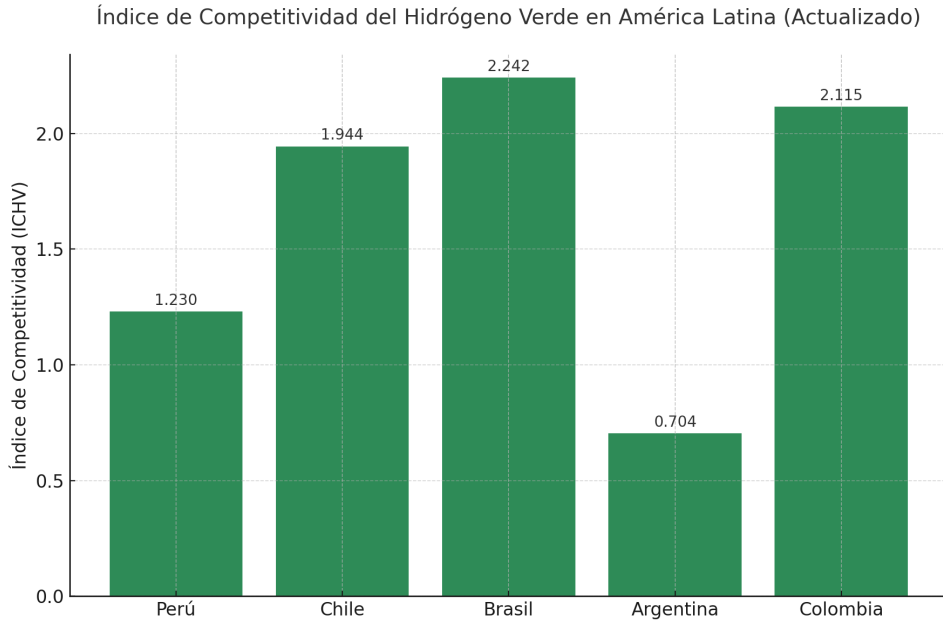
Fuente: Elaboración propia con valores de OPEX adaptados de IRENA (2023), IEA (2023), BloombergNEF (2022) y proyecciones del MINEM (2022), cálculos propios.

El análisis del Índice de Competitividad del Hidrógeno Verde (ICHV) permite comparar de forma integrada las condiciones económicas, técnicas y logísticas de distintos países para desarrollar el hidrógeno verde a gran escala. A diferencia del LCOH, que mide solo el costo de producción, el ICHV refleja la capacidad real de implementar, usar y exportar hidrógeno. Este enfoque es clave para comprender no solo el potencial técnico del Perú, sino también sus desafíos estructurales frente a otros países de América Latina.

La Figura 31 presenta una actualización del ICHV en América Latina considerando el valor real de LCOH calculado en este estudio para Perú (3,68 USD/kg H<sub>2</sub>). Con este ajuste, Perú alcanza un ICHV de 1,23, mejorando su posición frente a otras economías emergentes de la región.

Este índice coloca a Perú en una posición destacada, junto con Colombia (2,12) y Chile (1,94). Brasil (2,24) mantiene su liderazgo por su alta infraestructura y bajos costos de exportación. En contraste, Argentina (0,70) se ve limitada por su alto LCOH y menor infraestructura habilitante.

Figura 31: ICHV en América Latina



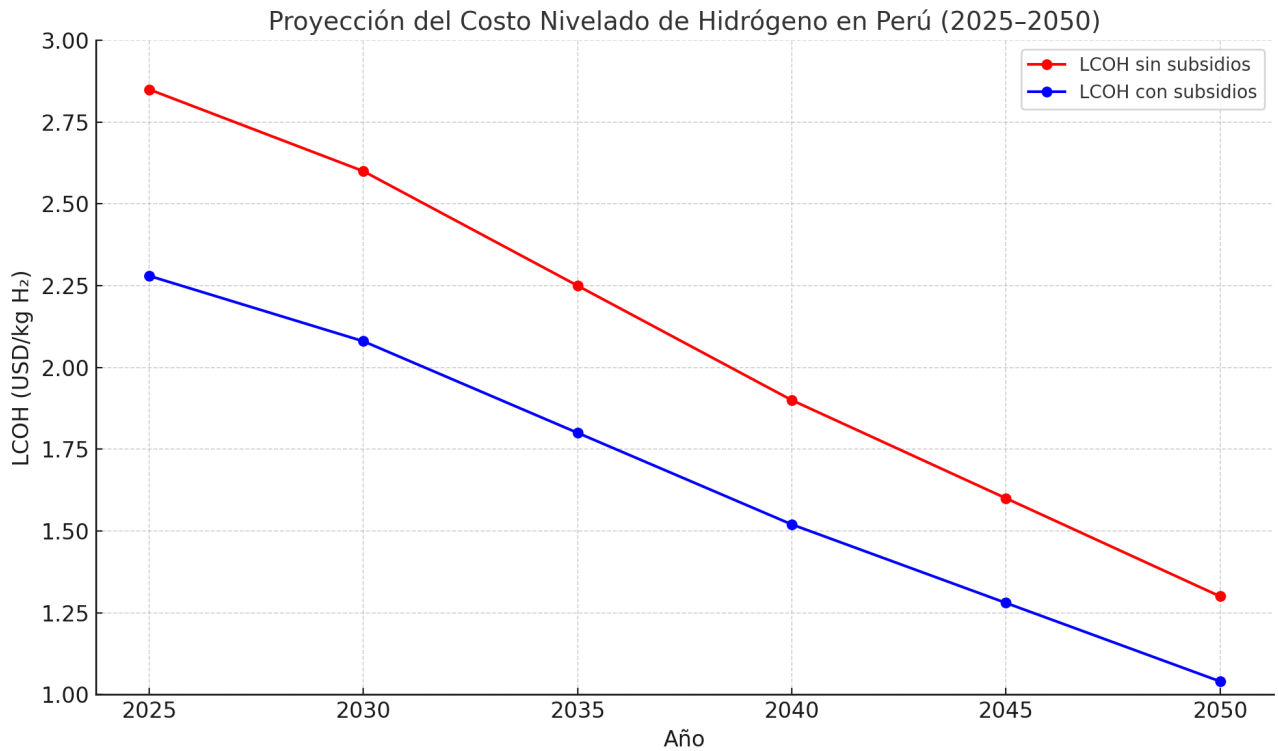
Fuente: Elaboración propia basada en datos de IRENA (2023), IEA (2023), BloombergNEF (2022), H2LAC, y cálculos propios del LCOH.

La Figura 32 muestra la proyección del Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) en Perú entre 2025 y 2050, considerando escenarios con y sin subsidios gubernamentales. Los datos se basan en estimaciones de ENGIE Impact y H2 Perú (2021), con interpolaciones intermedias.

El escenario sin subsidios representa la evolución natural del mercado, mientras que el escenario con subsidios asume una reducción del 20% del LCOH, basada en experiencias internacionales donde los gobiernos han cubierto hasta el 50% de los costos de inversión inicial (CAPEX). [MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE, 2020].

Esta comparación evidencia que el apoyo estatal puede reducir el LCOH de 2,85 USD/kg en 2025 a 1,04 USD/kg en 2050, haciendo más competitivo al hidrógeno verde frente a alternativas fósiles. No obstante, este comportamiento está sujeto a factores externos como crisis geopolíticas, fluctuaciones energéticas y políticas públicas, lo que requiere una evaluación continua.

Figura 32: Proyección del LCOH en Perú (2025-2050)



Fuente: Elaboración propia basada en datos de ENGIE Impact, H2 Perú (2021), Ministerio de Energía de Chile (2020) y cálculos propios de LCOH.

El gráfico muestra una tendencia lineal de reducción del LCOH a lo largo del tiempo, con subsidios acelerando esta disminución. Sin embargo, esta proyección no es estática, ya que factores externos pueden alterar significativamente estos valores. Eventos como crisis económicas, conflictos geopolíticos, cambios en políticas energéticas, fluctuaciones en los costos de insumos y avances tecnológicos pueden modificar el comportamiento del LCOH. Por ejemplo, una guerra entre países productores de energía podría aumentar los costos de infraestructura y exportación, afectando la competitividad del hidrógeno verde.

Todos los cálculos económicos, técnicos y comparativos presentados en este trabajo fueron elaborados a partir de parámetros reales y fórmulas reconocidas internacionalmente. Se utilizó una combinación de datos técnicos de fuentes como IRENA, IEA y Fraunhofer con cálculos propios de LCOH, producción, ROI y sensibilidad, lo que permitió una evaluación sólida y coherente de la competitividad del hidrógeno verde en el Perú.

## 6 CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado que Perú posee un gran potencial para la producción de hidrógeno verde gracias a su alta disponibilidad de energía hidroeléctrica (55%) y el crecimiento de fuentes renovables como la solar y la eólica (10%). Sin embargo, su desarrollo depende de factores clave como infraestructura, marco regulatorio y viabilidad económica.

La reciente Ley de Fomento del Hidrógeno Verde (2024) representa un avance importante, pero aún falta establecer incentivos fiscales y esquemas de financiamiento que faciliten su implementación. En comparación con Brasil, Perú tiene menor desarrollo en energías renovables y políticas de hidrógeno, pero cuenta con condiciones climáticas favorables para su producción. La ubicación geográfica de Perú, con costa únicamente en el océano Pacífico, influye en su potencial para exportar hidrógeno verde a mercados europeos. Esta situación implica rutas marítimas más largas y costosas en comparación con países que tienen acceso directo al océano Atlántico, como Brasil. Sin embargo, Perú está tomando medidas para superar estos desafíos y posicionarse como un competidor en el mercado global del hidrógeno verde. Por otro lado, Brasil, con acceso al océano Atlántico, posee una ventaja geográfica para exportar hidrógeno verde a Europa debido a rutas marítimas más directas y económicas. La región Nordeste de Brasil, en particular, se ha convertido en un actor fundamental en la generación eléctrica a partir de fuentes renovables, produciendo el 68% de toda la energía solar y eólica del país. Esta capacidad posiciona a Brasil favorablemente para la producción y exportación de hidrógeno verde hacia Europa.

El Índice de Competitividad del Hidrógeno Verde (ICHV) mostró que, aunque Perú tiene un LCOH competitivo, enfrenta desafíos en infraestructura y costos de exportación. Países como Brasil y Chile lideran en estos aspectos, lo que les otorga una ventaja en la producción y comercialización de hidrógeno verde. No obstante, si Perú optimiza su infraestructura y costos logísticos, podría mejorar su posicionamiento en la región.

El análisis del Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) (2.28 USD/kg H<sub>2</sub> – 1.04 USD/kg H<sub>2</sub>) muestra una tendencia lineal de reducción hacia 2050, con subsidios gubernamentales acelerando esta disminución. Sin embargo, esta proyección no es estática, ya que factores externos como crisis económicas, conflictos geopolíticos, cambios en políticas energéticas y avances tecnológicos pueden modificar significativamente el comportamiento del LCOH. Por ejemplo, una guerra entre países productores de energía podría aumentar los costos de infraestructura y exportación, afectando la competitividad del hidrógeno verde en Perú. Las regiones con mayor viabilidad para la producción de hidrógeno verde en Perú son la sierra (Cusco, Arequipa, Puno) y la costa sur (Ica, Tacna), donde la combinación de energía hidroeléctrica y solar permite una producción eficiente. Sin embargo, la costa enfrenta limitaciones de acceso al agua, que podrían ser superadas con desalinización.

Entre las tecnologías de electrólisis, la alcalina (AWE) es la opción más viable por su bajo costo de inversión y compatibilidad con la energía hidroeléctrica. Sin embargo, para que Perú se consolide como un actor clave en la producción de hidrógeno verde, es necesario adoptar estrategias clave:

- Fortalecer el marco regulatorio, estableciendo incentivos financieros y estrategias de integración con el mercado internacional.
- Desarrollar infraestructura para almacenamiento y distribución, priorizando sectores estratégicos como minería y transporte.
- Optimizar la selección tecnológica, priorizando la electrólisis alcalina (AWE) en la sierra y explorando la electrólisis PEM con desalinización en la costa.
- Fomentar la inversión privada y pública, promoviendo alianzas estratégicas con empresas extranjeras.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**4E CHILE.** Power-to-X Hub. Cluster de Energía (4e Chile). Disponible en: <https://4echile.cl/proyectos/power-to-x-hub/>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**AGENCIA AUSTRALIANA DE ENERGÍAS RENOVABLES (ARENA).** Australia firma acuerdo de exportación de hidrógeno con Japón. ARENAWIRE, 14 ene. 2022. Disponible en: <https://arena.gov.au/blog/australia-signs-hydrogen-export-deal-with-japan/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**AGÊNCIA BRASIL.** Despacho do Presidente da República sobre a Política Nacional de Transição Energética. Disponível em: <https://agenciagov.etc.com.br/noticias/202409/despacho-presidente-da-republica-politica-nacional-transicao-energetica>. Acesso em: 16 set. 2024.

**AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA).** Hidrógeno na América Latina: relatório completo. 2023. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/8bad1e39-1587-4770-b60a-c9368e6347ae/IEA\\_HydrogeninLatinAmerica\\_Fullreport\\_Spanish.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/8bad1e39-1587-4770-b60a-c9368e6347ae/IEA_HydrogeninLatinAmerica_Fullreport_Spanish.pdf). Acesso em: 26 fev. 2025.

**AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP).** Resolução n.º 791, de 12 de junho de 2019. Dispõe sobre a individualização das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Disponível em: [https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-791-2019-di\\_\\_\\_\\_\\_spoe-sobre-a-individualizacao-das-metas-compulsorias-anuais-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-a-comercializacao-de-combustiveis-no-ambito-da-politica-nacional-de-biocombustiveis-renovabio?origin=instituicao&q=791/2019](https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-791-2019-di_____spoe-sobre-a-individualizacao-das-metas-compulsorias-anuais-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-a-comercializacao-de-combustiveis-no-ambito-da-politica-nacional-de-biocombustiveis-renovabio?origin=instituicao&q=791/2019). Acesso em: 16 set. 2024.

**AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA (AIE).** Perspectivas Energéticas de América Latina 2023. AIE, 2023. Disponible en: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/878e705f-43e0-4858-9c5a-6349447ed669/LatinAmericaEnergyOutlook\\_Spanish.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/878e705f-43e0-4858-9c5a-6349447ed669/LatinAmericaEnergyOutlook_Spanish.pdf). Acceso en: 4 mar. 2025.

**AGORA ENERGIEWENDE.** *LCOH of Hydrogen: Levelized Cost of Hydrogen for Real-World Projects*. Berlin: Agora Energiewende, 2022. Disponível em: [https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10\\_Trans4Real/A-EW\\_301\\_LCOH\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10_Trans4Real/A-EW_301_LCOH_WEB.pdf). Acesso em: 11 abr. 2025.

**AMBROCIO, Q. A.** Proyecto De Ingeniería: Análisis Del Dimensionamiento De Una Planta Piloto De Producción De Hidrógeno, Instituto Latinoamericano De Tecnología, Infraestructura Y Territorio (ILATIT), 2016.

**AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA).** Plan Nacional de Recursos Hídricos. ANA, 2013. Disponible en: <https://www.ana.gob.pe/portal/gestion-del-conocimiento-girh/plan-nacional-de-recursos-hidricos>. Acesso en: 6 mar. 2025.

**ÁNGEL, Ana; MÁRQUEZ, Juan Sebastián.** Estándares de sostenibilidad para la regulación del mercado de hidrógeno: estudio de certificación de hidrógeno. Inicio, ago. 2022. Disponible en: <https://inicio.com/wp-content/uploads/2022/09/Estandares-de-sostenibilidad-para-la-regulacion-del-mercado-de-hidrogeno-estudio-de-certificacion-de-hidrogeno.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ARANIBAR RAMOS, Edgar Romario; OLARTE PACCO, Miguel Angel Demetrio.** Hidrógeno verde: abriendo las puertas a un futuro energético sostenible en el Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, Lima, n. 13, p. 1–20, jan./jun. 2024. Disponível em:

<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/Kawsaypacha/article/view/27555/26364>. Acesso em: 11 abr. 2025.

**ASOCIACIÓN PERUANA DE ENERGÍAS RENOVABLES (SPR)**. Nueva Ley de fomento del "hidrógeno verde" tiene una definición errada que pondrá en desventaja al Perú. SPR, 25 mar. 2024. Disponible en: <https://www.spr.pe/2024/03/25/nueva-ley-de-fomento-del-hidrogeno-verde-tiene-una-definicion-errada-que-pondra-en-desventaja-al-peru/>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY HUB (AREH)**. Sitio web oficial. Disponible en: <https://www.areh.com.au/>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA)**. Mapa hidrográfico del Perú. ANA, 2009. Disponible en: [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/mapa\\_hidrografico\\_0\\_0\\_2.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/mapa_hidrografico_0_0_2.pdf). Acesso en: 4 mar. 2025.

**Batech Energy**. Publicación sobre el desarrollo del hidrógeno en América Latina. LinkedIn. Disponible en: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7118042138126278656/?originalSubdomain=es>. Acesso en: 13 ago. 2024.

**BANCO CENTRAL DE RESERVA DEL PERÚ (BCRP)**. Plan Estratégico del BCRP 2023-2024. BCRP, 2023. Disponible en: <https://www.bcrp.gob.pe/transparencia/planeamiento-y-organizacion/planes-y-politicas/plan-estrategico-del-bcrp-2023-2024.html>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO (BID)**. La sostenibilidad del hidrógeno más allá de los colores: el proceso de certificación. Blog Energía para el Futuro, 17 dic. 2021. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-sostenibilidad-del-hidrogeno-mas-alla-de-los-colores-el-proceso-de-certificacion/>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**BANCO MUNDIAL**. Datos abiertos del Banco Mundial: Perú. Banco Mundial, 2025. Disponible en: <https://data.worldbank.org/country/peru>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**BANCO MUNDIAL**. Población total de Perú. Banco Mundial, 2023. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=PE>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE (BCN)**. Estrategia de Desarrollo de Hidrógeno Verde en Australia. Disponible en: <https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/estrategia-desarrollo-hidrogeno-verde-australia>. Acesso em: 16 set. 2024.

**BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE (BCN)**. Experiencias comparadas en estrategias de desarrollo del hidrógeno verde. BCN, 2021. Disponible en: [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29082/1/BCN\\_Experiencias\\_comparadas\\_en\\_Estrategias\\_de\\_desarrollo\\_del\\_Hidrogeno\\_verde.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29082/1/BCN_Experiencias_comparadas_en_Estrategias_de_desarrollo_del_Hidrogeno_verde.pdf). Acesso en: 4 mar. 2025.

**BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE (BCN)**. Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030: principales lineamientos. BCN, mayo de 2024. Disponible en: [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36042/1/BCN\\_Plan\\_de\\_Accion\\_Hidrogeno\\_Verde\\_2023\\_2030.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36042/1/BCN_Plan_de_Accion_Hidrogeno_Verde_2023_2030.pdf). Acesso en: 4 mar. 2025.

**BNAMERICAS**. El potencial del hidrógeno verde en Perú. BNamericas, 2023. Disponible en:

<https://www.bnamericas.com/es/noticias/el-potencial-del-hidrogeno-verde-en-peru>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**BRASIL.** Despacho do Presidente da República. Diário Oficial da União, 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-582074596>. Acesso em: 16 set. 2024.

**BRASIL.** Lei n.º 14.948, de 22 de agosto de 2024. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Hidrogênio Verde. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm). Acesso em: 16 set. 2024.

**BRASIL.** Lei n.º 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis n.ºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 ago. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-veto-172540-pl.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**BRASIL.** Lei n.º 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis n.ºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**BRASIL.** Lei n.º 15.103, de 22 de janeiro de 2025. Institui o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten); e altera as Leis n.ºs 13.988, de 14 de abril de 2020, 11.484, de 31 de maio de 2007, 9.991, de 24 de julho de 2000, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jan. 2025. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2025/lei/L15103.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/L15103.htm). Acesso em: 4 mar. 2025.

**BIBLIOTECA UNIVERSIDAD DE SEVILLA.** *Células de Combustible*. Disponível em: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.4+C%C3%A9lulas+de+Combustible.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

**CAF.** Hidrógeno verde: fuente de energía para el desarrollo económico del nordeste brasileño. CAF, 2024. Disponible en: <https://www.caf.com/es/blog/hidrogeno-verde-fuente-de-energia-para-el-desarrollo-economico-del-nordeste-brasileno/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**CENEPRED.** Mapa de cuencas hidrográficas del Perú. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2025. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/967>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS (C2ES).** COP 21 – Acordo de Paris. Disponible em: <https://www.c2es.org/content/cop-21-paris/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**CHILE.** Ley N.º 21.305, sobre Eficiencia Energética. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, 13 feb. 2021. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1173730>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**CHILE.** Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030. Santiago: Ministério de Energía, 2023. Disponível em: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan\\_de\\_accion\\_hidrogeno\\_verde\\_2023-2030.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf). Acesso em: 16 set. 2024.

**CLEAN AIR TASK FORCE (CATF).** Lo que dice el último informe del IPCC sobre los combustibles sin carbono. Clean Air Task Force, 11 nov. 2022. Disponible en: <https://www.catf.us/es/2022/11/what-the-latest-ipcc-report-says-about-zero-carbon-fuels/>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**CLEAN AIR TASK FORCE (CATF).** Realidades técnico-económicas del transporte de hidrógeno a larga distancia. CATF, 26 sep. 2023. Disponible en: <https://www.catf.us/es/resource/techno-economic-realities-long-distance-hydrogen-transport/>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**CLIMATE CENTRAL.** Día Mundial de Acción Contra el Calor. 2024. Disponible en: <https://www.climatecentral.org/climate-matters/global-heat-action-day?lang=es>. Acesso en: 4 mar. 2025.

**COALIZÃO CLIMA E AR LIMPO (CCAC).** Brasil. Disponível em: <https://www.ccacoalition.org/es/partners/brazil>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CEBDS).** UNFCCC, COP, IPCC, OMM: ¿o que significa todas esas siglas? Disponible em: <https://cebds.org/noticia/unfccc-cop-ipcc-omm-o-que-significa-todas-essas-siglas/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UNFCCC).** Terceira Conferência das Partes (COP 3). Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-3>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UNFCCC).** Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Lima, 2014 (COP 20). Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/lima-climate-change-conference-december-2014/cop-20/cop-20-decisions>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UNFCCC).** Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Lima, 2014 (COP 20). Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/lima-climate-change-conference-december-2014/cop-20/cop-20-decisions>. Acesso em: 28 fev. 2025.

**CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UNFCCC).** Contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC). Disponível em: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/contribuciones-determinadas-a-nivel-nacional-ndc>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**DATOSMACROPerú** - Emisiones de CO<sub>2</sub>. Disponível em: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/peru>. Acesso em: 11 abr. 2025.

**DATOSMACROBrasil** - Emisiones de CO<sub>2</sub>. Disponível em: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/brasil>. Acesso em: 11 abr. 2025.

**DIALOGUE EARTH.** Cambio climático y su impacto en la salud en América del Sur. Disponible en: <https://dialogue.earth/es/clima/364607cambio-climatico-salud-america-del-sur/>. Acceso en: 16 set. 2024.

**DFSUD.** Hidrógeno verde: Brasil, la "Arabia Saudita verde" de América Latina. DF SUD, 2024. Disponible en: <https://dfsud.com/america/hidrogeno-verde-brasil-la-arabia-saudita-verde-de-america-latina>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**DEPARTAMENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO, ENERGÍA, MEDIO AMBIENTE Y AGUA DE AUSTRALIA (DCCEEW).** Industria del hidrógeno en crecimiento en Australia. DCCEEW, 2024. Disponible en: <https://www.dceew.gov.au/energy/hydrogen>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**EDP.** Producción y uso de H<sub>2</sub> verde en Perú. EDP, 2023. Disponible en: <https://www.edp.com/es/innovacion/new/produccion-y-uso-de-h2-verde-peru>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**EL PERIÓDICO DE LA ENERGÍA.** ¿Cómo funcionan las tecnologías Power-to-X? El Periódico de la Energía, 20 ago. 2019. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/como-funcionan-las-tecnologias-power-to-x/>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**ENERGÍA ESTRATÉGICA.** Revelan que la capacidad eólica instalada de Perú crecerá el 148% al alcanzar más de 1 GW este año. Energía Estratégica, 21 nov. 2023. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/revelan-que-la-capacidad-eolica-instalada-de-peru-crecera-el-148-al-alcanzar-mas-de-1-gw-este-ano/>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**ENERGÍA ESTRATÉGICA.** El potencial de Perú para producir H<sub>2</sub> verde: 9 GW de electrolizadores y 15 GW renovables al 2050. Energía Estratégica, 29 sept. 2021. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/el-potencial-de-peru-para-producir-h2-verde-9-gw-de-electrolizadores-y-15-gw-renovables-al-2050/>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**ENERGÍA ESTRATÉGICA.** Perú quiere avanzar en el desarrollo de hidrógeno verde para descarbonizar la minería y el agro. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/peru-quiere-avanzar-en-el-desarrollo-de-hidrogeno-verde-para-descarbonizar-la-mineria-y-el-agro/>. Acceso en: 22 jul. 2024.

**ENERGÍA ESTRATÉGICA.** Fuerte apuesta al hidrógeno verde: para el 2050, Perú podría desplegar hasta 12 GW de electrólisis con un costo meta de 1 USD/kg. Energía Estratégica, 1 jun. 2023. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/fuerte-apuesta-al-hidrogeno-verde-para-el-2050-peru-podria-desplegar-hasta-12-gw-de-electrolisis-con-un-costo-meta-de-1-usd-kg/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ENGIE Impact; H2 Perú.** Potencial del hidrógeno verde en el Perú: impulsando la transición energética del Perú. ENGIE Impact, 2021. Disponible en: [https://h2.pe/uploads/20210908\\_H2-Peru\\_Estudio-final.pdf](https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf). Acceso en: 6 mar. 2025.

**ENERGIMINAS.** Este Komatsu será el camión minero a hidrógeno más grande del mundo, Energiminas El Mundo Minero Energético a un Click de Distancia, 2020. Disponible en: <https://energiminas.com/este-komatsu-sera-el-camion-minero-a-hidrogeno-mas-grande-del-mundo/>.

**ENERGIMINAS.** Nueva ley de fomento del hidrógeno verde tiene una definición errada que pondrá en desventaja al Perú, afirma la SPR. Energiminas, 26 mar. 2024. Disponible en:

<https://energiminas.com/2024/03/26/nueva-ley-de-fomento-del-hidrogeno-verde-tiene-una-definicion-errada-que-pondra-en-desventaja-al-peru-afirma-la-spr/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ENERGIMINAS.** Hidrógeno verde tiene potencial para crear 20.000 empleos directos al 2030 en el Perú. Energiminas, 2024. Disponible en: <https://energiminas.com/2024/02/02/hidrogeno-verde-tiene-potencial-para-crear-20000-empleos-directos-al-2030-en-el-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ENERGIMINAS.** *Perú actualmente produce hidrógeno gris: Andrés Díaz de Schneider Electric.* 18 jul. 2023. Disponible en: <https://energiminas.com/2023/07/18/peru-actualmente-produce-hidrogeno-gris-andres-diaz-de-schneider-electric/>. Acceso en: 11 abr. 2025.

**ENERGY NEWS.** Los grandes recursos eólicos, solares y geotérmicos de Perú. Energy News, 22 jun. 2020. Disponible en: <https://www.energynews.es/recursos-eolicos-solares-y-geotermicos-de-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ERNST & YOUNG (EY).** Transición energética en Latinoamérica: Colombia, México y Perú. EY, 2023. Disponible en: [https://www.ey.com/es\\_pe/insights/revista-execution/informes/transicion-energetica-latinoamerica](https://www.ey.com/es_pe/insights/revista-execution/informes/transicion-energetica-latinoamerica). Acceso en: 4 mar. 2025.

**ESTUDIO ECHECOPAR.** Se modifica la Ley de Fomento del Hidrógeno Verde. Estudio Echeconpar, 22 ago. 2024. Disponible en: <https://www.echecopar.com.pe/publicaciones-se-modifica-la-ley-de-fomento-del-hidrogeno-verde.html>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**EXPANSIÓN.** Comparar economía países: Perú vs Brasil. Datosmacro.com, 2025. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/paises/comparar/peru/brasil?sc=XE92>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**EXXONMOBIL.** ExxonMobil planning hydrogen production, carbon capture and storage at Baytown complex. Disponible en: [https://corporate.exxonmobil.com/news/news-releases/2022/0301\\_exxonmobil-planning-hydrogen-production-carbon-capture-and-storage-at-baytown-complex](https://corporate.exxonmobil.com/news/news-releases/2022/0301_exxonmobil-planning-hydrogen-production-carbon-capture-and-storage-at-baytown-complex). Acceso en: 16 set. 2024.

**FARGE, E.** Planta operativas de hidrógeno en Perú 2024. LinkedIn. Disponible en: [https://www.linkedin.com/posts/efarge\\_planta-operativas-de-hidrogeno-en-peru-2024-activity-7197040022988963841-ilnR/?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/efarge_planta-operativas-de-hidrogeno-en-peru-2024-activity-7197040022988963841-ilnR/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop). Acceso en: 11 ago. 2024.

**FERREIRA, P. F. P.** Análise da Viabilidade de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio Utilizando Células a Combustível, Disertação de mestrador, Campinas, 2003.

**FLORES, Sandra.** La escasez de fertilizantes y crisis alimentaria. Macroconsult, 3 jun. 2022. Disponible en: <https://sim.macroconsult.pe/la-escasez-de-fertilizantes-y-crisis-alimentaria/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**FRANCOVIGH, Gabriela.** La producción anual de hidrógeno de bajas emisiones alcanzaría 38 Mt en 2030. Energía Estratégica, 26 sep. 2023. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/la-produccion-anual-de-hidrogeno-de-bajas-emisiones-alcanzaria-38-mt-en-2030/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**FUNDACION RENOVABLES.** El Papel del Hidrógeno en la transición energética. Disponible en: <https://fundacionrenovables.org/wp-content/uploads/2021/10/20211006-El-papel-del-hidrogeno-en-la-transicion-energetica.pdf>

**GARCÍA, Juan; PÉREZ, María.** Estudio de caso: tecnologías de producción de hidrógeno verde para Ecuador. ResearchGate, 2023. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/379407738\\_ESTUDIO\\_DE\\_CASO\\_TECNOLOGIAS\\_DE\\_PRODUCCION\\_DE\\_HIDROGENO\\_VERDE\\_PARA\\_ECUADOR](https://www.researchgate.net/publication/379407738_ESTUDIO_DE_CASO_TECNOLOGIAS_DE_PRODUCCION_DE_HIDROGENO_VERDE_PARA_ECUADOR). Acceso en: 4 mar. 2025.

**GARCÍA, Julián.** Brasil da luz verde al marco legal del hidrógeno de bajo carbono. EconoJournal, 4 jul. 2024. Disponible en: <https://econojournal.com.ar/2024/07/brasil-da-luz-verde-al-marco-legal-del-hidrogeno-de-bajo-carbono/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GARRIGUES.** Perú aprueba la Ley No. 31992, Ley del fomento del hidrógeno verde. Garrigues, 26 mar. 2024. Disponible en: [https://www.garrigues.com/es\\_ES/noticia/peru-aprueba-ley-no-31992-ley-fomento-hidrogeno-verde](https://www.garrigues.com/es_ES/noticia/peru-aprueba-ley-no-31992-ley-fomento-hidrogeno-verde). Acceso en: 4 mar. 2025.

**GENIA Global.** Tipos de hidrógeno según colores. Disponible en: <https://geniaglobal.com/tipos-de-hidrogeno-segun-colores/>. Acceso en: 22 jul. 2024.

**GRAFFIGNA, Rossana.** Brasil aprueba su ley marco del hidrógeno y lo nombra "hidrógeno de baja emisión de carbono". JusBrasil, 2 ago. 2024. Disponible en: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/brasil-aprueba-ley-marco-para-el-hidrogeno-de-baja-emision-de-carbono/2673706668>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GIELEN, Dolf; LATHWAL, Priyank; LOPEZ ROCHA, Silvia Carolina.** Promover el poder del hidrógeno para acelerar la transición hacia la energía limpia. Blogs del Banco Mundial, 21 abr. 2023. Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/es/voices/promover-el-poder-del-hidrogeno-para-acelerar-la-transicion-hacia-la-energia-limpia>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**GLOBAL ENERGY MONITOR (GEM).** Perfil energético: Brasil. GEM.wiki, 2021. Disponible en: [https://www.gem.wiki/Perfil\\_energ%C3%A9tico%3A\\_Brasil](https://www.gem.wiki/Perfil_energ%C3%A9tico%3A_Brasil). Acceso en: 4 mar. 2025.

**GONZÁLEZ SÁNCHEZ, Rocío.** Evaluación de las emisiones de hidrógeno a lo largo de todo el ciclo de vida. Clean Air Task Force, 26 oct. 2022. Disponible en: <https://www.catf.us/es/2022/10/hydrogen-lca-emissions-across-life-cycle/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GOBIERNO DE CHILE.** Gobierno presenta la Estrategia Nacional para que Chile sea líder mundial en hidrógeno verde. Embajada de Chile en Alemania, 30 oct. 2020. Disponible en: <https://www.chile.gob.cl/alemania/noticias/gobierno-presenta-la-estrategia-nacional-para-que-chile-sea-lider>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GOBIERNO DEL PERÚ.** Conocer los tributos en la importación. Gob.pe, 2025. Disponible en: <https://www.gob.pe/1139-conocer-los-tributos-en-la-importacion>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GOOD NEW ENERGY.** Brasil: claves que avalan sus planes con el hidrógeno verde. Good New Energy, 2024. Disponible en: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/hidrogeno-verde-brasil/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GOOD NEW ENERGY.** Los principales avances regulatorios en el sector del hidrógeno verde que trae 2025. Good New Energy, 28 feb. 2025. Disponible en: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/los-principales-avances-regulatorios-en-el-sector-del-hidrogeno-verde-que-trae-2025/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GREGORI, Javier.** Acuerdo "in extremis" en la Cumbre del clima de Bakú: los más ricos entregarán 300.000 millones en 2035 a los países en desarrollo. Cadena SER, 24 nov. 2024. Disponible en:

<https://cadenaser.com/nacional/2024/11/24/acuerdo-in-extremis-en-la-cumbre-del-clima-de-baku-los-mas-ricos-entregaran-300000-millones-en-2035-a-los-paises-en-desarrollo-cadena-ser/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GRZ TECHNOLOGIES.** Grey hydrogen. GRZ Technologies, 12 ago. 2024. Disponible en: <https://grz-technologies.com/wiki/grey-hydrogen/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**GRZ TECHNOLOGIES.** Tecnología de célula de combustible. GRZ Technologies, 2024. Disponible en: <https://grz-technologies.com/pt-br/wiki/tecnologia-de-celula-de-combustivel/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**H2 BUSINESS NEWS.** Presentan hoja de ruta para el hidrógeno verde en Perú. H2 Business News, 16 mar. 2022. Disponible en: <https://h2businessnews.com/presentan-hoja-de-ruta-para-el-hidrogeno-verde-en-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**H2LAC.** Hidrógeno verde en Perú: presentan modificaciones a la ley de fomento del H2V. H2LAC, 26 sep. 2024. Disponible en: <https://h2lac.org/noticias/hidrogeno-verde-en-peru-presentan-modificaciones-a-la-ley-de-fomento-del-h2v/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**H2LAC.** La agenda del hidrógeno verde en el Perú. H2LAC, 31 mar. 2023. Disponible en: <https://h2lac.org/noticias/la-agenda-del-hidrogeno-verde-en-el-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**H2LAC.** Mapas interactivos del hidrógeno verde en América Latina y el Caribe. H2LAC. Disponible en: <https://h2lac.org/mapas/>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**H2 PERÚ.** Revista de Prensa Julio 2024. H2 Perú, julio de 2024. Disponible en: <https://h2.pe/uploads/REVISTA-DE-PRENSA-JULIO-2024-H2-PERU.pdf>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**H2PERUPAPER.** Hidrógeno verde: Creación de una visión de prosperidad compartida y sostenible, H2 Perú, Asociación Peruana de Hidrógeno, promueve el hidrógeno verde como una oportunidad para el país de descarbonizar, diversificar y dinamizar la economía nacional. Perú, 2021.

**H2PERU.** Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú, Asociación Peruana de Hidrógeno, 2021. Disponible en: < [https://h2.pe/uploads/20210908\\_H2-Peru\\_Estudio-final.pdf](https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf) >.

**H2 Perú.** Revista de Prensa – Julio 2024. H2 Perú, jul. 2024. Disponible en: <https://h2.pe/uploads/REVISTA-DE-PRENSA-JULIO-2024-H2-PERU.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**H2 Perú y Embajada Británica en Lima.** Propuesta de Reglamento de la Ley de Fomento del Hidrógeno Verde. 2025. Disponible en: [https://h2.pe/uploads/20012025\\_H2PeruEmbajada-Britanica-En-Lima-Propuesta-de-Reglamento-de-Ley-Fomento-del-H2V.pdf](https://h2.pe/uploads/20012025_H2PeruEmbajada-Britanica-En-Lima-Propuesta-de-Reglamento-de-Ley-Fomento-del-H2V.pdf). Acceso en: 4 mar. 2025.

**HYDROGEN ENERGY SUPPLY CHAIN (HESC).** Hydrogen Energy Supply Chain. Disponible en: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/>. Acceso en: 16 set. 2024.

**HIF GLOBAL.** Proyecto Haru Oni. HIF Global, 2024. Disponible en: <https://hifglobal.com/haru-oni>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**HYDROGEN ENERGY SUPPLY CHAIN (HESC).** Página principal. HESC, 2024. Disponible en: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**HOLGADO, S. H.** Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis, Facultad de Náutica de Barcelona, UPC, España 2012.

**ICLEI.** La agricultura y la deforestación son los mayores emisores de gases de efecto invernadero (GEI) en Brasil. ICLEI América del Sur, 3 may. 2021. Disponible en: <https://americadosul.iclei.org/es/la-agricultura-y-la-deforestacion-son-los-mayores-emisores-de-gases-de-efecto-invernadero-gei-en-brasil/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.** Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity: executive summary. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity/executive-summary>. Acceso en: 22 jul. 2024.

**IEA.** World Energy Investment 2022. International Energy Agency, 2022. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b0beda65-8a1d-46ae-87a2-f95947ec2714/WorldEnergyInvestment2022.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**IIMP.** Perú tiene capacidad de convertirse en un competitivo exportador de hidrógeno verde. Disponible en: <https://iimp.org.pe/institucional/noticias/peru-tiene-capacidad-de-convertirse-en-un-competitivo-exportador-de-hidrogeno-verde>. Acceso en: 11 abr. 2025.

**IMP INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ .** El 80% de las mineras en Perú están interesadas en el uso de hidrógeno verde. Disponible en: <https://iimp.org.pe/institucional/noticias/el-80-de-las-mineras-en-peru-estan-interesadas-en-el-uso-de-hidrogeno-verde#:~:text=Minas%20del%20Per%C3%BA,El80%DElasminerasenPer%C3%BAest%C3%A1ninteresadas,elusodehidr%C3%B3genoverde&text=Compartir%20en%3A,17%20de%20julio%20de%202024>. Acceso en: 22 jul. 2024.

**INFRASTRUCTURE PIPELINE.** Asian Renewable Energy Hub. Disponible en: <https://infrastructurepipeline.org/project/asian-renewable-energy-hub>. Acceso en: 16 set. 2024.

**INGEI,** Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014, Ministerio del Ambiente MINAM, Peru 2021.

**INSTITUTO PERUANO DE ECONOMÍA (IPE).** Importación de urea cayó 84% en el primer trimestre del año. IPE, 9 may. 2022. Disponible en: <https://www.ipe.org.pe/portal/importacion-de-urea-cayo-84-en-el-primer-trimestre-del-ano/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI).** Economía de 18 departamentos creció en el primer trimestre de 2024. INEI, 23 may. 2024. Disponible en: <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/economia-de-18-departamentos-crecio-en-el-primer-trimestre-de-2024-15209/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI).** Solo en doce departamentos la actividad productiva supera al promedio nacional durante el IV trimestre de 2022. INEI, 23 feb. 2023. Disponible en: <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/solo-en-doce-departamentos-la-actividad-productiva-supera-al-promedio-nacional-durante-el-iv-trimestre-de-2022-14294/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**IPCC.** Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2022. Disponible en:

<https://www.unep.org/es/resources/informe/sexta-informe-de-evaluacion-del-ipcc-cambio-climatico-2022>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**IPCC.** Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Acceso en: 4 mar. 2025.

**IRENA.** Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. International Renewable Energy Agency, 2020. Disponible en: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf). Acceso en: 4 mar. 2025.

**IRENA.** *Green hydrogen: A guide to policy making*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020. Disponible en: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_policy\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf). Acceso en: 11 abr. 2025.

**INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).** Sixth Assessment Report (AR6) – The Working Group contributions. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acceso en: 22 jul. 2024.

**INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT).** Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero en combustibles para vehículos pesados en Europa. 2023. Disponible en: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/lca-ghg-fs-sp-emissions-hdv-fuels-europe-feb23.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA).** Latin America Energy Outlook. Disponible en: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/878e705f-43e0-4858-9c5a-6349447ed669/LatinAmericaEnergyOutlook\\_Spanish.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/878e705f-43e0-4858-9c5a-6349447ed669/LatinAmericaEnergyOutlook_Spanish.pdf). Acceso en: 23 jul. 2024.

**INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA).** Green hydrogen strategy: A guide to design. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Green-hydrogen-strategy-A-guide-to-design>. Acceso en: 11 ago. 2024.

**INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY (IPHE).** Partners. Disponible en: <https://www.iphe.net/partners>. Acceso en: 16 set. 2024.

**JIMENEZ, S. F. L.** Evaluación Técnica Y Económica Del Uso De Hidrógeno Verde En Aplicaciones Para La Industria Y Desplazamiento De Combustible Fósil, Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Eléctrica, 2020.

**LOPEZ, A. J. CAPEX,** Economipedia.com, Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/capex.html>, 2018.

**LIZÁRRAGA SÁNCHEZ, Diana.** Bases regulatorias para la integración del hidrógeno verde en Perú. Revista Peruana de Energía, 2024. Disponible en: <https://santivanez.com.pe/wp-content/uploads/2024/08/3.-Integracion-del-hidrogeno-verde-en-el-Peru.pdf>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**LOW CARBON POWER.** ¿De dónde provienen nuestros números de emisiones? 2022. Disponible

en: <https://lowcarbonpower.org/es/blog/emissions>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MACEDA, Fernando.** La agenda del hidrógeno verde en el Perú. H2LAC, 31 mar. 2023. Disponible en: <https://h2lac.org/noticias/la-agenda-del-hidrogeno-verde-en-el-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MEDINA, Noelia; SCARONE, Martín; SIERRA, Wilson; COOPMAN, Martijn; CORREA, Cecilia.** Hidrógeno Verde: un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización. Banco Interamericano de Desarrollo, 2021. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hidrogeno-Verde-un-paso-natural-para-Uruguay-hacia-la-descarbonizacion.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MEDINILLA, Matías.** Brasil aprobó su segunda ley de hidrógeno y el sector confía que se concretarán subastas en 2025. Energía Estratégica, 11 sep. 2024. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/brasil-aprobo-su-segunda-ley-de-hidrogeno-y-el-sector-confia-que-se-concretaran-subastas-en-2025/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINEM,** Balance Nacional de Energía 2019, Ministerio de Energía y Minas, Peru 2021. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1875333/Balance%20Nacional%20de%20la%20Energ%C3%ADa%202019.pdf>

**MINEM,** Sistema de Planificación Energética Nacional, Ministerio de Energía y Minas, Disponible en: [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Sistema%20de%20Planificacion%20Energetica%20Nacional2\\_0.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Sistema%20de%20Planificacion%20Energetica%20Nacional2_0.pdf)

**MME BRASIL.** Presidente Lula e Alexandre Silveira lançam Política Nacional de Transição Energética com potencial de R\$ 2 trilhões em investimentos. Ministério de Minas e Energia, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/presidente-lula-e-alexandre-silveira-lancam-politica-nacional-de-transicao-energetica-com-potencial-de-r-2-trilhoes-em-investimentos>. Acesso em: 16 set. 2024.

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA).** Nova NDC do Brasil representa paradigma para o desenvolvimento do país, diz Marina na COP29. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/nova-ndc-do-brasil-representa-paradigma-para-o-desenvolvimento-do-pais-diz-marina-na-cop29>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA).** Brasil entrega à ONU nova NDC alinhada ao Acordo de Paris. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO (MIDAGRI).** Panorama nacional e internacional del mercado de fertilizantes. MIDAGRI, 2022. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3928585/Panorama%20nacional%20e%20internacional%20del%20mercado%20de%20fertilizantes.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE.** Principales características del motor de cálculo de Costo Nivelado de Producción de Hidrógeno (LCOH). Ministerio de Energía de Chile, abr. 2024. Disponible en: <https://hidrogenorenovableenc.exploradorenergia.cl/wp-content/uploads/2024/04/Motor-Calculo-LCOH-Principales-Caracteristicas-20240411.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO FEDERAL DE ECONOMÍA Y PROTECCIÓN DEL CLIMA DE ALEMANIA (BMWK).** Sitio web oficial. Disponible en: <https://www.bmwk.de/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL PERÚ.** Balance Nacional de Energía 2022. Gobierno del Perú, 15 may. 2024. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5575775-balance-nacional-de-energia-2022>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM).** Evaluación del potencial hidroeléctrico nacional: introducción y resumen. MINEM, 1978. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5303969/4760186-introduccion-y-resumen.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM).** Evaluación del potencial hidroeléctrico nacional. MINEM, 1979. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4760186-evaluacion-del-potencial-hidroelectrico-nacional>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM).** Introducción y resumen: Evaluación del potencial hidroeléctrico nacional. MINEM, 1979. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5303969/4760186-introduccion-y-resumen.pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM).** Atlas del potencial hidroeléctrico del Perú. MINEM, 2011. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/468443857/Atlas-del-potencial-hidroelectrico-del-Peru-pdf>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE.** Estudio para definir esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de hidrógeno verde en Chile. Ministerio de Energía de Chile, 2020. Disponible en: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estudio\\_para\\_definir\\_esquemas\\_de\\_financiamiento\\_para\\_acelerar\\_ia\\_adopcion\\_tecnologica\\_e\\_implementacion\\_de\\_proyectos\\_de\\_genera.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estudio_para_definir_esquemas_de_financiamiento_para_acelerar_ia_adopcion_tecnologica_e_implementacion_de_proyectos_de_genera.pdf). Acceso en: 6 mar. 2025.

**MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE.** Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030. Ministerio de Energía de Chile, 2023. Disponible en: <https://www.planhidrogenoverde.cl/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MOQUEGUA CRECE; H2 Perú.** Estudio confirma competitividad a nivel mundial de un valle del hidrógeno verde en el sur de Perú. H2LAC, 28 jun. 2023. Disponible en: <https://h2lac.org/noticias/estudio-confirma-competitividad-a-nivel-mundial-de-un-valle-del-hidrogeno-verde-en-el-sur-de-peru/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**MORDOR INTELLIGENCE.** Análisis de participación y tamaño del mercado de energía eólica en Perú. Mordor Intelligence, 2024. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/peru-wind-energy-market>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**MUNICH BUSINESS SCHOOL.** CapEx: Definición y cálculo | CapEx vs OpEx. Munich Business School, 2025. Disponible en: <https://www.munich-business-school.de/es/l/diccionario-de-estudios-empresariales/capex>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**OLADE (Organización Latinoamericana de Energía).** Atlas Eólico del Perú. Lima: OLADE, 2003. Disponible en: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>. Acceso en:

16 set. 2024.

**ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU).** Acordo de Paris. Disponível em: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL COMERCIO (OMC).** El hidrógeno verde: oportunidades para el comercio. OMC, 2022. Disponible en: [https://www.wto.org/spanish/res\\_s/publications\\_s/green\\_hydrogen\\_s.htm](https://www.wto.org/spanish/res_s/publications_s/green_hydrogen_s.htm). Acesso em: 4 mar. 2025.

**ORGANISMO SUPERVISOR DE LA INVERSIÓN EN ENERGÍA Y MINERÍA (Osinergmin).** Pliegos tarifarios de electricidad. Osinergmin, 2025. Disponible en: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/pliegos-tarifarios/electricidad>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**OSINERGMIN.** Pliegos tarifarios aplicables al cliente final. Osinergmin, 2025. Disponible en: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/pliegos-tarifarios/electricidad/pliegos-tarifarios-cliente-final>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC).** Relatório do IPCC 2023. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy\\_of\\_IPCC\\_Longer\\_Report\\_2023\\_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf). Acesso em: 28 fev. 2025.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC).** Sumário para formuladores de políticas. Grupo de Trabalho I – Sexto Relatório de Avaliação. 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf). Acesso em: 28 fev. 2025.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC).** Relatório do IPCC 2023. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy\\_of\\_IPCC\\_Longer\\_Report\\_2023\\_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf). Acesso em: 28 fev. 2025.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC).** Sumário para formuladores de políticas. Grupo de Trabalho I – Sexto Relatório de Avaliação. 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf). Acesso em: 26 fev. 2025.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC).** Página oficial em espanhol. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**PERÚ ENERGÍA.** Piura y Lambayeque son las regiones del norte peruano con mayor potencial eólico y solar. PERÚ ENERGÍA, 22 nov. 2024. Disponible en: <https://peruenergia.com.pe/piura-y-lambayeque-son-las-regiones-del-norte-peruano-con-mayor-potencial-eolico-y-solar/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**PERÚ.** Ley n.º 1002, de 2008. Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables. Osinergmin, 2008. Disponível em: <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/733891-1002>. Acesso em: 16 set. 2024.

**PERÚ.** Ley n.º 28611, de 2005. Ley General del Ambiente. Ministerio del Ambiente (MINAM),

2005. Disponível em: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

**PERÚ.** Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos. Diario Oficial El Peruano, Lima, 31 mar. 2009. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-29338.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.

**PERÚ.** Ley n.º 31872, de 2024. Ley de Fomento del Hidrógeno Verde. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), 2024. Disponível em: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-fomento-hidrogeno-verde>. Acesso em: 16 set. 2024.

**PERÚ. Ministerio del Ambiente (MINAM).** Acuerdo de París. Disponível em: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/306193-acuerdo-de-paris>. Acesso em: 16 set. 2024.

**PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA.** Presidente Lula sanciona lei que cria o mercado regulado de carbono no Brasil. Planalto, 12 dez. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/es/ultimas-noticias/2024/12/el-presidente-lula-sanciona-una-ley-que-crea-el-mercado-regulado-de-carbono-en-brasil>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA.** Presidente Lula apresenta a Política Nacional de Transição Energética, com expectativa de atrair R\$ 2 trilhões. Planalto, 26 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/es/ultimas-noticias/2024/08/el-presidente-lula-presenta-la-politica-nacional-de-transicion-energetica-con-la-que-se-espera-atraer-brl-2-billones>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**RYSTAD ENERGY.** Chile's Hydrogen Vision: Evaluating Plans Amid Ambitious Roadmap Targets. Disponível em: <https://www.rystadenergy.com/insights/chile-s-hydrogen-vision-evaluating-plans-amid-ambitious-roadmap-targets>. Acesso em: 16 set. 2024.

**REMESSAONLINE. CAPEX E OPEX,** Remessa Online, Disponible en: <https://www.remissaonline.com.br/blog/capex-e-opex/#:~:text=CAPEX%20significa%20Capital%20Expenditure%20e,controle%20s%C3%A3o%20as%20despesas%20operacionais.>,>2021>.

**RIVERA, V. G. A.** El hidrógeno como fuente alterna de energía, Centro De Investigación Y De Estudios Avanzados Del Instituto Politécnico Nacional Unidad Zacatenco, 2016.

**ROBLES VILCA, Álvaro.** Hidrógeno verde: ¿un nuevo combustible para los peruanos? Centro de Innovación y Desarrollo Emprendedor (CIDE-PUCP), 25 sep. 2023. Disponible en: <https://cide.pucp.edu.pe/definicion-y-beneficios-del-hidrogeno-verde-en-el-peru/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

**RUMBOMINERO.** Conoce como estaría implementado el primer camión minero de hidrógeno del mundo, Rumbo Minero Internacional, Su mejor herramienta de negocios en América, 2020. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/conoce-como-estaria-implementado-el-primer-camion-minero-de-hidrogeno-del-mundo/>>.

**SANTIVÁÑEZ, R.** Integração do hidrogênio verde no Peru. 2024. Disponível em: <https://santivanez.com.pe/wp-content/uploads/2024/08/3.-Integracion-del-hidrogeno-verde-en-el-Peru.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2025.

**SECAS, H. H.** Estudio, Diseño y Construcción de un Generado de Hidrogeno por Electrólisis. Estudio, Diseño y Construcción de un Generado de Hidrogeno por Electrólisis, Ingeniería Técnica Naval en Propulsión y Servicios del Buque, 2012.

**SEI.** Evaluación de los impactos del cambio climático en la hidrología de montaña: desarrollo de una metodología a través de un estudio de caso en los Andes del Perú. Stockholm Environment Institute, 2012. Disponible en: [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-ancash/archivos/public/docs/19\\_evaluacion-de-impactos-del-cambio-climatico-en-hidrologia-de-monta-a.pdf](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-ancash/archivos/public/docs/19_evaluacion-de-impactos-del-cambio-climatico-en-hidrologia-de-monta-a.pdf). Acceso en: 4 mar. 2025.

**SENAMHI.** Atlas de Radiación Solar del Perú. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2003. Disponible en: [https://www.senamhi.gob.pe/pdf/Atlas%20\\_de\\_Radiacion\\_Solar.pdf](https://www.senamhi.gob.pe/pdf/Atlas%20_de_Radiacion_Solar.pdf). Acceso em: 16 set. 2024.

**SIEMENS ENERGY.** Power-to-X: Climate-neutral sector coupling. Siemens Energy. Disponible en: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/solutions-usecase/hydrogen.html>. Acceso en: 6 mar. 2025.

**SIGAL, A.** Abriendo los cuellos de botella de la economía del hidrógeno. Estudios de Almacenamiento y Factibilidad, Facultad de Matemática, Astronomía y Física Universidad Nacional de Córdoba, 2015.

**SOARES, Maria Raquel de Vasconcelos Gomes.** Lei nº 14.948/2024: hidrogênio como potencial instrumento para sustentabilidade no Brasil. LACLIMA, 29 out. 2024. Disponible em: <https://laclima.org/lei-no-14-948-2024-hidrogenio-como-potencial-instrumento-para-sustentabilidade-no-brasil/>. Acceso em: 4 mar. 2025.

**SUNAT.** Pagos y garantías. SUNAT, 2025. Disponible en: <https://www.sunat.gob.pe/orientacionaduanera/pagosgarantias/index.html>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**SWI SWISSINFO.CH.** La brasileña Vale planea usar hidrógeno verde para producir acero de bajo carbono. SWI Swissinfo.ch, 12 sept. 2024. Disponible en: <https://www.swissinfo.ch/spa/la-brasile%C3%B1a-vale-planea-usar-hidr%C3%B3geno-verde-para-producir-acero-de-bajo-carbono/87655088>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**TOPSOE.** Levelized cost of blue hydrogen. Topsoe, 2024. Disponible en: <https://www.topsoe.com/blue-hydrogen/levelized-cost>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**TOPSOE.** *Levelized cost of hydrogen (LCoH)*. Disponible em: <https://www.topsoe.com/blue-hydrogen/levelized-cost>. Acceso em: 11 abr. 2025.

**TRACTIAN.** Calculadora ROI: descubre qué es y cómo utilizarla para la industria. *Disponível em: <https://tractian.com/es/blog/calculadora-roi-descubre-que-es-y-como-utilizarla-para-la-industria>. Acesso em: 11 abr. 2025.*

**URUGUAY XXI.** Uruguay está entre los 10 países top del mundo en iniciativas de energías renovables. Uruguay XXI, 2024. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/uruguay-esta-entre-los-10-paises-top-del-mundo-en-iniciativas-de-energias-renovables/>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**VASQUEZ, Claudia; STEINBUKS, Jevgenijs; ESTEVEZ, Roberto.** Del potencial a la acción: la eficiencia energética en América Latina. Banco Mundial, 28 sep. 2023. Disponible en:

<https://blogs.worldbank.org/es/energy/del-potencial-la-accion-la-eficiencia-energetica-en-america-latina>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**VEGA FERRER**, Martin Gonzalo. Evaluación del potencial del hidrógeno verde en el sector energético peruano: oportunidades y desafíos. 2024. Tesis (Maestría en Gestión de la Energía) – Universidad ESAN, Lima. Disponible en: <https://repositorio.esan.edu.pe/items/0bb3902c-3fe6-46f1-8420-f7659b5e6e9a>. Acceso en: 13 ago. 2024.

**WÄRTSILÄ**. The feasibility of power-to-X fuels for power generation. 2024. Disponible en: <https://www.wartsila.com/energy/sustainable-fuels/the-feasibility-of-power-to-x-fuels-for-power-generation> Acceso en: 8 mar. 2025.

**Wikipedia**. Energías renovables en América Latina. Wikipedia, la enciclopedia libre. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADas\\_renovables\\_en\\_Am%C3%A9rica\\_Latina](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADas_renovables_en_Am%C3%A9rica_Latina). Acceso en: 4 mar. 2025.

**WORLD ECONOMIC FORUM**. Brasil y Chile lideran la transición energética en América Latina. Disponible en: <https://es.weforum.org/agenda/2024/07/brasil-y-chile-lideran-la-transicion-energetica-en-america-latina/>. Acceso en: 11 ago. 2024.

**XINHUA**. Presidente de Brasil sanciona ley que regula producción de hidrógeno verde. Agencia Xinhua, 3 ago. 2024. Disponible en: <https://spanish.xinhuanet.com/20240803/6618bc331ff84524b4bf13596defecee/c.html>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**XINHUA**. Gobierno de Perú destaca en Brasil inversiones para desarrollo del hidrógeno verde. Agencia Xinhua, 25 sep. 2024. Disponible en: <https://spanish.news.cn/20240926/e897cb686d0a46e1848b9c373aa6a4d4/c.html>. Acceso en: 4 mar. 2025.

**ZERO CARBON ANALYTICS**. Latin American successes in the energy transition. Zero Carbon Analytics, oct. 2023. Disponible en: [https://zerocarbon-analytics.org/wp-content/uploads/2023/10/23-10\\_Latin-American-Successes-in-the-energy-transition\\_zca.pdf](https://zerocarbon-analytics.org/wp-content/uploads/2023/10/23-10_Latin-American-Successes-in-the-energy-transition_zca.pdf).