

Estrategia Nacional para la Economía de Hidrógeno Verde en Paraguay



GOBIERNO DEL
PARAGUAY | PARAGUÁI
REKUÁI



Estrategia Nacional para la Economía de Hidrógeno Verde en Paraguay

FICHA TÉCNICA

Publicado por:

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC)
Viceministerio de Minas y Energía
(VMME) Banco Interamericano de
Desarrollo (BID) Año de publicación:
2025

Autores:

Alberto González-Salas Mosquera, Deloitte Strategy, Risk & Transactions, S.L.U.
Noé Augusto Afonso Pérez, Deloitte Strategy, Risk & Transactions, S.L.U.
Jaime Sanchez-Blanco Boyer, Deloitte Strategy, Risk & Transactions, S.L.U.

Revisión:

Gustavo Cazal, Director DEA (VMME)
Veronica R. Prado, Especialista del sector ENE. BID Representación de Paraguay
Sergio Arguello, División de Energía (ENE). BID Representación de Paraguay

Este documento se elaboró en el marco de la consultoría sobre “Catalizando la economía del Hidrógeno Verde en Paraguay”, que tuvo como objetivo general apoyar a Paraguay en la promoción de la tecnología de hidrógeno verde para mejorar la productividad y la resiliencia del país con un enfoque en la innovación.

Las opiniones expresadas en esta publicación son las de su autor, y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

RECONOCIMIENTO

Este documento no hubiera sido posible sin la interacción de un gran número de organizaciones e instituciones públicas y privadas, empresas del sector productivo y academia.

Finalmente, se agradece en particular al BID y a los profesionales del VMME, quienes estuvieron auxiliando permanentemente el proceso y facilitando las acciones operativas para la adecuada recopilación de información.

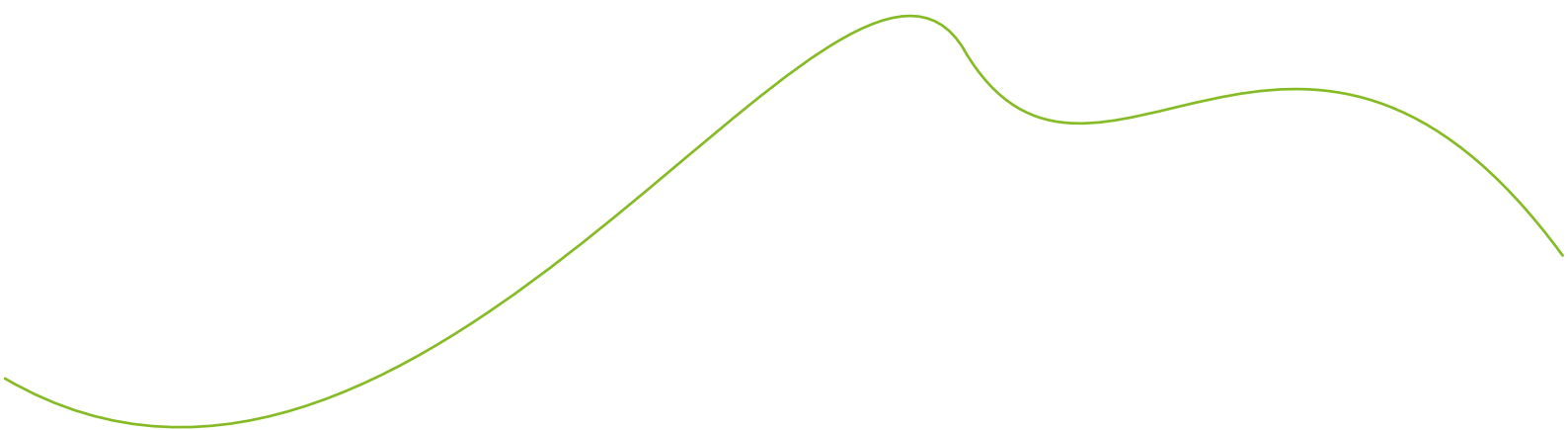
AGRADECIMIENTOS

Este documento forma parte de los esfuerzos del Viceministerio de Minas y Energía (VMME) del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de la República del Paraguay para promover el desarrollo sostenible del sector energético nacional. En el marco de su agenda estratégica, el Viceministerio impulsa iniciativas orientadas a la diversificación de la matriz energética, la innovación tecnológica y la transición hacia fuentes limpias y renovables. Esta publicación busca aportar conocimiento técnico, orientar la toma de decisiones y fortalecer las capacidades de los actores públicos y privados involucrados en el desarrollo del hidrógeno verde como vector clave para la descarbonización y la competitividad energética del país.

El Viceministerio agradece especialmente la colaboración de representantes del sector académico, técnicos del sector público y privado, así como de organismos nacionales e internacionales, cuyo compromiso y aporte han sido fundamentales para la elaboración de este estudio. Su participación y visión compartida han contribuido significativamente a enriquecer el análisis y a consolidar una estrategia ambiciosa para el desarrollo del hidrógeno verde en Paraguay.

El informe fue elaborado bajo la dirección de Mauricio Bejarano (Viceministro de Minas y Energía). Los líderes del equipo de trabajo son Gustavo Cazal, Director DEA (VMME), Veronica R. Prado (BID), y como miembro del equipo Sergio Andres Arguello (BID). Los principales autores del informe son Alberto González-Salas Mosquera, Noé Augusto Afonso Pérez, Jaime Sanchez-Blanco Boyer de Deloitte Strategy, Risk & Transactions, S.L.U. El equipo valora los comentarios y revisión de Christiaan Gischler, Matilde del Pilar Urquiza y Eric Fernando Boeck Daza del Banco Interamericano de Desarrollo. Adicionalmente, los editores y autores agradecen a Adela Martinez por el diseño de la publicación. El equipo agradece el apoyo financiero de los Fondos de la JSF - Fondo Especial de Japón del BID a través de la Cooperación Técnica “Catalizando la economía del Hidrógeno Verde en Paraguay” (ATN/JF-19891-PR—PR-T1320) y fondos de la MSC - Fondo Fiduciario Multidonante para la Energía Sostenible y Cambios de Clima, a través de la cooperación técnica “Una facilidad financiera de hidrógeno verde para acelerar la descarbonización de América Latina y el Caribe mediante la recuperación verde” (ATN/MC-18949-RG – RG-T3904).

Estrategia Nacional para la Economía de Hidrógeno Verde en Paraguay





Prólogo del Viceministro de Minas y Energía (VMME)

En un mundo que avanza con determinación hacia la descarbonización y la sostenibilidad, Paraguay se posiciona con firmeza como un actor estratégico en la transición energética global. Nuestra matriz eléctrica 100% renovable, basada en recursos hidroeléctricos abundantes y competitivos, nos otorga una ventaja única para liderar el desarrollo de una economía del hidrógeno verde.

La presente **Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay** representa un hito fundamental en nuestra visión de futuro. Este documento no solo traza una estrategia nacional integral para el despliegue del hidrógeno verde en el país, sino que también refleja el compromiso del Gobierno Nacional con un modelo de desarrollo económico sostenible, inclusivo y resiliente. A través de seis pilares estratégicos, 20 líneas de acción y 55 medidas concretas, la Estrategia propone un marco integral para transformar nuestras capacidades energéticas en oportunidades industriales, logísticas y tecnológicas.

El hidrógeno verde permitirá a Paraguay diversificar su matriz productiva, reducir su dependencia de combustibles fósiles importados, y generar nuevas industrias como la de fertilizantes verdes, con alto valor agregado y demanda creciente en mercados regionales e internacionales. Asimismo, abre la puerta a la descarbonización del transporte pesado y fluvial, y al fortalecimiento de nuestra seguridad energética.

Quiero expresar un especial agradecimiento al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), cuyo acompañamiento técnico y estratégico fue clave en la elaboración de esta Estrategia. Su participación en las discusiones conceptuales, el análisis técnico y el diseño de propuestas, junto con el respaldo financiero a través de cooperación técnica, ha sido fundamental para consolidar una visión robusta, realista y alineada con las mejores prácticas internacionales.

Este esfuerzo ha sido posible gracias al trabajo coordinado entre instituciones públicas, sector privado, academia y cooperación internacional. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Invito a todos los actores nacionales e internacionales a sumarse a este desafío transformador. Paraguay está listo para convertirse en un referente regional en hidrógeno verde. Esta Estrategia es nuestra plataforma de acción nacional para lograrlo.

Mauricio Bejarano

Viceministro de Minas y Energía
República del Paraguay

Resumen ejecutivo

En junio de 2021, el Gobierno de Paraguay identificó al hidrógeno verde como un **vector energético estratégico para el desarrollo del país**. A través del Viceministerio de Minas y Energía (VMME), con una amplia participación de las principales instituciones nacionales y agentes internacionales, se elaboró y presentó el estudio titulado *"Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay"*. Este documento destacó la **gran oportunidad que supondría para Paraguay desarrollar de forma ordenada y equilibrada el ecosistema del hidrógeno verde**, y, de esta forma, aprovechar la tendencia global hacia economías más descarbonizadas, con una creciente demanda de hidrógeno verde.

Paraguay cuenta con unas condiciones óptimas para la producción de hidrógeno verde, gracias a sus abundantes recursos renovables e hídricos los costos de producción de hidrógeno verde pueden ser altamente competitivos en relación con otros países de la región.¹

Para el año 2025, se estima que el costo nivelado del hidrógeno verde (LCOH) en Paraguay estará entre 1.9 y 4.8 USD por kg H₂. Para el 2030, se espera que este rango se reduzca a entre 1.5 y 3.1 USD por kg H₂, y para el 2050, los costos podrían oscilar entre 1.2 y 2.2 USD por kg H₂.

No obstante, **la principal ventaja competitiva de Paraguay radica en la disponibilidad inmediata de generación eléctrica renovable ya desarrollada**. Paraguay dispone de una generación eléctrica completamente renovable, proveniente principalmente de sus grandes centrales hidroeléctricas (Itaipú, Yacyretá y Acaray). Este acceso inmediato a electricidad renovable, a un costo altamente competitivo, le permite fijar metas y objetivos realistas y alcanzables en un plazo próximo, y posiciona a Paraguay en una situación ventajosa para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde.

No obstante, el desarrollo del hidrógeno verde presenta también grandes desafíos a los que Paraguay debe dar respuesta.

¹ Los LCOH anunciados por otros países comparables en la región de Latinoamérica oscilan en rangos de entre 1.2 y 4.8 USD por kg H₂ para el año 2030, y de entre 0.8 y 2.9 USD por kg H₂ para el año 2050.



Ilustración I- Principales fortalezas y desafíos de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay²

Una de las claves de esta Estrategia ha sido definir el posicionamiento estratégico de Paraguay en los mercados internacionales. Dado que el país enfrenta limitaciones significativas para poder exportar hidrógeno verde o sus derivados, debido a la falta de acceso directo al mar, y la ausencia de infraestructuras apropiadas y tecnología competitiva, la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay ha centrado sus esfuerzos en **identificar usos finales del hidrógeno con mayor madurez tecnológica y una demanda creciente en los mercados internacionales**.

Para ello, la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay contempla la **creación de hubs industriales que utilicen el hidrógeno verde y sus derivados como materia prima para la producción de nuevos productos verdes, como los fertilizantes verdes**, en zonas próximas a la producción de hidrógeno verde. Este enfoque facilita su exportación, superando así los retos logísticos actuales asociados con el transporte o almacenamiento del hidrógeno o sus derivados. Este enfoque no solo permitirá aprovechar de manera eficiente el hidrógeno verde nacional producido, sino que también abre nuevas posibilidades para la diversificación industrial del país. Además, este desarrollo industrial y de mercados basado en hidrógeno verde, permite establecer las bases para futuras aplicaciones alternativas del hidrógeno verde, como el transporte o una futura transformación de la industria nacional.

² Las zonas identificadas en el mapa representan áreas con un alto potencial para convertirse en hubs estratégicos de hidrógeno verde en Paraguay. Estas zonas han sido seleccionadas tras un exhaustivo análisis que considera la disponibilidad de recursos hídricos, el acceso a energía renovable, la infraestructura eléctrica existente y las rutas logísticas para facilitar tanto el consumo interno como la exportación. Cada área refleja la convergencia de estos factores, lo que les permite ofrecer condiciones óptimas para la instalación de electrolizadores y la creación de una red eficiente de producción de hidrógeno verde.

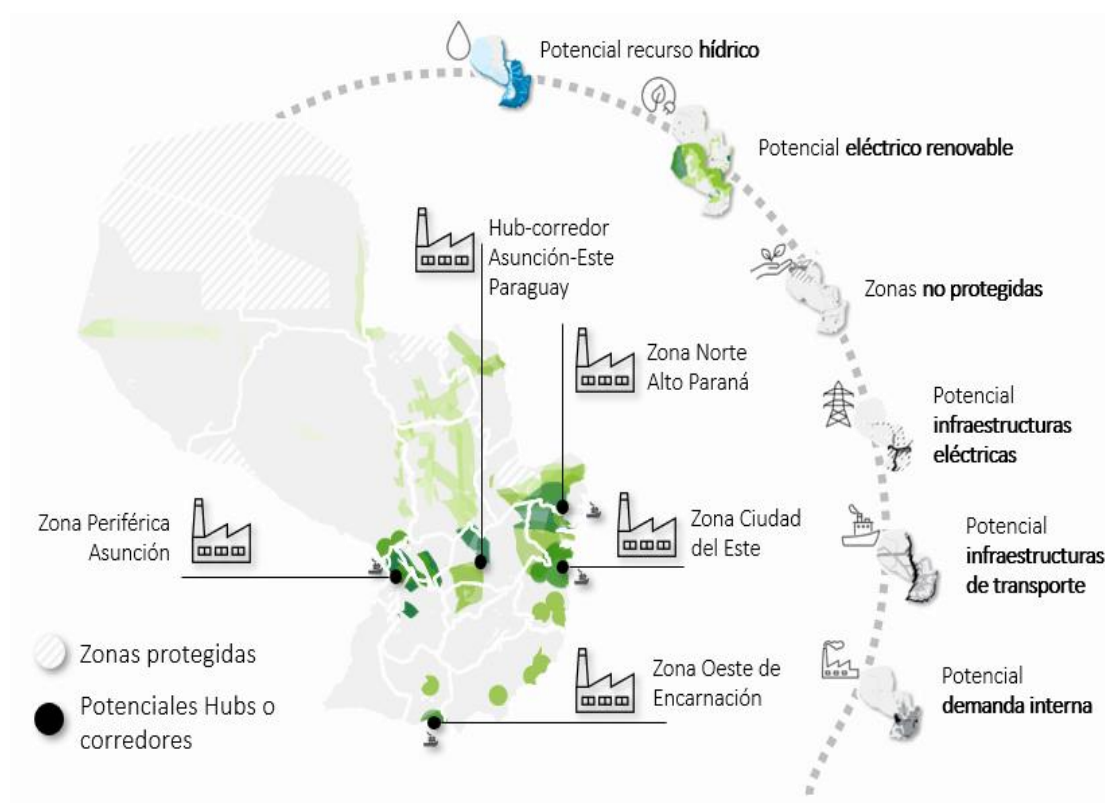


Ilustración II- Mapa ilustrativo de ubicaciones óptimas para hubs o corredores de hidrógeno verde

De esta forma, **el desarrollo de este ecosistema permitirá acelerar el desarrollo y fortalecer la resiliencia de Paraguay**, en un contexto internacional cada vez más incierto. Permitirá alcanzar una matriz energética más diversa, resiliente y competitiva, con una mayor integración de generación eléctrica renovable y una reducción de la dependencia exterior de combustibles fósiles importados. Además, acelerará el proceso de industrialización del país, con la incorporación en Paraguay de industria estratégica en la economía internacional, como es la producción de fertilizantes, con gran potencial para impulsar el crecimiento económico de Paraguay, la creación de nuevos empleos y el desarrollo de nuevas capacidades locales, además de reducir, a su vez, la alta dependencia exterior de determinados productos químicos.

Aunque muchas de las principales economías del mundo ya han anunciado sus estrategias en torno al hidrógeno, algunas de ellas con avances significativos, **la evolución de este mercado a nivel global sigue siendo incierta**. Faltan todavía señales claras que permitan establecer criterios de actuación claros a los agentes que están llamados a desarrollar estos mercados. En este contexto, **la estrategia de Paraguay adopta un enfoque gradual**, diseñado para crear un entorno favorable para la inversión, pero de forma ordenada y adaptativa, que promueva, a su vez, el crecimiento económico y la competitividad de Paraguay, al tiempo que reduce las necesidades iniciales de inversión. En este sentido, **atendiendo a la madurez tecnológica y la demanda internacional creciente se priorizan los siguientes usos:**



Ilustración III - Oportunidades de uso del hidrógeno verde en Paraguay identificadas en la Estrategia.

Para el Gobierno de Paraguay, es esencial que los beneficios derivados del desarrollo del ecosistema del hidrógeno verde se trasladen a la economía y sociedad paraguaya, con nuevos empleos, capacidades, infraestructuras, crecimiento económico y mayor autonomía estratégica para Paraguay, salvaguardando los recursos del país, el acceso eléctrico, la disponibilidad de agua, la seguridad o cualquier otro aspecto que pueda verse alterado por este desarrollo. Para garantizar este enfoque, la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay desarrolla un amplio catálogo de medidas que permitirán estructurar un **Marco Regulatorio robusto que aporta las garantías necesarias para un desarrollo ordenado, equilibrado y gradual**



Ilustración IV - Esquema ilustrativo de los objetivos de la Estrategia.

La Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay prevé seis pilares fundamentales, estructurados en 19 líneas de acción y 55 medidas específicas. Los pilares en los que se agrupan las medidas y las líneas de acción, abarcan ámbitos clave como la producción de hidrógeno verde, la generación renovable eléctrica, el acceso a la red eléctrica, el uso del agua para la producción de hidrógeno verde, la infraestructura, la logística, la seguridad, los usos finales y las aplicaciones del hidrógeno verde, y un conjunto de elementos transversales en torno a la regulación, estandarización y armonización, capacidades, difusión, sensibilización y gobernanza.



La Estrategia da respuesta a un horizonte temporal amplio con medidas de aplicación inmediata y medidas a más largo plazo

6 PILARES

19 LÍNEAS DE ACCIÓN

55 MEDIDAS

PILAR



PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO COMO ACTIVIDAD INDUSTRIAL

2

LÍNEAS DE ACCIÓN



4

MEDIDAS

PILAR



GENERACIÓN RENOVABLE Y ACCESO A LA RED ELÉCTRICA

3

LÍNEAS DE ACCIÓN



9

MEDIDAS

PILAR



USO DE AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

2

LÍNEAS DE ACCIÓN



6

MEDIDAS

PILAR



INFRAESTRUCTURA, LOGÍSTICA Y SEGURIDAD

2

LÍNEAS DE ACCIÓN



4

MEDIDAS

PILAR



USOS FINALES Y APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

2

LÍNEAS DE ACCIÓN



6

MEDIDAS

PILAR



ELEMENTOS TRANSVERSALES

8

LÍNEAS DE ACCIÓN



26

MEDIDAS

Ilustración V - Agrupación de medidas y líneas de acción en los pilares de la Estrategia.

La Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay prevé el desarrollo de estas medidas de forma progresiva, diferenciando entre medidas de aplicación de forma inmediata, a otras de

aplicación en el corto, medio o largo plazo. En este sentido, medidas esenciales como la definición de la definición de la producción de hidrógeno como actividad industrial, la creación de un marco regulatorio específico que establezca requisitos documentales, garantías, y derechos de conexión al sistema eléctrico, la definición de tarifas eléctricas industriales o por uso del agua específicas para la producción de hidrógeno se proponen para un desarrollo inmediato.

La implementación de estas medidas de forma efectiva sólo será posible si se cuentan con recursos, capacidades y mecanismos específicos. Para ello se prevé la **dotación de las capacidades necesarias al Viceministerio de Minas y Energía y otras instituciones paraguayas clave**, la implementación de un **plan de gobernanza interinstitucional** que garantice una adecuada coordinación, un **plan de monitoreo** que permita medir los avances y la revisión de las medidas y acciones en caso de que sea necesario, además de un **plan de socialización** que permita trasladar de forma efectiva los objetivos y avances de la Estrategia al conjunto de la economía y sociedad paraguaya. Como resultado de la implementación de estas medidas, **la Estrategia prevé unas metas específicas para el año 2030 que reflejan el compromiso de Paraguay con el desarrollo del hidrógeno verde y su integración en la economía nacional, además de ofrecer una visión a 2050.**



1 GW de
potencia instalada
de electrolizadores



900 kton de
fertilizantes verdes
producidos al año



1 proyecto piloto de
barcazas de e-metanol
circulando por la Hidrovía



100 vehículos pesados para
el transporte de mercancías
de pila de combustible (FCVE)



2 proyectos piloto de
autobuses públicos
de pila de combustible (FCEV)



5-10 hidrogeneras
para vehículos de pila de
combustible (FCEV)



80-100% sustitución del
hidrógeno y amoníaco gris a verde
de consumos industriales



+1,000 Millones USD en
inversiones para proyectos
de la economía del hidrógeno verde

Ilustración VI - Metas de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2030.

Esta Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay es el resultado de una colaboración conjunta entre las principales instituciones públicas, agentes privados y la academia de Paraguay, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo, cuyas contribuciones han sido clave para su desarrollo. Las medidas propuestas han sido ampliamente consensuadas y respaldadas por un análisis exhaustivo, que garantiza su solidez técnica, viabilidad práctica y alineación con los objetivos estratégicos establecidos

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 CONTEXTO DEL HIDRÓGENO VERDE	15
1.2 EL HIDRÓGENO VERDE: UNA SOLUCIÓN VERSÁTIL.....	19
2. LA OPORTUNIDAD DEL HIDRÓGENO VERDE EN PARAGUAY	54
2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN PARAGUAY.....	54
2.2 USOS FINALES DEL HIDRÓGENO VERDE EN PARAGUAY	63
2.3 COMPETITIVIDAD Y PERSPECTIVAS DEL COSTO NIVELADO DE HIDRÓGENO VERDE (LCOH) EN PARAGUAY	71
3. OPORTUNIDADES Y OBJETIVOS.....	76
3.1 OPORTUNIDADES PARA PARAGUAY	76
3.2 PRINCIPALES DESAFÍOS PARA PARAGUAY	78
3.3 OBJETIVOS DE LA ESTRATEGIA	80
4. PILARES, LÍNEAS DE ACCIÓN Y MEDIDAS	84
4.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO COMO ACTIVIDAD INDUSTRIAL	85
4.2 GENERACIÓN RENOVABLE Y ACCESO A LA RED ELÉCTRICA	87
4.3 USO DE AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	93
4.4 INFRAESTRUCTURA, LOGÍSTICA Y SEGURIDAD	97
4.5 USOS FINALES Y APLICACIONES DEL HIDRÓGENO.....	100
4.6 ELEMENTOS TRANSVERSALES	104
5. PERSPECTIVA 2030-2050.....	118
5.1 METAS 2030	119
5.2 VISIÓN 2050	122
6. PROYECTOS PILOTO	126
7. ANEXOS.....	138
ANEXO I: RESUMEN DE LAS MEDIDAS DE LA ESTRATEGIA	138
ANEXO II: COSTOS NIVELADOS DEL HIDRÓGENO (LCOH)	145
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	150
ACRÓNIMOS	152
REFERENCIAS	154



1. Introducción

1.1 Contexto del hidrógeno verde

• Contexto global internacional

El hidrógeno verde es objeto de gran atención a nivel global, no sólo como elemento clave en la descarbonización de la economía y la transición energética, sino también como herramienta de desarrollo económico sostenible y creación de empleo de calidad en aquellas geografías que logren desarrollar su inversión. Su versatilidad, permite que pueda ser utilizado como materia prima en determinados procesos industriales o vector energético, capaz de descarbonizar procesos industriales y actividades económicas con emisiones difíciles de abatir, le aportan un potencial muy relevante frente otras alternativas que podrían no ser viables o superiores en costos.

A nivel global, existe una tendencia creciente en la implementación de estrategias enfocadas en el desarrollo de la economía del hidrógeno verde, considerado un componente potencial para la transición energética, la sostenibilidad ambiental, el desarrollo económico y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles exterior.

En este sentido, la conferencia sobre el cambio climático COP28³, celebrada en 2023, marcó un momento decisivo en los esfuerzos globales para abordar el cambio climático. Uno de los objetivos principales de esta conferencia ha sido evitar el progreso hacia el límite de calentamiento global de 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, un objetivo acordado en el Acuerdo de París en 2015.⁴ Para lograr este objetivo, se ha enfatizado la necesidad de eliminar gradualmente los combustibles fósiles y acelerar la transición a energías limpias provenientes de fuentes renovables, como el hidrógeno verde, lo que constituye la manera más efectiva de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en aquellas áreas donde los procesos productivos requieren el uso de combustibles fósiles, como por ejemplo en la producción de fertilizantes, o donde la electrificación no es posible o compleja, como es el caso del transporte pesado de mercancías.

³ (WWF (World Wide Fun for Nature), 2023) La COP28 ha resaltado la necesidad de una acción climática urgente y ambiciosa, destacando que, a pesar de algunos avances, el mundo aún está lejos de cumplir los objetivos del Acuerdo de París.

⁴ (Secretaría General de las Naciones Unidas, 2015)

La descarbonización ha sido identificada como una palanca principal en este proceso, impulsando la búsqueda de nuevas fuentes de energía alternativas como el hidrógeno verde.

En este contexto, numerosos países a nivel mundial, incluidos algunos de América Latina y el Caribe⁵, están adoptando el hidrógeno como vector energético del futuro, presentando estrategias, hojas de ruta o desarrollos normativos que apuntan a consolidar su uso y producción de manera sostenible. Estos planes y desarrollos destacan la relevancia del hidrógeno en la transición energética y su posicionamiento en los mercados regionales. El interés y la inversión en el hidrógeno verde están creciendo globalmente, consolidando su papel como un componente esencial en la matriz energética del futuro.

En el mismo sentido, en Europa, existen ambiciosos planes para la transición hacia un modelo energético descarbonizado y sostenible, que requerirá una generación de energía baja en carbono, especialmente en sectores contaminantes como el transporte, la construcción y las edificaciones y, muy especialmente, la industria intensiva en emisiones.⁶ El hidrógeno verde facilita el almacenamiento y distribución de energía, para su posterior uso. Si bien muchos países de la Unión Europea, entre lo que se incluyen España, Francia o Alemania, cuentan con importantes planes de inversión en la producción, distribución y almacenamiento de hidrógeno, necesitarán también importarlo debido a las ambiciosas previsiones de demanda que se presentan.

Algunos países de América Latina y el Caribe (ALC), como Argentina, Brasil, Chile y Uruguay, se posicionan como potenciales exportadores de hidrógeno verde y derivados para mercados internacionales, gracias a sus abundantes recursos naturales y costos competitivos, lo que resulta muy atractivo para la Unión Europea.

En América Latina y el Caribe (ALC), 16 países, entre ellos Paraguay, han acordado aumentar la participación de energías renovables para 2030, destacando la eliminación gradual de combustibles fósiles, a través de la iniciativa ReLAC⁷, con el objetivo de mejorar la resiliencia, competitividad y sostenibilidad del sector energético. Asimismo, una gran parte de los países de la región de ALC, destacando la participación de Paraguay, han suscrito la iniciativa CertHiLAC⁸, con el objeto de implementar un sistema regional de certificación de hidrógeno y sus derivados, cumpliendo con estándares internacionales y adaptándose a las características específicas de la región.

Este tipo de iniciativas refuerza el posicionamiento de los países de ALC en los mercados internacionales, destacando su capacidad como actores clave en la transición hacia una economía del hidrógeno verde.

La región tiene un potencial significativo para producir hidrógeno verde de manera competitiva debido a sus abundantes fuentes de energía renovable, como la solar, eólica e hidroeléctrica. Esto hace que ALC sea un pilar en la discusión global sobre la descarbonización y el desarrollo de

⁵ Entre los países de América Latina y el Caribe que cuentan con hojas de ruta o estrategias en hidrógeno se encuentran: Brasil (Ministério de Minas e Energia, 2021), Argentina (Secretaría de Asuntos Estratégicos, 2023), Uruguay (MIEM, 2022), Costa Rica (MINAE, 2022), Chile (Gobierno de Chile, 2020), Perú (H2 Perú, 2021), Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2022) y Ecuador (Ministerio de Minas y Energía, 2023), entre otras.

⁶ Entre los países europeos que han presentado ambiciosos planes para la transición energética se encuentran España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), 2020), Francia (France Hydrogène, 2021) (France Hydrogène, 2022) y Alemania (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020), entre otras.

⁷ (HUB de Energía, s.f.).

⁸ (Christiaan Gischler - Eric Daza, 2023).

mercados internacionales de hidrógeno verde. No obstante, el desarrollo de un ecosistema de hidrógeno consolidado requiere a los diferentes países afrontar importantes retos.

El acceso a energía renovable con costos competitivos es una palanca fundamental para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde en ALC, lo que les otorga un papel relevante en la producción global de hidrógeno verde. Sin embargo, para aprovechar plenamente este potencial, se requieren importantes inversiones en infraestructura que permita su producción, almacenamiento y transporte, además de un marco normativo y políticas que favorezcan el desarrollo ordenado y sostenible de este sector en los mercados nacionales e internacionales.

• Contexto nacional

Actualmente, Paraguay cuenta con una matriz de generación de electricidad completamente renovable con un costo altamente competitivo, además de contar con abundantes recursos naturales que factibilizan un futuro crecimiento en la capacidad de generación renovable nacional.

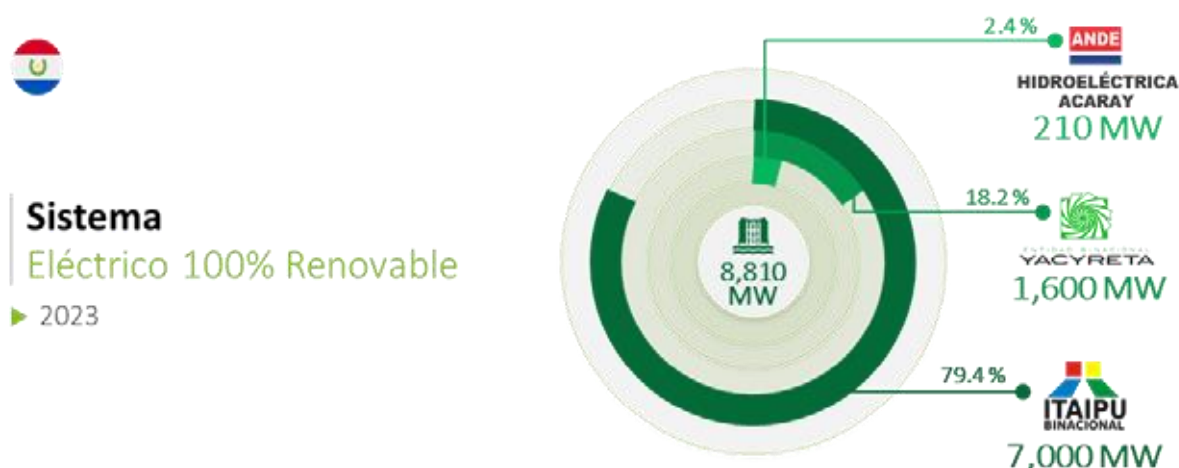


Ilustración 1 - Principales recursos eléctricos renovables en Paraguay⁹

El acceso en Paraguay a electricidad renovable ya disponible o derivada de nuevos desarrollos, con costos muy competitivos, convierte a Paraguay en un país con un gran potencial para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde.

Con la mirada puesta en un futuro donde el hidrógeno verde se presenta como una gran oportunidad para Paraguay, impulsada por la creciente demanda global de productos más sostenibles, el desarrollo de una estrategia y un entorno normativo robusto se vuelve fundamental

⁹ (Itaipú, 2023) (Yacyretá, 2023) (ANDE, 2009) Análisis propio.

para transformar el potencial de Paraguay en una ventaja competitiva real dentro de un ecosistema internacional del hidrógeno verde y derivados, aún en configuración.

En este escenario, Paraguay pretende definir las bases para garantizar el desarrollo de una economía del hidrógeno verde de manera ordenada y sostenible, aprovechando su ventaja competitiva en recursos hídricos y energías renovables, optimizando sus capacidades y su potencial para la producción de hidrógeno verde, y mejorando su posicionamiento en los mercados internacionales.¹⁰

Con objeto de configurar este nuevo ecosistema, el Gobierno de Paraguay a través del Viceministerio de Minas y Energía (VMME) presentó en 2021 su estudio *"Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay"*¹¹, que propone al hidrógeno verde como un vector energético clave para el desarrollo del sector energético del país, a partir de dos líneas de acción clave:

- **Línea de Acción 1:** Generar lineamientos estratégicos, marcos de política, regulación y capacidades institucionales y técnicas para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde, como un instrumento de transición energética y de mitigación del cambio climático.
- **Línea de Acción 2:** Instalar plantas piloto de producción de hidrógeno verde a partir de la electrólisis de agua con energía renovable para su utilización como vector energético y demostrar su viabilidad.

De forma complementaria, el anteproyecto de ley sobre hidrógeno¹² establece las bases para el desarrollo de un marco regulatorio para toda la cadena de valor del hidrógeno, desde su producción hasta su comercialización nacional o exportación, con el objetivo de promover un desarrollo ordenado y eficiente del sector del hidrógeno verde en Paraguay.

La presente Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay establece un nuevo avance para desarrollar una economía del hidrógeno en el país.

¹⁰ Paraguay se beneficia de su abundante recurso hídrico, infraestructuras hidroeléctricas sólidas y un gran potencial para ampliar su potencia instalada de energías renovables, lo que le otorga una ventaja competitiva en la producción de hidrógeno verde en comparación con otros países de la región. Esta combinación de recursos energéticos sostenibles y ubicaciones estratégicas para la instalación de electrolizadores favorece tanto la producción eficiente como la exportación de hidrógeno y sus derivados a mercados internacionales.

¹¹ (VMME, 2021).

¹² (Paraguay G. d., Anteproyecto de Ley que implementa el régimen jurídico de la producción, uso, almacenamiento, comercialización, distribución, transporte y exportación de hidrógeno, 2024).

1.2 El hidrógeno verde: una solución versátil

- **El hidrógeno verde emerge como un vector energético clave para Paraguay**

En respuesta a las crecientes exigencias internacionales para reducir las emisiones de carbono, especialmente en mercados clave como el europeo y el este asiático ¹³, Paraguay busca aprovechar esta oportunidad para consolidar su posición en la economía del hidrógeno verde. Producido a partir de fuentes renovables, el hidrógeno verde se posiciona como la principal alternativa a los combustibles fósiles en algunos sectores difíciles de electrificar o de descarbonizar, como es la industria y transporte pesado, además de la industria química, además de ofrecer un gran potencial como materia prima en aplicaciones industriales.

Esta Estrategia se ha desarrollado para posicionar a Paraguay como un agente relevante en la producción de hidrógeno verde y exportación de sus derivados y otros subproductos en la región, aprovechando su ventaja competitiva en recursos hídricos y energías renovables para responder a la demanda global de alternativas y productos sostenibles, estimulando el crecimiento económico, fomentando el desarrollo industrial y generando empleo sostenible.

El hidrógeno verde ofrece beneficios económicos y sociales relevantes. Entre ellos, permite diversificar las fuentes de energía del país, fomentando el desarrollo de nueva generación eléctrica a partir de fuentes renovables, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles importados y mejorando la seguridad energética. Su implementación de forma ordenada tendrá un impacto positivo en la economía, atrayendo nuevas inversiones y contribuyendo al desarrollo industrial, con impacto positivo en el PIB y la creación de empleo de calidad directo e indirecto, entre otros aspectos. Además, la introducción de nuevas tecnologías asociadas con el hidrógeno debe fomentar la innovación y el desarrollo de nuevas capacidades y habilidades locales.

La actual disponibilidad de energía hidroeléctrica en Paraguay permite un grado de producción de hidrógeno verde con un riesgo de interrumpibilidad bajo, frente a otras soluciones renovables con producción intermitente. Esto posiciona inicialmente al país como un productor ideal, además de abrir la puerta a futuros desarrollos de otras fuentes renovables, como la solar y la eólica, que complementen su matriz de generación eléctrica completamente renovable y permitan mantener esta competitividad.

¹³ Las políticas internacionales, como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM) de la Unión Europea (Europea, 2023) y los impuestos al carbono en diversas regiones, imponen restricciones a productos con altas emisiones de carbono. Estos marcos normativos favorecen la demanda de alternativas sostenibles, como el hidrógeno verde y productos derivados, que Paraguay puede ofrecer competitivamente gracias a su ventaja en energías renovables y recursos naturales.

El hidrógeno verde también tiene el potencial de reemplazar materias primas industriales y combustibles fósiles por alternativas sostenibles, marcando el inicio de una nueva era tecnológica para la electrificación del transporte y fomentar la movilidad sostenible. Además, entre otros usos industriales como la refinación de petróleo y la producción de acero, el hidrógeno se emplea en la producción de amoníaco para su posterior uso en la producción de fertilizantes, reemplazando así al hidrógeno gris de origen fósil utilizado anteriormente en este proceso.

Con esta Estrategia, Paraguay no sólo busca posicionarse para diversificar su matriz energética, sino que también se prepara para asumir un papel relevante en la región¹⁴ y a nivel internacional en la transición hacia una economía más limpia y sostenible.

- **Cadena de valor del hidrógeno verde**

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético.

Esto implica que su producción requiere de energía, que generalmente proviene de fuentes como el gas natural, la electrólisis del agua o la biomasa. Una vez producido, el hidrógeno puede almacenar grandes cantidades de energía¹⁵, pudiendo liberarse de manera controlada según la demanda. Esto lo convierte en un componente esencial para equilibrar la oferta y la demanda energética, facilitando el almacenamiento de energía renovable intermitente y proporcionando una fuente limpia y flexible para diversos usos, como el transporte, la generación de electricidad o diversas aplicaciones industriales como materia prima, como la producción de acero, de amoníaco o de e-metanol. Además, su alta densidad energética lo hace ideal para descarbonizar sectores que requieren mucha energía, donde la electricidad no es suficiente.

En este sentido, según la materia prima utilizada y las emisiones de CO₂ generadas en su producción, el hidrógeno puede clasificarse de diferente forma. Si bien no existe una taxonomía global que clasifique las tipologías de hidrógeno¹⁶, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) diferencia varias categorías¹⁷:

- **Hidrógeno gris:** Se genera a partir de gas natural u otros hidrocarburos mediante reformado con vapor (SMR, por sus siglas en inglés), y es el tipo de hidrógeno más común actualmente, aunque con un elevado impacto ambiental debido a sus emisiones de CO₂.

¹⁴ Mercados próximos donde Paraguay tiene un rol activo.

¹⁵ Aunque el hidrógeno es poco denso por volumen a temperatura ambiente, tiene una elevada densidad energética por kilogramo, conteniendo más energía que muchos otros combustibles.

¹⁶ Si bien no existe una taxonomía de aplicación global que clasifique las tipologías de hidrógeno, los colores asignados no forman parte de una taxonomía regulada; sin embargo, diferentes sistemas clasifican el hidrógeno en función de las emisiones de CO₂ por kilogramo, proporcionando una medida más precisa de su impacto ambiental. CertifHy en la Unión Europea establece un umbral de 36.4 gCO₂eq/MJH₂ para hidrógeno verde (CertifHy, 2021).

¹⁷ Además de estos, existen otras posibles clasificaciones de hidrógeno con impactos ambientales variados, como el hidrógeno negro o marrón, producido a partir de carbón, el hidrógeno rosa, producido con energía nuclear, y el hidrógeno amarillo, producido con electricidad de la red. (IEA, 2019) (Deloitte, 2021).

- **Hidrógeno azul**¹⁸: Se produce de manera similar al hidrógeno gris, pero con la aplicación de técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés), lo que reduce significativamente las emisiones de CO₂.
- **Hidrógeno verde**¹⁹: Se produce a partir de electricidad renovable utilizando agua mediante electrólisis. Alternativamente, en algunas ocasiones también puede derivarse del reformado del biogás o de la conversión bioquímica de la biomasa, siempre que ambos procesos estén certificados y cumplan con los estándares de sostenibilidad.

El enfoque de la presente Estrategia en el hidrógeno verde²⁰ se justifica por la capacidad hidroeléctrica constante de Paraguay, los precios competitivos de su electricidad renovable y la potencial producción de hidrógeno verde.

Además, este enfoque no solo podría descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte fluvial por la Hidrovía Paraguay-Paraná o el transporte de carga pesada, sino que también podría abrir oportunidades para nuevos desarrollos industriales, como la producción de fertilizantes verdes, que están ganando aceptación en los mercados internacionales.

Paraguay cuenta con una capacidad hidroeléctrica significativa que suministra el 100% de su electricidad de manera renovable, lo que le permitiría una producción prácticamente continua de hidrógeno verde, aprovechando su energía excedentaria generada durante las horas de menor demanda eléctrica a nivel nacional.

La combinación de la capacidad actual, con nuevos desarrollos renovables a partir de tecnología solar, eólica o nueva hidroeléctrica, permitiría a Paraguay mantener un precio competitivo de la electricidad renovable, además de garantizar un suministro eléctrico competitivo al resto de la demanda eléctrica del país, lo que ofrece una ventaja competitiva frente al hidrógeno azul y gris, especialmente en un contexto de volatilidad en los precios del gas natural.

Además, a diferencia del hidrógeno gris y azul, el hidrógeno verde se produce sin emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad. El hidrógeno verde también puede ayudar a descarbonizar sectores donde la electrificación no es viable o rentable, como el transporte fluvial por la Hidrovía Paraguay-Paraná o el transporte de carga pesada principalmente, extendiendo el uso de la energía renovable en la economía nacional. Por otra parte, Paraguay puede aprovechar el hidrógeno verde para fortalecer su industria nacional, como por ejemplo a partir de la producción de fertilizantes verdes o sostenibles²¹, reduciendo la dependencia de importaciones y posicionándose como un exportador competitivo en el mercado internacional.

¹⁸ Algunos países han planteado la utilización del hidrógeno azul como método de transición para convertir el hidrógeno gris existente en una versión con menores emisiones de CO₂ mediante técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS). No obstante, su potencial de descarbonización es menor que el considerado como hidrógeno verde.

¹⁹ (Deloitte, 2023).

²⁰ En este documento se utiliza el término “hidrógeno verde” para referirse al hidrógeno producido por electrólisis a partir de fuentes renovables como la hidroeléctrica, solar o eólica, en lugar de “hidrógeno renovable” o “hidrógeno limpio”.

²¹ El hidrógeno verde transformado en amoníaco verde es fundamental para fabricar fertilizantes verdes o sostenibles, lo que permitiría reducir la dependencia de las importaciones y mejorar la competitividad de la industria química paraguaya. Tradicionalmente, los fertilizantes como los NPK

Desarrollar una cadena de valor innovadora para el hidrógeno verde en Paraguay implica varias etapas, desde la producción hasta su uso final.

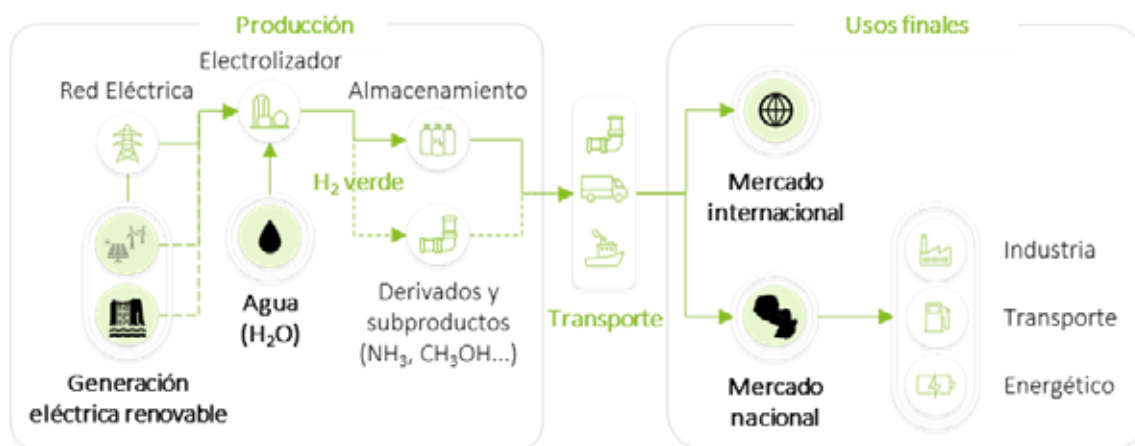


Ilustración 2 – Cadena de valor ilustrativa del hidrógeno verde²²

En este sentido, es necesario establecer infraestructuras eficientes para el transporte del hidrógeno desde los centros de producción a los puntos de consumo, integrándolo a los diversos usos finales industriales como la producción de fertilizantes y acero, de transporte pesado por carretera y fluvial, para reducir la dependencia de combustibles fósiles. Para ello, Paraguay debe abordar importantes inversiones estratégicas que permitan el desarrollo de la economía del hidrógeno verde.

Esta Estrategia permitirá satisfacer la demanda interna de energía limpia y crear oportunidades para la exportación de hidrógeno verde, derivados y otros productos verdes²³ a mercados internacionales, fortaleciendo la posición de Paraguay en la transición global hacia una economía baja en carbono, con menor dependencia internacional, y que contribuya al desarrollo económico y social del país.

• Producción de hidrógeno verde

La obtención de hidrógeno verde mediante electrólisis consiste en utilizar electricidad de fuentes renovables para descomponer el agua en sus componentes básicos: hidrógeno y oxígeno.

En este proceso, la electricidad pasa a través del agua en un dispositivo llamado electrolizador, que separa las moléculas de agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). El hidrógeno producido de esta manera es limpio y sostenible, ya que no genera emisiones de gases de efecto invernadero.

dependen del amoníaco, que se producía con hidrógeno gris y generaba emisiones de CO₂. Con el hidrógeno verde, estos nuevos fertilizantes verdes o sostenibles se podrán producir sin emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

²² Análisis propio.

²³ Esta Estrategia se refiere a productos verdes como aquellos que utilizan hidrógeno verde o derivados de éste en su producción, como por ejemplo los fertilizantes verdes, el acero verde o los combustibles sintéticos o e-fueles.

Existen varios tipos de electrolizadores utilizados en este proceso, cada uno con sus propias características y niveles de eficiencia²⁴:

- **Electrolizadores alcalinos** (AEL, por sus siglas en inglés): Funcionan utilizando una disolución alcalina, como el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH), como electrolito. En este tipo de electrolizador, el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno en presencia de electrodos sumergidos en la solución alcalina. Los AEL son los más utilizados en la producción de hidrógeno debido a su madurez tecnológica y rentabilidad económica. Han sido ampliamente adoptados por su robustez y larga vida útil. Sin embargo, una de sus limitaciones es la baja densidad de corriente que pueden manejar, afectando la eficiencia general del proceso.
- **Electrolizadores de Membrana de Intercambio de Aniones** (AEM, por sus siglas en inglés): Funcionan utilizando una membrana de intercambio aniónico como electrolito. Sin embargo, los AEM aún se encuentran en una etapa de desarrollo menos avanzada en comparación con los AEL, por lo que su tecnología está en proceso de optimización y prueba para alcanzar niveles de eficiencia y durabilidad comparables.
- **Electrolizadores de Membrana de Intercambio de Protones** (PEM, por sus siglas en inglés): Utilizan un polímero sólido como electrolito, específicamente una membrana de intercambio de protones. Este tipo de electrolizador es conocido por su alta eficiencia y su capacidad para adaptarse rápidamente a las fluctuaciones de energía, lo que lo hace ideal para integrarse con fuentes de energía renovable intermitente, como la solar y la eólica. A pesar de estas ventajas, los PEM enfrentan desafíos relacionados con los costos elevados debido al uso de metales preciosos como el platino en los electrodos, lo que encarece su fabricación y mantenimiento.
- **Electrolizadores de Óxido Sólido** (SOEC, por sus siglas en inglés): Utilizan materiales cerámicos como electrolito y operan a altas temperaturas, típicamente entre 700 y 1000 °C. Esta alta temperatura permite una mayor eficiencia en la conversión de energía eléctrica a hidrógeno. No obstante, los SOEC presentan desventajas significativas, como la necesidad de una mayor inversión inicial y un menor desarrollo tecnológico en comparación con otros tipos de electrolizadores como los AEL o los PEM. Su operación a altas temperaturas también plantea desafíos en términos de materiales y mantenimiento, aunque su alta eficiencia los hace prometedores para aplicaciones futuras.

La elección del tipo de electrolizador adecuado depende de las características del proyecto que se pretende desarrollar, que condicionarán la rentabilidad y sostenibilidad de la producción de hidrógeno verde esperada.

Aspectos como los costos de capital (CAPEX, por sus siglas en inglés) para la adquisición e instalación de electrolizadores o la eficiencia de estos tipos de electrolizadores son críticos en esta fase inicial.

En general, se espera que el CAPEX para la adquisición e instalación de electrolizadores disminuyan a medida que la tecnología madure y se produzca a mayor escala, lo cual beneficiará la viabilidad económica de la producción de hidrógeno verde en aquellos proyectos de mayor complejidad. Las reducciones en costos son más relevantes en tecnologías menos maduras como la SOEC (más de un 70% en 2030 y aproximadamente un 90% en 2050). Se esperan costos homogéneos para todas las tecnologías en el año 2050.

²⁴ Además, existen otros métodos de producción de hidrógeno verde, como la termólisis y los procesos fotoelectroquímicos, que aún están en fases tempranas de desarrollo tecnológico.

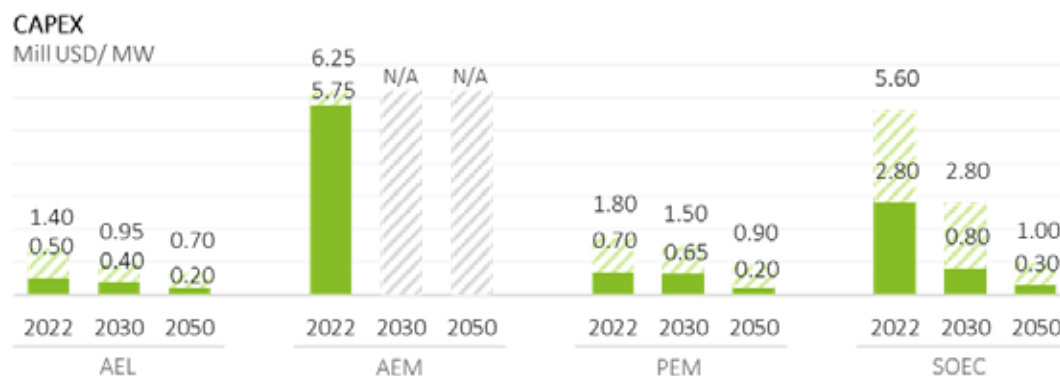


Ilustración 3 – Estimación de los costos de capital (CAPEX) para varios tipos de electrolizadores²⁵

Asimismo, en la medida que estos costos bajen, la eficiencia de los electrolizadores se vuelve aún más relevante, ya que los más eficientes producirán más hidrógeno por unidad de electricidad consumida, reduciendo así los costos operativos a largo plazo. En este sentido, en el año 2050 la tecnología SOEC alcanzará los mayores grados de competitividad y eficiencia. La solución tecnológica se adaptará a las necesidades técnicas de cada proyecto.

Eficiencias

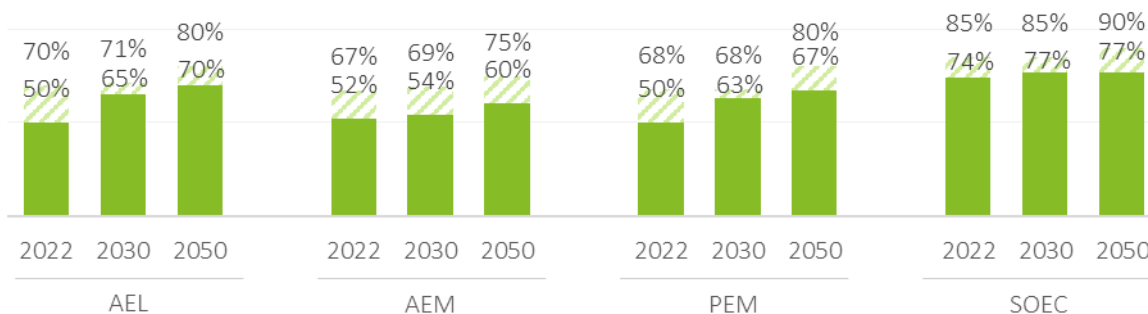


Ilustración 4 - Estimación de las eficiencias para varios tipos de electrolizadores²⁵

Cada tipo de electrolizador presenta ventajas y desventajas en términos de eficiencia, costos y adecuación a distintas fuentes de energía renovable.

Sin embargo, existen aspectos intrínsecos a la región donde se desarrollen los proyectos de hidrógeno verde que condicionarán en gran medida el costo de producción del hidrógeno verde. En este sentido, i) el costo de la electricidad renovable, por la intensidad de este proceso en energía eléctrica, condicionará el costo operativo del electrolizador, o ii) la tecnología o tipología de suministro eléctrico renovable al que tendrá acceso el electrolizador condicionará sus horas de funcionamiento, y por lo tanto la velocidad en la que se amortiza la inversión inicial.

²⁵ (IEA, 2019), (et, 2022) Análisis propio.

En regiones con abundante energía renovable, con precios competitivos, como es el caso de Paraguay, los costos operativos, con un peso relevante del costo eléctrico, son menores a los asociados con países con recursos renovables menos accesibles u otros costos de generación eléctrica superiores. Asimismo, Paraguay, con su capacidad hidroeléctrica constante, puede garantizar una producción continua y estable de hidrógeno verde, maximizando así el uso eficiente de diversas tecnologías de electrolizadores.²⁶

Para Paraguay, dada su abundante capacidad hidroeléctrica y el suministro continuo de energía renovable, se recomienda el uso de electrolizadores alcalinos (AEL), que ofrecen un equilibrio entre madurez tecnológica, costos relativamente bajos (CAPEX) y larga vida útil.

Además, los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) podrían ser una opción viable cuando se integre con fuentes renovables intermitentes, como la solar o eólica, debido a su capacidad de adaptarse a las fluctuaciones de energía.²⁷

• Almacenamiento y transporte de hidrógeno

El hidrógeno generado a partir de los procesos de producción anteriores puede encontrarse en diferentes estados. La elección del método más adecuado para su transporte y almacenamiento depende de varios factores, como la proximidad de los centros de producción a los mercados de consumo, el volumen de producción y consumo en cada punto, la complementariedad de los usos finales y la idoneidad para el acondicionamiento y uso en distintos tipos de consumos.

Además, actualmente el transporte y distribución del hidrógeno puro presentan desafíos logísticos²⁸ que pueden variar según la distancia a cubrir, la escala de las operaciones, la infraestructura de soporte y la normativa vigente, lo que precisa de importantes inversiones con altos costos.

La selección del método más conveniente requiere un análisis detallado que tenga en cuenta la infraestructura disponible, las capacidades logísticas del país y las normas de seguridad aplicables a la manipulación del hidrógeno. En el caso de Paraguay, su infraestructura fluvial a través de la Hidrovía Paraguay-Paraná podría ofrecer oportunidades para el transporte eficiente de hidrógeno y derivados hacia mercados internacionales, siempre que se desarrollen las infraestructuras necesarias para garantizar la seguridad y viabilidad del transporte a gran escala.

²⁶ Algunas tecnologías de electrolizadores, como la AEL, son menos eficientes ante cambios bruscos en el suministro de energía. No obstante, las condiciones de energía continua y constante en Paraguay permiten maximizar su rendimiento. Por otro lado, aunque los electrolizadores PEM son más adaptables a fluctuaciones energéticas que los AEL, también pueden funcionar igual o incluso mejor con un suministro de energía constante como ocurre en Paraguay.

²⁷ En el contexto de Paraguay, los electrolizadores AEL serían recomendados por su bajo costo de capital, con una proyección de entre 0.20 y 0.70 millones USD/MW en 2050, y robustez, lo que los hace especialmente atractivos en proyectos con fuentes de energía estable como la hidroeléctrica. Sin embargo, los electrolizadores PEM, que tienen costos de capital algo más elevados, entre 0.20 y 0.90 millones USD/MW en 2050, pueden ser adecuados en regiones donde se busque aprovechar la flexibilidad de integrar fuentes renovables intermitentes.

²⁸ El transporte de hidrógeno en estado puro enfrenta desafíos significativos debido a su baja densidad volumétrica, alta inflamabilidad y la necesidad de mantenerlo a altas presiones o bajas temperaturas.

El hidrógeno es un gas con elevada densidad energética pero muy baja densidad volumétrica, lo que encarece su almacenamiento a gran escala y su transporte a largas distancias.



Ilustración 5 – Principales alternativas para el transporte de hidrógeno²⁹

A. Transporte de hidrógeno puro en estado gaseoso

Una de las principales ventajas del transporte de hidrógeno puro en estado gaseoso es que no precisa un tratamiento del hidrógeno, manteniendo su naturaleza y eficiencia energética. No obstante, esta opción presenta grandes impedimentos si no se disponen de infraestructuras adecuadas.

La alternativa más eficiente, desde un punto de vista técnico y económico, para el transporte de hidrógeno puro en estado gaseoso, es a través de ductos, bien mediante gasoductos dedicados o inyectado en redes de gas natural preexistentes, a partir de un proceso de mezcla con el gas natural (comúnmente conocido como “*blending*”).

En caso de no disponer de una red de ductos, como es el caso de Paraguay, el uso de nuevos ductos es igualmente rentable y preferible por su eficiencia económica a largo plazo, ya que, a pesar del alto costo inicial, la vida útil de entre 30 y 60 años permite amortizar la inversión significativamente. No obstante, el principal obstáculo es el gran desembolso inicial necesario para la construcción de estos ductos, lo que implica una inversión muy relevante y la posible generación de deuda considerable.

Otras alternativas, como por ejemplo el transporte por camión, aunque ofrece mayor flexibilidad, su escalabilidad es menor, incrementando notablemente los costos del transporte.

²⁹ Análisis propio. Portador de hidrógeno se define como la forma química o física en la que el hidrógeno se convierte y posteriormente se reconvierte para poder ser transportado o distribuido. Los derivados del hidrógeno son productos cuyo contenido energético proviene del hidrógeno.

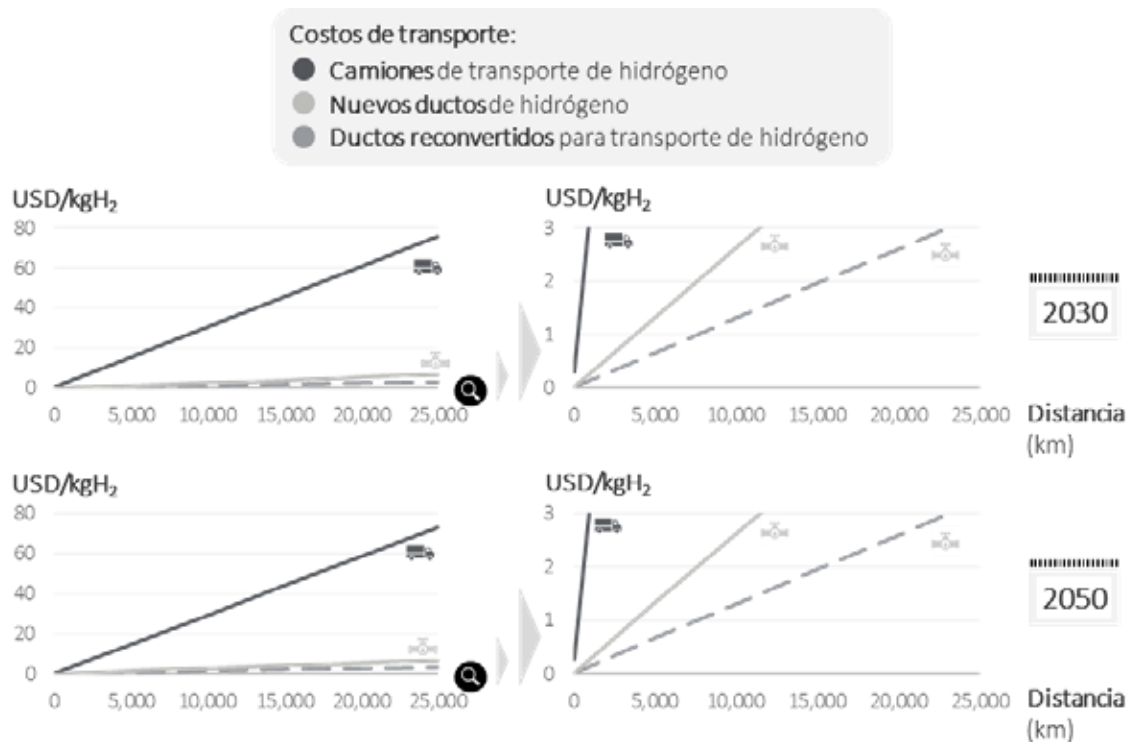


Ilustración 6 – Impacto de la distancia para el transporte directo de hidrógeno gaseoso en 2030 y 2050³⁰

En Paraguay, la falta de experiencia en el manejo de gases a gran escala y la ausencia de una red de gasoductos existente limita la viabilidad del transporte de hidrógeno puro en estado gaseoso a través de ductos dedicados para el transporte de hidrógeno gaseoso, y la construcción de una nueva red de ductos requeriría inversiones iniciales (CAPEX) muy elevadas, que podrían no ser viables en el corto plazo.

En este contexto, la Estrategia de Paraguay en el corto y medio plazo se enfoca en minimizar el transporte de hidrógeno puro y priorizar su conversión en productos derivados, que sean más fáciles y económicos de manejar y transportar.

No obstante, si por necesidades logísticas se requiere transportar hidrógeno puro, se evaluará la construcción de nuevos ductos, considerando cuidadosamente la inversión y su viabilidad. En ese caso, si el costo de los nuevos ductos resulta excesivo, la opción de transporte por camión se utilizará como solución alternativa, aunque menos eficiente y escalable. Por ello, se prioriza centrar la producción y el consumo de hidrógeno verde en ubicaciones estratégicas o hubs, donde se maximicen las sinergias industriales y se minimice la necesidad de transporte en su forma gaseosa.

³⁰ Los costos del transporte por camión incluyen las inversiones en los vehículos (CAPEX), así como los costos operativos relacionados con la compresión y el combustible necesarios para el transporte del hidrógeno (OPEX). Los nuevos ductos de hidrógeno consideran tanto los costos de inversión (CAPEX) para su construcción, como los costos de operación y mantenimiento (OPEX). Los ductos reconvertidos reflejan los costos operativos (OPEX), incluyendo gastos de reacondicionamiento y compresión del hidrógeno para su transporte (Deloitte, 2023). Análisis propio.

B. Transporte de portadores de hidrógeno

Otra forma de transporte de hidrógeno consiste en convertirlo en diversos portadores, sustancias líquidas, que son más fáciles de transportar que el hidrógeno puro, ya que permiten usar las redes de suministro existentes:

- El **amoniaco** se presenta como un portador eficiente para el transporte de hidrógeno debido a sus características sostenibles y a la infraestructura ya desarrollada para su operación. A diferencia del hidrógeno puro, cuya infraestructura de transporte es limitada, el amoniaco puede aprovechar las redes de suministro existentes, lo que facilita su despliegue a gran escala.³¹ Además, el amoniaco permite transportar hidrógeno a largas distancias de manera más eficiente en términos de volumen. Sin embargo, la producción y liberación del hidrógeno a partir del amoniaco requieren procesos adicionales y costosos, y su toxicidad, junto con los riesgos asociados a su operación y almacenamiento, exigen estrictas medidas de seguridad para prevenir accidentes y proteger la salud y el medio ambiente.
- Los **portadores líquidos orgánicos** (LOHC), como el metilciclohexano (MCH) o el 12-H N-etilcarbazol (NEC), permiten almacenar hidrógeno a temperatura y presión ambiente, reduciendo riesgos asociados a las altas presiones y temperaturas extremadamente bajas necesarias para otros métodos de almacenamiento. Estos compuestos son capaces de absorber y liberar hidrógeno de manera reversible, facilitando un transporte más seguro y manejable. Sin embargo, es necesario considerar la eficiencia energética del ciclo completo, ya que los procesos necesarios para liberar y reabsorber el hidrógeno pueden requerir una cantidad considerable de energía, lo que afecta la viabilidad económica y energética de esta tecnología.
- El **hidrógeno** también puede almacenarse en estado **líquido** de manera similar al gas natural licuado (GNL), permitiendo que su grado de densidad energética sea más alto en comparación con el hidrógeno gaseoso. Si bien una mayor densidad implicaría incrementar la eficiencia en su transporte a larga distancia y su almacenamiento en grandes volúmenes, este proceso implica un consumo energético significativo, ya que se deben mantener temperaturas criogénicas de aproximadamente -253°C para mantener el hidrógeno en estado líquido. Este requerimiento energético considerable puede afectar la viabilidad económica y la eficiencia global del almacenamiento de hidrógeno líquido, además de plantear desafíos técnicos en cuanto al diseño y mantenimiento de los equipos necesarios para estas bajas temperaturas.

En escenarios donde el hidrógeno debe utilizarse puro y las limitaciones en infraestructuras excluyen el transporte directo en estado gaseoso, la utilización de alguno de estos portadores de hidrógeno se presentaría como una posible alternativa.

No obstante, la utilización de amoniaco y LOHC, podría necesitar adaptaciones significativas en la infraestructura y logística existentes que permitan garantizar condiciones de seguridad y eficiencia adecuados. En este sentido, se precisaría la adecuación de terminales de carga y descarga, la adaptación de vehículos de transporte o el desarrollo de estaciones para la reconversión del portador en hidrógeno utilizable, entre otros aspectos.

³¹ En la última década, Paraguay importó una media anual de 60 toneladas de amoniaco, alcanzando aproximadamente 170 toneladas en el año 2023. (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

Asimismo, los costos de conversión y reconversión de hidrógeno en portadores como el amoníaco incrementan significativamente el costo final, lo que reduce su competitividad en relación con otras alternativas. Además, la distancia influye significativamente en los costos de transporte de portadores de hidrógeno. Para distancias medias y largas, el transporte marítimo es la opción más eficiente debido a la capacidad que aporta para transportar grandes volúmenes, lo que reduce el costo por unidad de energía.

En términos de transporte, el amoníaco ofrece claras ventajas frente al hidrógeno líquido, ya que la infraestructura existente para su manejo y transporte reduce considerablemente los costos logísticos. Sin embargo, el proceso de conversión y reconversión añade un costo fijo adicional que es independiente de la distancia recorrida, lo que afecta su competitividad a corto y mediano plazo.³²

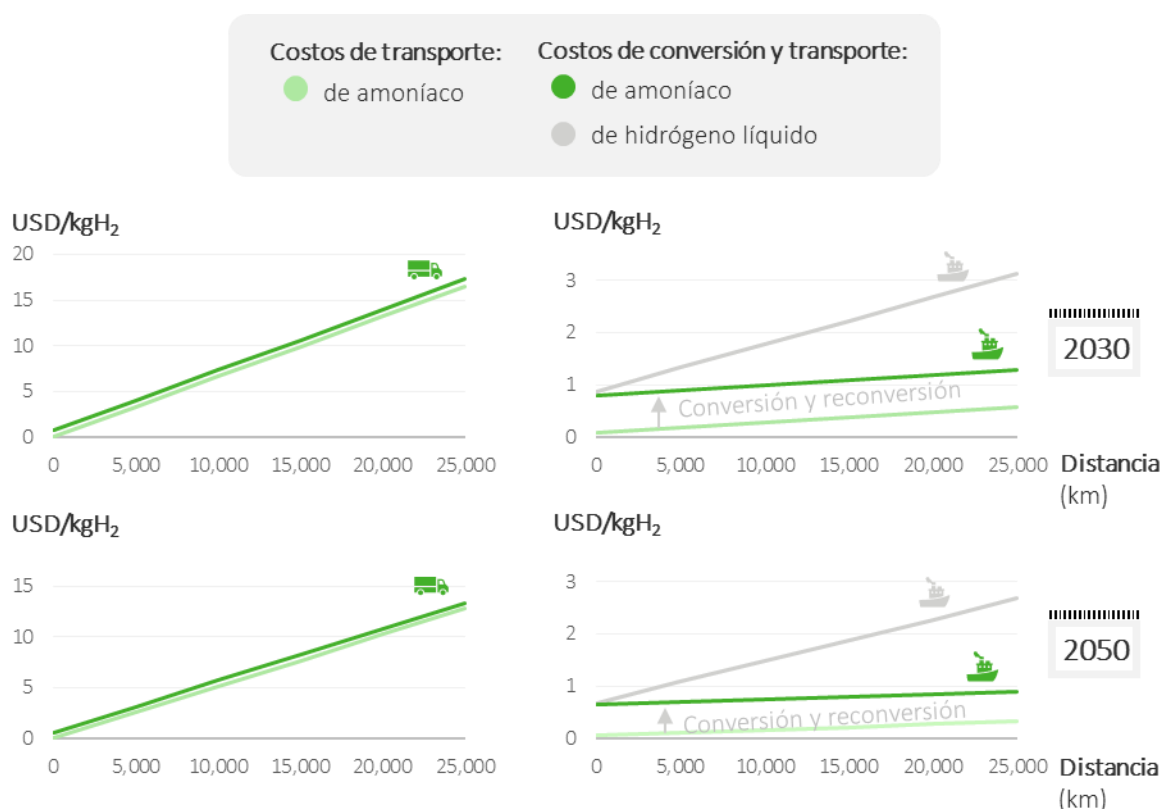


Ilustración 7 - Impacto de la distancia para el transporte de portadores de hidrógeno en 2030 y 2050 Paraguay, como país mediterráneo sin salida al mar de forma directa, enfrenta importantes retos logísticos frente a la alternativa de un posible transporte marítimo³³

La opción más viable para acceder al mar sería a través de la Hidrovía Paraguay-Paraná, pero esta ruta presenta limitaciones considerables. Los barcos que transportan amoníaco y otros derivados

³² Esta dinámica hace que, si bien el amoníaco es más rentable en el transporte directo, los costos adicionales por los procesos de conversión deben ser cuidadosamente evaluados al analizar su viabilidad como portador de hidrógeno en diferentes escenarios de uso.

³³ Los costos de conversión y reconversión considerados para el transporte de amoníaco incluyen las inversiones en los reactores de conversión y el consumo eléctrico necesario para llevar a cabo el proceso. Para el transporte de amoníaco en camión, los costos incluyen la inversión en vehículos, los costos de compresión, y los costos de combustible. En el caso del transporte de amoníaco por barco, se tienen en cuenta los costos de operación y mantenimiento de las terminales de envío, las inversiones en los barcos y el combustible utilizado para el transporte en barco, además de los costos de conversión y reconversión del amoníaco. Por su parte, los costos del transporte de hidrógeno líquido por barco incluyen los costos de licuefacción del hidrógeno (proceso que requiere enfriamiento a temperaturas extremadamente bajas), así como los costos de reconversión para devolver el hidrógeno a su estado gaseoso y puro, además de los costos de inversión y operación del transporte marítimo, nivelados por kg de hidrógeno transportado. (Deloitte, 2023) (IRENA, 2022). Análisis propio.

requieren calados profundos, lo que no siempre está garantizado a lo largo de toda la Hidrovía. Esto implicaría inversiones considerables en infraestructura para mejorar los calados y hacer la Hidrovía más adecuada para este tipo de transporte, lo cual no es viable en el corto y medio plazo.

Dado este contexto, el transporte fluvial a gran escala mediante la Hidrovía se descarta como una opción inmediata para Paraguay. Por ello, si se necesita transportar portadores de hidrógeno, el transporte por camión podría ser la única alternativa práctica, aunque conlleva costos más elevados en comparación con el transporte marítimo. Esta opción podría permitir flexibilidad en el acceso a mercados internacionales y puertos marítimos cercanos, a pesar de los altos costos asociados. En estas circunstancias, el transporte de amoníaco como portador, podría ser la mejor alternativa, debido a su menor costo y facilidad de manejo. El amoníaco evita los altos costos de mantener el hidrógeno en estado líquido y aprovecha la experiencia e infraestructura existente en el país, haciendo su transporte en camión más viable y económico.

Sin embargo, el transporte por carretera o fluvial del hidrógeno, sus derivados o portadores, no serían una prioridad en el contexto de Paraguay, debido a sus limitaciones en costos e infraestructuras. Es por ello, que se evalúa la opción de utilizar el hidrógeno verde como materia prima en Paraguay para la producción de otros productos verdes que puedan ser fácilmente transportables.

C. Transporte de derivados del hidrógeno verde y otros productos verdes

El hidrógeno puede ser utilizado para crear combustibles con propiedades similares a los combustibles fósiles, como el amoníaco, el e-metanol, producido junto con CO₂ o biomasa, y otros combustibles líquidos sintéticos como e-diésel, e-keroseno u otros combustibles sostenibles para la aviación (SAF, por sus siglas en inglés).

Estos productos derivados y productos verdes, similares a aquellos que actualmente se importan y utilizan en Paraguay, permitirían la utilización de las infraestructuras ya existentes para su almacenamiento y transporte.

Ante la dificultad del transporte directo de hidrógeno puro en estado gaseoso y de otros portadores de hidrógeno, en aquellos casos en los que el hidrógeno tenga como destino final la transformación en estos derivados y productos verdes, la conversión directa en estos compuestos y su posterior transporte podría ser una alternativa atractiva. Transportar el hidrógeno ya transformado en su derivado final permite optimizar la cadena logística y facilitar su transporte, hasta que la infraestructura de hidrógeno puro, principalmente los nuevos ductos, esté lo suficientemente extendida y desarrollada como para manejar grandes volúmenes de hidrógeno.

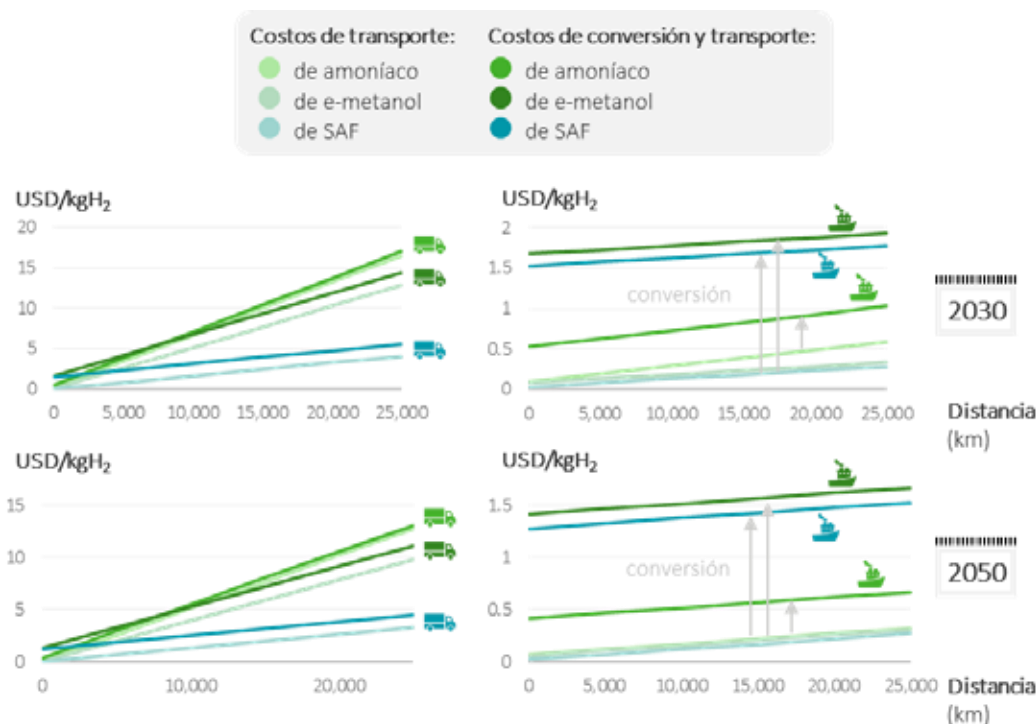


Ilustración 8 – Impacto de la distancia para el transporte de derivados de hidrógeno en 2030 y 2050³⁴

No obstante, en términos de costo de transporte para estos derivados y productos verdes, la distancia influye significativamente. Para distancias medias y largas, el transporte en barco es más viable económicamente debido a su capacidad para grandes volúmenes, reduciendo el costo por unidad de energía. El transporte por camión, aunque posible, enfrenta mayores costos por menor capacidad y altos costos de combustible.

Entre el transporte de amoníaco, e-metanol y SAF (combustibles sostenibles de aviación), el SAF presenta el costo más bajo en términos de transporte por kilogramo de hidrógeno contenido, dado que puede transportar una mayor cantidad de hidrógeno por unidad de volumen en comparación con el amoníaco y el e-metanol.

En consecuencia, el transporte directo de SAF resulta más económico que el de e-metanol, y este a su vez es más barato que el de amoníaco. Esta diferencia es más evidente en el transporte por camión, donde los costos de conversión de hidrógeno a estos derivados son un componente fijo, mientras que los costos del transporte dependen en mayor medida de la distancia. Por ello, el

³⁴ Los costos de transporte para amoníaco, e-metanol y combustibles sintéticos de aviación (SAF) por camión y barco se derivan en función de sus características de densidad energética y volumétrica. Dado que el e-metanol y los combustibles sintéticos de aviación pueden transportarse en los mismos tanques que el amoníaco, los costos fijos y variables asociados al transporte de estos derivados del hidrógeno se extrapolan de los costos del transporte de amoníaco mediante un análisis estequiométrico basado en sus propiedades físicas. Para todos estos portadores de hidrógeno, los costos considerados incluyen únicamente la conversión del hidrógeno a estos derivados, sin tener en cuenta procesos de reconversión posteriores. En el transporte de amoníaco, e-metanol y SAF por camión, se incluyen los costos de inversión en vehículos, compresión, y combustible. Para el transporte por barco, se consideran los costos de operación y mantenimiento de las terminales de envío, las inversiones en los barcos, y el combustible necesario, todos nivelados por kg de derivado transportado. (Deloitte, 2023). Análisis propio.

transporte de SAF por camión es más barato que el de amoniaco, una vez considerados los costos de conversión.

Sin embargo, los costos de conversión tienen un mayor impacto en el transporte marítimo: la conversión del hidrógeno en amoniaco es significativamente menos costosa que en e-metanol o SAF, debido a la simplicidad del proceso de síntesis de Haber-Bosch comparado con los procesos requeridos para e-metanol y SAF. Por ello, el costo final del transporte en barco de amoniaco, considerando dichos costos de conversión, es considerablemente menor que el del SAF y e-metanol, ya que, aunque el transporte puro de estos últimos es más económico debido a su mayor densidad, los costos de conversión hacen que el amoniaco sea la opción más rentable en conjunto.

Además, en el largo plazo, se espera que los costos de transporte marítimo en buques de amoniaco y e-metanol, converjan gracias a avances tecnológicos, mientras que el transporte de SAF seguirá siendo más económico debido a su mayor densidad energética.

No obstante, en el caso de Paraguay, la ausencia de una salida directa al mar y las restricciones de calado en la Hidrovía Paraguay-Paraná limitan el uso de transporte marítimo para derivados del hidrógeno como amoniaco, e-metanol y SAF. Por ello, en el corto y medio plazo, el transporte de estos productos se realizará principalmente por camión, a pesar de presentar costos más elevados en comparación con el transporte marítimo. Además, la elección del derivado a transportar no estará determinada por el costo del transporte, sino por su uso final. Esto implica que se transportará amoniaco cuando su destino sea su utilización directa, e-metanol si se necesita para esa aplicación específica, y SAF cuando su empleo esté orientado a la aviación.

El uso de cada derivado se debe seleccionar en función de la demanda y aplicación concreta, independientemente de los costos logísticos asociados al transporte en camión.

D. Almacenamiento de hidrógeno y portadores

Una vez producido, el hidrógeno requiere un almacenamiento seguro y eficiente para garantizar su estabilidad hasta el momento de su posterior distribución y utilización.

El almacenamiento de hidrógeno ya sea en su forma gaseosa o en portadores líquidos, implica consideraciones estrictas de seguridad debido a su alta inflamabilidad y a los riesgos asociados a las altas presiones y temperaturas criogénicas requeridas en algunos métodos. Dado que Paraguay, al igual que muchos otros países, no tiene experiencia significativa en el manejo y almacenamiento de hidrógeno a gran escala, es necesario desarrollar una reglamentación específica sobre seguridad que cubra todos los aspectos del ciclo de vida del hidrógeno, desde su producción hasta su almacenamiento y transporte. Esta normativa, con el apoyo del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) se alinearán con los estándares internacionales, como los de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), que establecen directrices sobre almacenamiento, transporte y manipulación de hidrógeno y portadores para garantizar la protección de las personas, la infraestructura y el medio ambiente.

Por otro lado, existen múltiples diversas opciones tecnológicas maduras que se han desarrollado para garantizar eficiencia y seguridad en el proceso de almacenamiento. Estas opciones incluyen

una variedad de métodos que permiten conservar el hidrógeno hasta su uso final, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación, y mejorar tanto el espacio como sus costos operativos:

- **Tanques de alta presión:** Los tanques de alta presión son esenciales para almacenar hidrógeno, especialmente en estaciones de recarga de vehículos de pila de combustible. Estos tanques operan a presiones entre 350 y 700 bares, lo que requiere materiales muy resistentes como compuestos avanzados o aceros especiales. Debido a la baja densidad volumétrica del hidrógeno a temperatura y presión ambiente, se necesita un gran volumen para almacenarlo, por lo que se utilizan altas presiones para compactarlo. Aunque este método implica elevadas inversiones en infraestructura y materiales, es eficiente para el almacenamiento inmediato y la distribución a distancias cortas, como en entornos urbanos y en vehículos.
- **Cavernas:** Para el almacenamiento a gran escala, las cavernas de sal o los yacimientos de gas natural abandonados representan una oportunidad para confinar hidrógeno en estado gaseoso. La ventaja de estos sistemas radica en su capacidad para albergar grandes cantidades de hidrógeno, resultando en economías de escala significativas. Sin embargo, en contextos geográficos como el de Paraguay, donde no existen identificadas formaciones geológicas adecuadas, esta opción no es viable, lo que orienta la búsqueda de alternativas adaptadas a las características locales.

Por otra parte, el almacenamiento con portadores de hidrógeno incluye métodos que convierten el hidrógeno a otras formas químicas, como hidrógeno líquido, amoníaco o LOHC, cada uno con sus propios retos y beneficios en términos de densidad energética y seguridad.

- **Almacenamiento como hidrógeno líquido:** Este método requiere mantener el hidrógeno a temperaturas criogénicas de -253°C , usando tanques aislados térmicamente y sistemas de refrigeración. A pesar de su alta densidad energética, la licuefacción es intensiva en energía, lo que aumenta los costos operativos. Este método es útil donde el espacio es limitado o para el transporte de grandes cantidades. Esta tecnología de almacenamiento es la que, a la fecha, más avances tecnológicos presenta por su importancia.
- **Almacenamiento como amoníaco:** El amoníaco es estable a temperaturas y presiones moderadas, adecuado para almacenamiento a largo plazo y transporte internacional. Paraguay podría adaptar su infraestructura logística fluvial para manejar amoníaco, reduciendo costos logísticos. Además, el amoníaco puede usarse directamente como combustible o reconvertirse a hidrógeno, funcionando tanto como derivado como portador según su uso final.
- **Almacenamiento como LOHC:** Los LOHC permiten almacenar hidrógeno a condiciones ambientales y liberarlo mediante hidrogenación y deshidrogenación. Aunque energéticamente intensivo, ofrece una solución segura y densa en energía para almacenamiento a largo plazo, siendo especialmente útil en transporte marítimo de hidrógeno o para instalaciones remotas que necesitan un suministro constante y fiable de energía.
- **Almacenamiento como materiales sólidos:** Algunos metales y aleaciones pueden formar hidruros metálicos con hidrógeno, permitiendo almacenar más hidrógeno por unidad de volumen. Estos materiales incluyen hierro, níquel, cromo, litio y magnesio. La eficiencia de estos compuestos depende de la presión y la temperatura de carga/descarga. Aunque esta tecnología está en una etapa avanzada de desarrollo, el almacenamiento resulta más pesado que el del hidrógeno puro.

La elección del método de almacenamiento de hidrógeno debe considerar costos, seguridad y eficiencia, y futuras innovaciones tecnológicas podrían mejorar su viabilidad económica, aumentando así su competitividad frente a otras fuentes de energía.

En el caso de Paraguay, la opción de utilizar cavernas geológicas para su almacenamiento, una práctica común en otras regiones, no es viable en principio debido a la falta de evidencias geológicas de yacimientos o formaciones subterráneas adecuadas en el territorio paraguayo. Por lo tanto, para el almacenamiento de hidrógeno en estado puro, la opción más factible sería el uso de tanques de alta presión. Estos tanques permitirán mantener el hidrógeno comprimido y garantizar su almacenamiento seguro y eficiente, especialmente en aplicaciones que requieren distribución a distancias cortas o almacenamiento inmediato, como estaciones de recarga o instalaciones cercanas a los electrolizadores en los hubs estratégicos que Paraguay pretende desarrollar.

No obstante, dado que la Estrategia de Paraguay también contempla la producción de productos derivados como amoníaco, e-metanol o incluso fertilizantes, el enfoque preferente para su almacenamiento debería ser la conversión del hidrógeno producido en estos derivados.

Estos compuestos no solo serán más fáciles de almacenar a largo plazo, sino que además cuentan con una infraestructura logística y operativa más consolidada, especialmente en el caso del amoníaco, que puede almacenarse a presiones y temperaturas moderadas.

• Aplicaciones y usos finales del hidrógeno verde, derivados y otros productos verdes

El hidrógeno verde puede utilizarse como combustible, vector energético o materia prima en diversas industrias, ofreciendo oportunidades para sustituir recursos fósiles, reducir emisiones contaminantes y mejorar la economía mediante el desarrollo de nuevas industrias sostenibles.

A. Industria

En el sector industrial de Paraguay, el uso del hidrógeno ha sido bajo en la última década, con un consumo aproximado de solo 250 kg anuales importados, principalmente de hidrógeno gris.

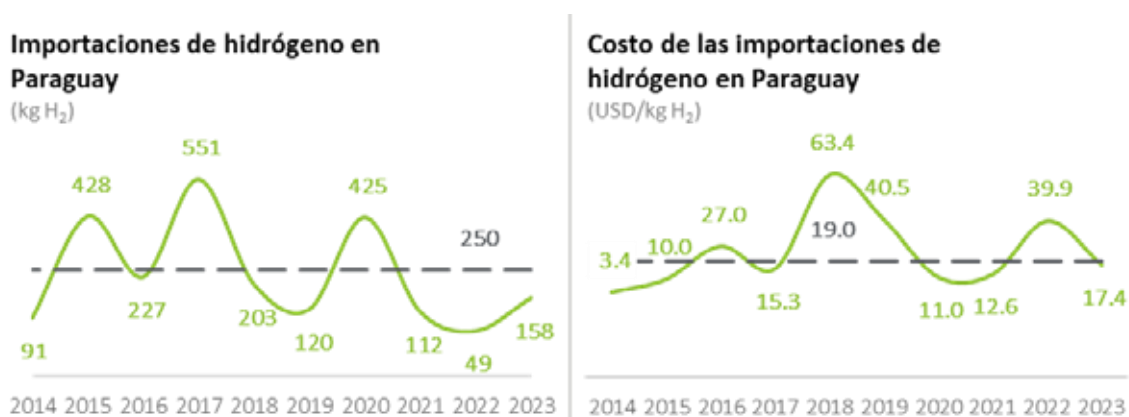


Ilustración 9 - Importaciones de hidrógeno en Paraguay en la última década y su costo nivelado³⁵

³⁵ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

Dado que el país depende completamente de las importaciones, los precios del hidrógeno importado presentan una gran fluctuación en la última década, con un promedio de 19 USD/kg, alcanzando mínimos de aproximadamente 4 USD/kg y máximos superiores a 63 USD/kg.

Esto evidencia una alta dependencia del mercado exterior, tanto en la fijación de precios como en los costos asociados al transporte.

Este contexto ofrece una oportunidad para Paraguay en su transición hacia una economía del hidrógeno verde.

Al tener un consumo actual tan poco relevante, desarrollar una producción interna de hidrógeno verde permitiría no solo reducir su dependencia del mercado externo, sino también lograr precios más estables y competitivos. La posibilidad de consumir hidrógeno verde localmente, en lugar de importarlo, sería más rentable y eficiente, mitigando los elevados costos actuales y promoviendo un modelo más sostenible a largo plazo.

Este consumo presenta un potencial viable para la descarbonización, ya que la transición al hidrógeno verde sería relativamente sencilla. Al sustituir el hidrógeno gris importado por hidrógeno verde producido, Paraguay puede reducir dichas emisiones indirectas³⁶ industriales y avanzar hacia una economía más sostenible.

Asimismo, el hidrógeno verde podría ser utilizado como combustible o materia prima en diversos sectores industriales complementarios de interés para Paraguay, como es la industria química o la metalúrgica. Si bien estos sectores no son los mayores contribuyentes al PIB, con la industria química representando aproximadamente el 2.9% y la metalúrgica un 1.5%, su relevancia no radica únicamente en su peso económico actual, sino en el potencial para implementar soluciones basadas en hidrógeno verde que permitan transformar sus procesos productivos.



Ilustración 10 - Contribución al PIB de la industria química y de la industria metalúrgica³⁷

En ambos casos, además de tener el potencial de sustituir a los combustibles fósiles en las actividades industriales actuales, el hidrógeno verde presenta una oportunidad aún más significativa: catalizar el desarrollo de nuevas industrias emergentes. La producción de productos como fertilizantes verdes o el desarrollo de otras industrias, como por ejemplo la asociada con el

³⁶ Las emisiones se consideran indirectas para Paraguay porque están asociadas al uso de hidrógeno gris importado en los procesos industriales nacionales, lo que corresponde a emisiones de Alcance 2 y 3 en términos de contabilidad de carbono. Esto implica que, aunque las emisiones no se generan directamente dentro del país, su reducción mediante la sustitución por hidrógeno verde impacta en la huella de carbono global.

³⁷ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2022).

acero bajo en carbono, no solo contribuiría al crecimiento del PIB, sino que también posicionaría a Paraguay como un referente en la producción de bienes descarbonizados a nivel regional e internacional.

- **Industria química:** A nivel mundial, el hidrógeno es indispensable en la industria química para la elaboración de e-metanol y amoníaco, compuestos muy relevantes para la fabricación de fertilizantes, biocombustibles, pinturas y plásticos, entre otros. Para Paraguay, esto presenta una oportunidad estratégica para el desarrollo industrial: comenzar la producción local de estos productos verdes, que fundamentalmente se importan, y sustituir los combustibles fósiles con hidrógeno verde en los procesos de producción existentes. Esto no sólo reduciría la dependencia de importaciones, sino que también impulsaría la competitividad de la industria química paraguaya en el mercado internacional, con productos más descarbonizados y atractivos para el mercado global, cada vez más descarbonizado. Adicionalmente, la capacidad de reemplazar el uso de pequeñas cantidades de gasolina, diésel y GLP en el sector por hidrógeno verde en la industria química permitiría una mayor autosuficiencia energética del país y contribuiría a la sostenibilidad de los procesos industriales, siempre y cuando se evalúen adecuadamente las inversiones requeridas en infraestructura y tecnología.³⁸ En este sentido, la industria química en Paraguay genera actualmente alrededor de 4.2 kton de CO₂ equivalentes anuales, lo que resalta la importancia de impulsar una transición hacia energías más limpias.
- **Industria metalúrgica:** Asimismo, a nivel global, el hidrógeno está emergiendo como una potencial alternativa en la industria metalúrgica, especialmente en la producción de acero y hierro. Tradicionalmente, estos procesos dependen en gran medida del carbón, lo que genera altas emisiones de CO₂. Sin embargo, al utilizar hidrógeno como agente reductor en lugar de carbón,

se pueden producir metales con una huella de carbono significativamente menor. Este cambio no sólo contribuye a la descarbonización del sector metalúrgico, sino que también mejora la eficiencia energética de los procesos. En el caso de Paraguay, aunque la industria metalúrgica actual tiene un bajo consumo de hidrógeno y una limitada capacidad de reducción de emisiones, su mayor potencial radica en el desarrollo de una nueva industria de acero y hierro “verde”. Dado que el país importa la mayor parte de estos productos, la adopción del hidrógeno permitiría el establecimiento de una industria nacional con un enfoque en la producción descarbonizada de metales, lo que reduciría la dependencia de las importaciones y ofrecería oportunidades de exportación en mercados que exigen cada vez más productos bajos en carbono. Este desarrollo no solo impulsaría el crecimiento industrial del país, sino que también lo posicionaría como un proveedor competitivo en la cadena de valor global del acero sostenible.

Gracias a su uso como combustible y/o materia prima en procesos industriales, y a su contenido energético superior al de los combustibles fósiles convencionales, el hidrógeno verde ofrece una alternativa viable para la industria en el largo plazo, no sólo contribuyendo a una transición energética más limpia y sostenible, sino también reduciendo la dependencia exterior de Paraguay y fortaleciendo su industria nacional y su economía.

³⁸ La sustitución de combustibles fósiles en procesos industriales puede requerir inversiones adicionales en infraestructura, así como modificaciones en los equipos para garantizar la adaptación a las nuevas fuentes energéticas. Cada caso debe analizarse individualmente para determinar su viabilidad técnica y económica.

La ubicación de Paraguay, próxima a mercados con altos consumos en fertilizantes y metanol³⁹, con una emergente demanda en productos verdes, se presenta como una gran oportunidad para el desarrollo de esta industria a nivel nacional.

En el sector industrial de Paraguay, el consumo de amoníaco ha sido de alrededor de 350 toneladas anuales durante la última década, con precios que han fluctuado considerablemente entre 700 y 1,400 USD por tonelada.

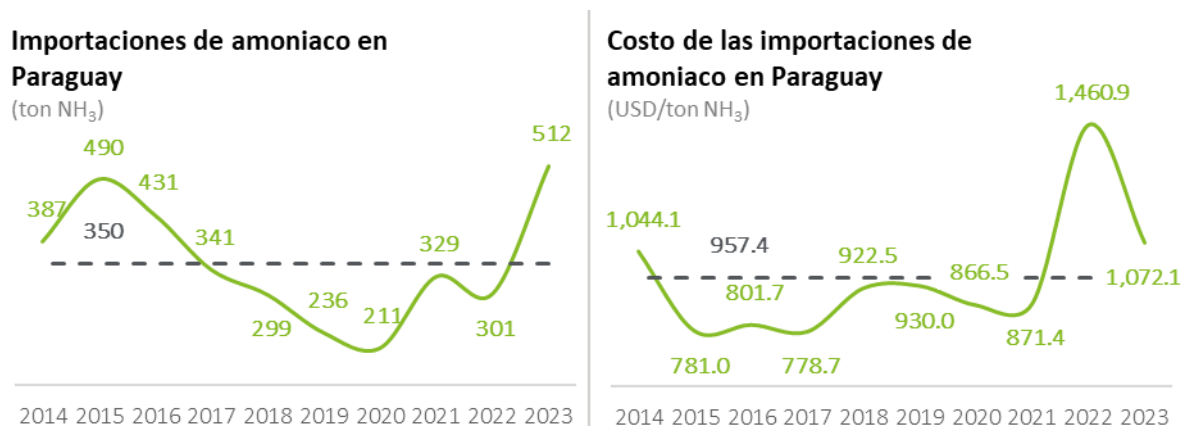


Ilustración 11- Importaciones de amoníaco en Paraguay en la última década y su costo nivelado⁴⁰

Esta alta variabilidad en los precios y la dependencia de las importaciones exponen al país a los cambios del mercado internacional y a los costos asociados al transporte desde otros países.

La producción local de amoníaco verde para la fabricación de fertilizantes representa una oportunidad estratégica para Paraguay. Al producir y consumir amoníaco verde en la industria de los fertilizantes, Paraguay tendrá la oportunidad de reducir su dependencia del amoníaco gris importado, estabilizando costos y garantizando un suministro más seguro y sostenible. Esto no solo mitigaría las fluctuaciones de precios internacionales, sino que también fortalecería la autosuficiencia industrial del país, reduciendo la necesidad de transporte desde el exterior y promoviendo una economía más resiliente.

E. Movilidad

En el contexto del sector transporte de Paraguay, se observa un crecimiento constante en el consumo de energía, especialmente en lo relacionado con los combustibles fósiles.

Históricamente, los subsectores de transporte por carretera, fluvial y aéreo han incrementado de manera significativa su demanda energética, con un predominio del uso de diésel y gasolina, lo que ha incrementado la dependencia de Paraguay respecto a importaciones de estos combustibles⁴⁰.

El transporte por carretera, particularmente en el segmento de vehículos pesados, ha mostrado un alto consumo de diésel debido a la necesidad de largas distancias de recorrido y la falta de alternativas sostenibles. De manera similar, el transporte fluvial, vital para el comercio regional a

³⁹ Brasil importa anualmente aproximadamente 1,400,000 toneladas de metanol gris, pues el país no tiene producción propia actualmente.

⁴⁰ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

través de la Hidrovía Paraná-Paraguay, se sustenta principalmente en combustibles fósiles, lo que resalta el desafío de descarbonizar este subsector. En la aviación, el keroseno sigue siendo el combustible más utilizado, reflejando un patrón común en la región y la necesidad de alternativas más limpias.

En este contexto, el hidrógeno verde emerge como una solución estratégica que puede contribuir a la descarbonización del sector transporte en sus distintas modalidades. Además de su uso directo como combustible en vehículos de pila de combustible, ofrece la posibilidad de transformarse en derivados como e-metanol, amoniaco o el Combustible de Aviación Sostenible (SAF, por sus siglas en inglés), que pueden reemplazar de manera eficiente a los combustibles fósiles tradicionales, especialmente para el transporte pesado y fluvial.

Estos e-combustibles tienen el potencial de integrarse en las infraestructuras existentes, lo que permitiría una transición más rápida hacia una movilidad sostenible.

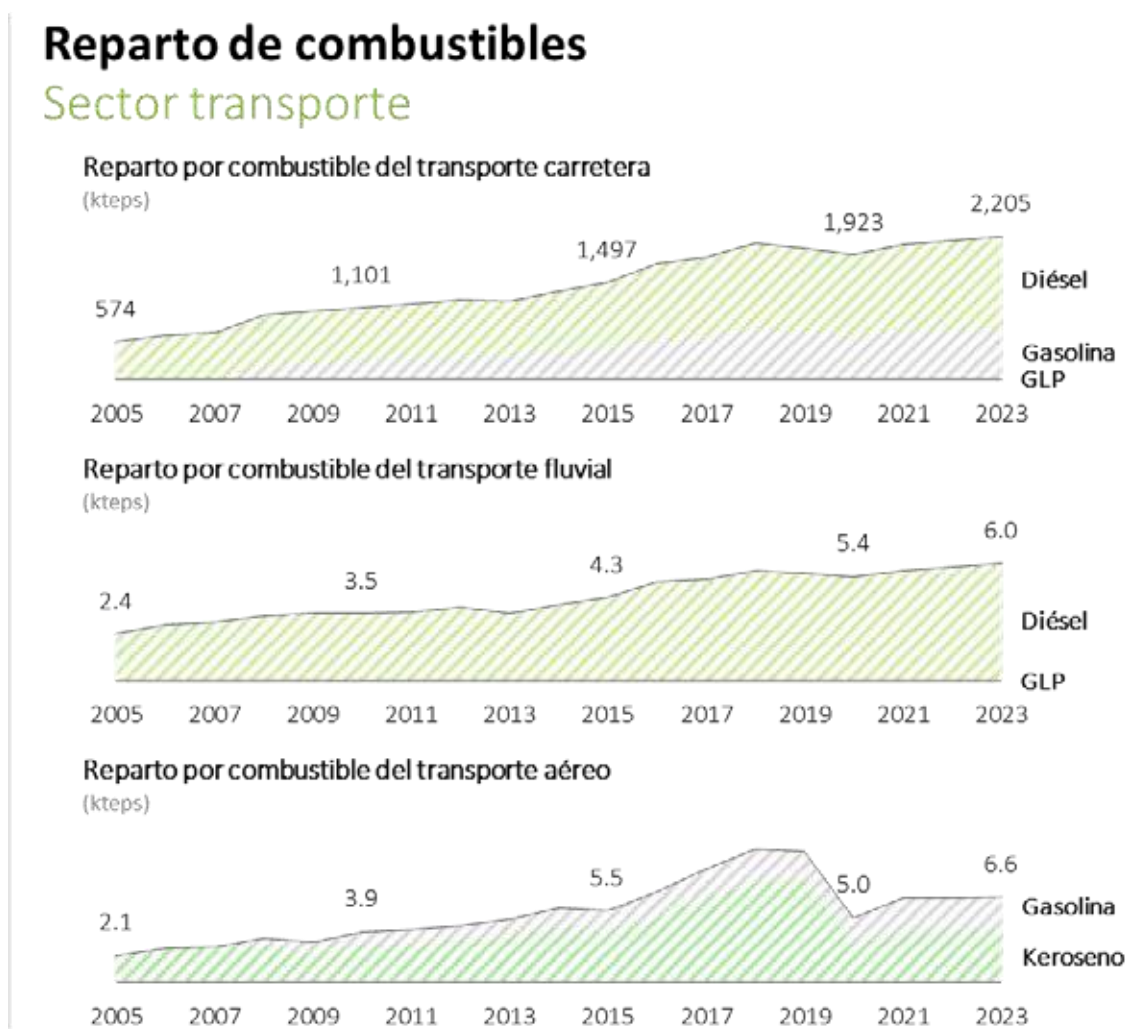


Ilustración 12 – Energía consumida por combustible en el sector transporte carretera, fluvial y aéreo⁴¹

⁴¹ (VMME, 2023). Análisis propio.

El aprovechamiento del hidrógeno verde en Paraguay no solo contribuiría a la reducción de emisiones, sino que también fortalecería la independencia energética del país, disminuyendo la volatilidad de precios asociada a la importación de combustibles fósiles.

Por tanto, el uso del hidrógeno verde en el sector del transporte tiene un elevado potencial en todos sus ámbitos: carretera, ferroviario, fluvial, marítimo o aéreo. A continuación, se detalla el estado actual y el potencial del hidrógeno verde en distintos modos de transporte en Paraguay:

- **Transporte por carretera:** Su potencial actual es mayor en los vehículos pesados, donde el hidrógeno verde se presenta como una opción atractiva en el desarrollo de la movilidad sostenible en Paraguay.

Los vehículos pesados, como camiones y autobuses, se pueden beneficiar significativamente de las pilas de combustible de hidrógeno (FC, por sus siglas en inglés)⁴², en relación con otras alternativas sostenibles, debido al corto tiempo de recarga que se precisa y la alta autonomía que puede aportar.⁴³

La adopción de estos vehículos de hidrógeno podría reducir significativamente las emisiones de CO₂ en el sector del transporte. Concretamente, las 2,300 ktep proyectadas para 2025 en el transporte por carretera podrían generar emisiones de entre 7,000 y 7,200 kton de CO₂ equivalentes⁴⁴, dependiendo de la combinación de combustibles fósiles utilizados (diésel, gasolina, GLP), lo que refuerza la urgencia de adoptar alternativas sostenibles como el hidrógeno verde. Este reemplazo no solo reduciría estas emisiones de manera significativa, sino que también contribuiría a la descarbonización del sector del transporte, proporcionando una alternativa sostenible a los combustibles fósiles tradicionales.

Para ello se precisará, a su vez, de un despliegue estratégico de puntos de carga (hidrogeneras), que típicamente contarán con pequeños centros de producción de hidrógeno verde de proximidad, con objeto de reducir las necesidades logísticas y de transporte.

⁴² Las pilas utilizan hidrógeno producido a partir de fuentes renovables para generar electricidad mediante la combinación de dicho hidrógeno con oxígeno, produciendo como subproducto vapor de agua, la cual alimenta los vehículos eléctricos de pila de combustible.

⁴³ Un camión eléctrico necesita de una batería muy grande, que ocupa un gran volumen, lo que añade un peso considerable al vehículo. En cambio, con el uso de hidrógeno a altas presiones, se reduce tanto el volumen como el peso en comparación, permitiendo almacenar más energía. El hidrógeno es muy denso energéticamente y requiere menos espacio, lo que resulta en una mayor eficiencia y capacidad de carga para los vehículos pesados.

⁴⁴ Para estos cálculos se ha utilizado un factor de emisión de 3.27 kton CO₂ eq/ktep para el diésel, 2.90 kton CO₂/ktep para la gasolina, y 2.68 kton CO₂/ktep para el GLP.

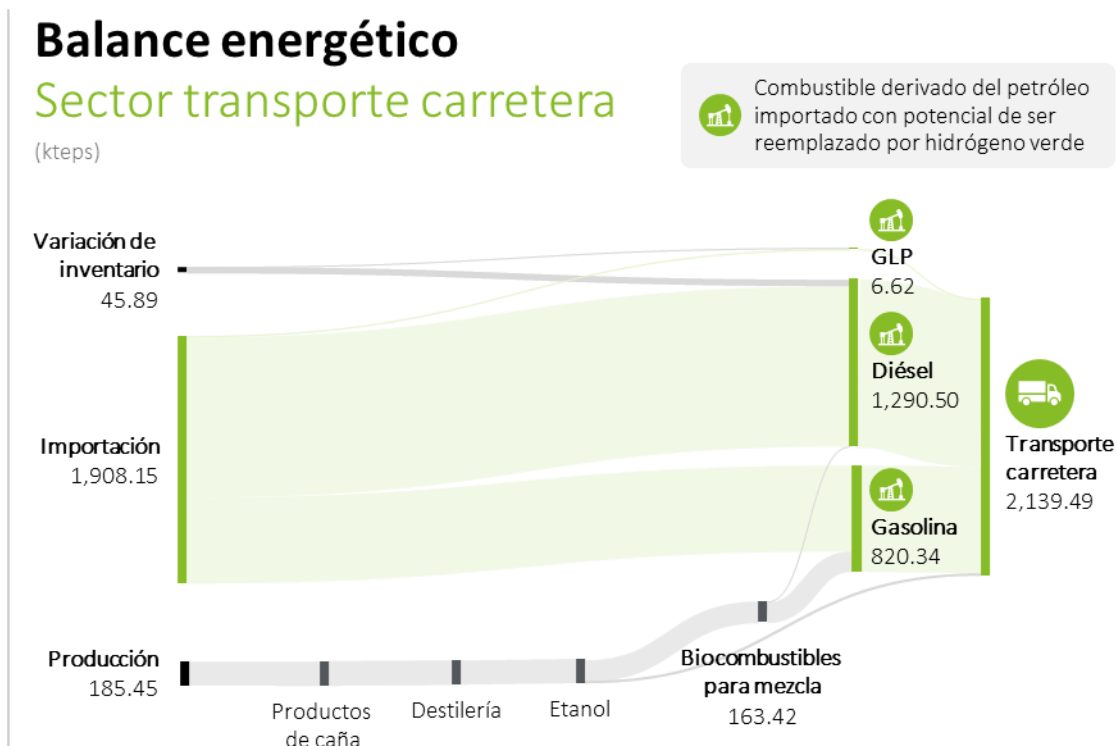


Ilustración 13 - Balance energético nacional del sector transporte carretera para el año 2022⁴⁵

- **Transporte fluvial:** La aplicación del hidrógeno verde en el transporte fluvial se centra habitualmente más en el uso de combustibles derivados como el e-metanol o el amoniaco, así como en la adaptación de la maquinaria empleada en puertos y terminales de carga.⁴⁶

A nivel mundial, su uso está todavía en fase de proyectos de demostración en embarcaciones pequeñas, pero se espera que su viabilidad sea evaluada para su uso en grandes embarcaciones. Su uso futuro por parte de las embarcaciones que operan en la Hidrovía Paraná-Paraguay⁴⁷ representa una gran oportunidad para la descarbonización del transporte en la Hidrovía. No obstante lo anterior, su aplicación en la Hidrovía Paraná-Paraguay precisará de la adaptación de los puertos y terminales de carga, así como una coordinación entre los diferentes países que conforman esta Hidrovía con el objeto de asegurar una distribución estratégica de los puntos de almacenamiento y suministro de este tipo de combustibles.

La aplicación del hidrógeno verde en el transporte fluvial en Paraguay tiene un gran potencial para la reducción de emisiones, especialmente en la Hidrovía Paraná-Paraguay, donde el uso de combustibles derivados como el e-metanol o el amoniaco podría jugar un papel relevante. Concretamente, se proyectan 6.3 ktep de diésel para 2025, lo que, de ser reemplazado por combustibles derivados del hidrógeno, tendría un impacto significativo en la reducción de emisiones. Además, es necesario considerar 55 ktep adicionales que se contabilizan como bunkering y no como consumo interno de Paraguay, pero que igualmente afectan sus emisiones.

⁴⁵ (VMME, 2023).

⁴⁶ Actualmente se identifica mayor potencialidad en el uso del e-metanol en el transporte fluvial en lugar del amoniaco debido a su menor toxicidad y los menores riesgos asociados. Mientras que el amoniaco presenta desafíos significativos en términos de seguridad debido a su naturaleza tóxica y potencial de causar daños graves en caso de fugas, el e-metanol es un compuesto químico más seguro.

⁴⁷ La Hidrovía Paraguay-Paraná es la principal ruta fluvial para Paraguay, permitiendo el transporte eficiente de mercancías desde su territorio hasta el Océano Atlántico y conectando otros países vecinos como Bolivia, Brasil, Argentina o Uruguay.

La sustitución de este diésel por e-metanol en la Hidrovía podría reflejar una reducción de aproximadamente 220 kton de CO₂ equivalente⁴⁸, que incluyen tanto el consumo interno de Paraguay como el bunkering. No obstante, adicionalmente, la Hidrovía es un importante punto de repostaje para embarcaciones internacionales, lo que ofrece una oportunidad para atraer mayor demanda de combustibles verdes si Paraguay los ofrece.

Esto permitiría no solo reducir las emisiones locales, sino también desarrollar una nueva industria de combustibles sostenibles en el país, impulsando la competitividad de Paraguay en el mercado internacional de repostaje de combustibles verdes. Este desarrollo tendría el potencial de transformar la infraestructura de la Hidrovía en un hub regional para combustibles sostenibles, atrayendo más repostajes de barcos que operan en la región, lo que a su vez podría generar nuevos ingresos y oportunidades económicas para el país.

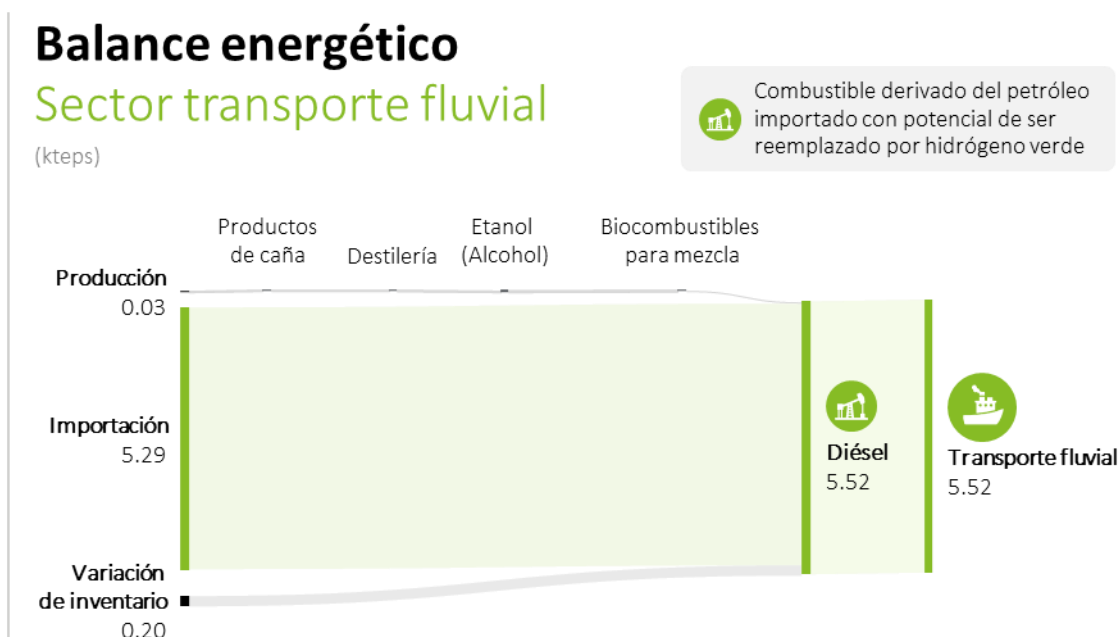


Ilustración 14 - Balance energético nacional del sector transporte fluvial para el año 2022⁴⁹

- **Aviación:** Similar al transporte fluvial, en la aviación se prevé el uso de combustibles sintéticos, como el SAF, en lugar de pilas de combustible.

Estos combustibles representan una alternativa sostenible para la propulsión de aeronaves y la maquinaria utilizada en aeropuertos y terminales de carga. Actualmente, se espera que la producción y uso de SAF se expandan y se beneficien de las economías de escala, lo que eventualmente reducirá sus costos de producción y los hará más accesibles. El SAF tiene la ventaja adicional de requerir mínimos cambios en las aeronaves y en la infraestructura existente de los aeropuertos, lo que facilita su adopción comparada con las pilas de combustible. Este menor requerimiento de adaptación lo convierte en una opción más práctica y económica para la industria aeronáutica, acelerando la transición hacia una aviación más sostenible sin necesidad de realizar grandes inversiones en nuevas tecnologías o infraestructuras.

⁴⁸ El factor de conversión del diésel es de 3.27 kton de CO₂ equivalente por ktep.

⁴⁹ (VMME, 2023).

El potencial de reducción de emisiones en el sector de la aviación en Paraguay mediante el uso de Combustible de Aviación Sostenible (SAF) es significativo. Según las proyecciones para 2025, se estima un consumo de aproximadamente 8 ktep de combustibles fósiles en este sector. Además, se deben tener en cuenta 40 ktep adicionales vinculados al bunkering, lo que incluye repostajes que no se contabilizan como consumo interno pero que impactan directamente en las emisiones del país.

Si se sustituyeran estas casi 50 ktep de combustibles fósiles (keroseno y gasolina) por SAF, se evitarían aproximadamente 150 kton de CO₂ equivalente⁵⁰. Esta cifra incluye tanto el consumo doméstico como el bunkering, destacando la relevancia de esta transición hacia combustibles sostenibles. De hecho, al igual que ocurre en la Hidrovía, los aeropuertos internacionales de Paraguay podrían atraer una mayor demanda de repostajes con SAF, posicionando al país como un hub regional de combustibles sostenibles para la aviación. Este desarrollo no solo reduciría las emisiones, sino que abriría nuevas oportunidades económicas al fomentar la transición hacia combustibles verdes en la región. No obstante, en comparación con el transporte fluvial, el aeropuerto de Paraguay tiene un tránsito más limitado, lo que implica que este enfoque sería más viable en el largo plazo. A medida que crece la demanda internacional de combustibles sostenibles y que las tecnologías se desarrollan, Paraguay podría gradualmente aprovechar esta tendencia, pero el impacto económico y logístico sería más lento de consolidar debido a las limitaciones de tráfico aéreo actual.

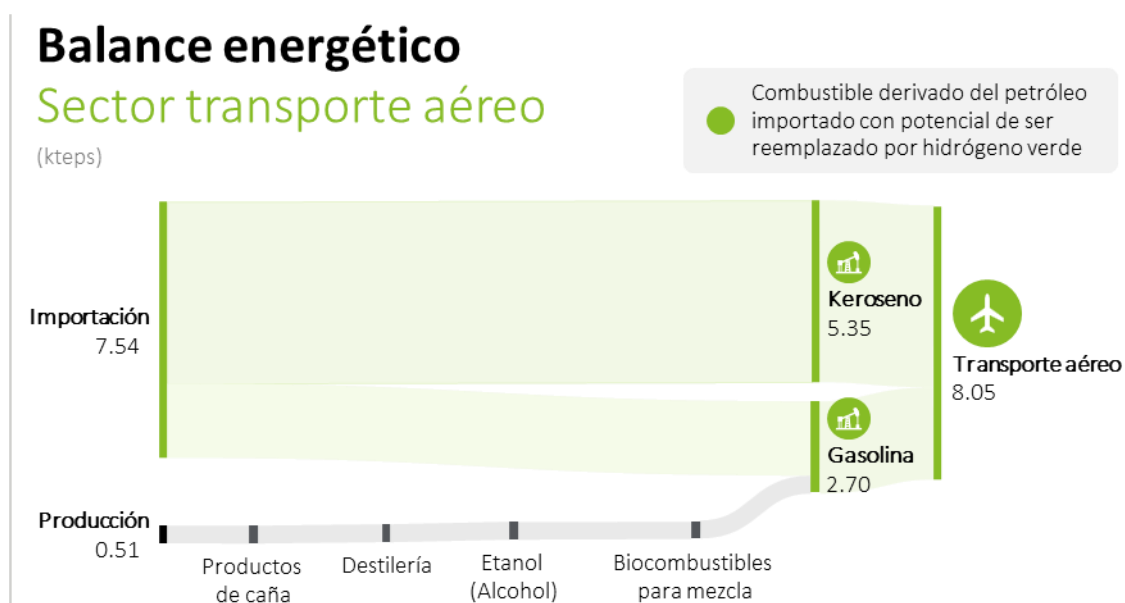


Ilustración 15 – Balance energético nacional del sector transporte aéreo para el año 2022⁵¹

El potencial en el uso del hidrógeno verde en el transporte en Paraguay es considerablemente alto, no sólo en términos de descarbonización sino también con el fin de reducir la dependencia energética exterior, mejorando la seguridad energética del país.

- **Reducción de emisiones:** En el transporte pesado por carretera, la sustitución del diésel y otros combustibles fósiles por hidrógeno verde podría evitar la emisión de entre 7,000 y 7,200 kton

⁵⁰ Los factores de emisión considerados son 3.01 kton CO₂ equivalente por ktep para el keroseno y 2.90 kton CO₂ equivalente por ktep para la gasolina.

⁵¹ (VMME, 2023).

de CO₂ equivalentes para 2025, basándose en las proyecciones actuales. Similarmente, en el transporte fluvial, la sustitución del diésel en la Hidrovía Paraná-Paraguay por combustibles derivados como el e-metanol podría reducir aproximadamente 220 kton de CO₂ equivalente. En el sector aéreo, la transición al Combustible de Aviación Sostenible (SAF) podría evitar hasta 150 kton de CO₂ equivalentes, considerando tanto el consumo doméstico como el bunkering.



Ilustración 16 – Potencial reducción de emisiones GEI del sector transporte⁵²

- **Independencia energética:** Además de los beneficios medioambientales, la adopción del hidrógeno verde también ofrece una oportunidad estratégica para reducir la dependencia energética de Paraguay en relación con las importaciones de combustibles fósiles, que actualmente presentan precios volátiles. Al fomentar el uso de hidrógeno y sus derivados como el e-metanol, el amoníaco o el SAF, el país podría desarrollar su capacidad interna de producción energética sostenible, mejorando su competitividad en el mercado regional e internacional.

No obstante, el hidrógeno verde no solo permitirá a Paraguay descarbonizar sus sectores de transporte, sino también fortalecer su posición como hub regional de combustibles sostenibles, especialmente en la Hidrovía Paraná-Paraguay.

A medida que los mercados internacionales exigen cada vez más soluciones limpias y sostenibles, Paraguay estaría bien posicionado para liderar en la oferta de combustibles verdes, facilitando una transición que no solo tiene un impacto positivo en las emisiones, sino que también impulsa el desarrollo económico del país.

⁵² Análisis propio.

F. Sector eléctrico

El hidrógeno, como vector energético altamente versátil, se posiciona como una herramienta esencial para la integración de diversos sectores energéticos y su descarbonización. Esta capacidad de integración permite proporcionar una mayor flexibilidad, disponibilidad y seguridad energética.

- **Sistema eléctrico nacional:** El hidrógeno verde es una solución clave para la flexibilidad del sector eléctrico, ya que permite almacenar el excedente de electricidad generado por energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica, durante las horas pico de producción. Este hidrógeno se reconvierte en electricidad cuando la demanda es alta y la producción de renovables es baja, equilibrando así la oferta y la demanda en la red eléctrica. Aunque actualmente la hidroeléctrica en Paraguay ofrece una gran flexibilidad y capacidad de almacenamiento de energía, a medida que el país incrementa su capacidad de generación a partir de fuentes renovables no convencionales, el almacenamiento de energía mediante hidrógeno se convertirá en una opción atractiva y necesaria. El hidrógeno verde proporcionará resiliencia y flexibilidad a gran escala, facilitando una integración más efectiva de estas fuentes de energía en la red.⁵³
- **Almacenamiento de energía:** El hidrógeno verde puede ser producido a partir de electricidad generada por fuentes renovables y luego almacenado para su uso posterior en diferentes aplicaciones, un concepto conocido como “Power to X”. Este hidrógeno puede ser utilizado no sólo para generar electricidad, sino también en sectores como el transporte, la industria y la calefacción, proporcionando una flexibilidad adicional en el uso de la energía almacenada. En un futuro donde Paraguay incrementa su capacidad de generación a partir de fuentes renovables no convencionales como la solar y la eólica, el almacenamiento de energía a través del hidrógeno se convertirá en una opción atractiva y necesaria. Este hidrógeno puede reemplazar los combustibles fósiles y, en caso de excedentes, puede almacenarse de manera eficiente y utilizarse posteriormente según sea necesario.

La disponibilidad de infraestructuras óptimas para el transporte del hidrógeno verde en Paraguay es limitada, y sus condiciones de país mediterráneo, sin salida al mar, dificultan todavía más la salida del hidrógeno producido en el país en volúmenes elevados. En este sentido, la producción del hidrógeno verde en la proximidad de potenciales zonas de uso, reduce notablemente las necesidades de inversión.

⁵³ El BID está apoyando el desarrollo de especificaciones técnicas y financiamiento para el diseño y construcción de las dos primeras plantas de energías renovables no convencionales de la ANDE: (i) una mini red y la generación de electricidad renovable en la comunidad indígena de Puerto Esperanza (Bahía Negra) sin acceso a electricidad; y (ii) una planta experimental en el predio de la central hidroeléctrica Acaray con paneles solares fotovoltaicos en tierra, paneles solares fotovoltaicos flotante en el embalse, anemómetro, baterías y back-up con hidrógeno verde. Esta planta demostrativa tiene la finalidad de fortalecer el desarrollo de capacidades técnicas en la ANDE, academia, y centros educativos técnicos. Las plantas se financiarán a través de una operación de crédito en ejecución de ANDE con el BID. (Energía, Abril 2022)

En este sentido, esta Estrategia prioriza los usos finales del hidrógeno verde en las zonas de proximidad a su producción. En concreto, se identifican dos vertientes principales:

- **1. Aplicación en el transporte a partir de la sustitución de combustibles fósiles importados**

Su aplicación en el sector del transporte permitiría reducir notablemente la dependencia exterior en combustibles fósiles, además de contribuir a la descarbonización de estos sectores.

Actualmente, cerca del 25% de la matriz energética de Paraguay se basa en derivados del petróleo importados, siendo el sector del transporte aproximadamente un 84%.

La aplicación del hidrógeno verde, especialmente en el transporte pesado por carretera o el transporte fluvial, modalidades difíciles de electrificar, garantiza una alta autonomía energética a nivel nacional, además de evitar el transporte del hidrógeno producido.

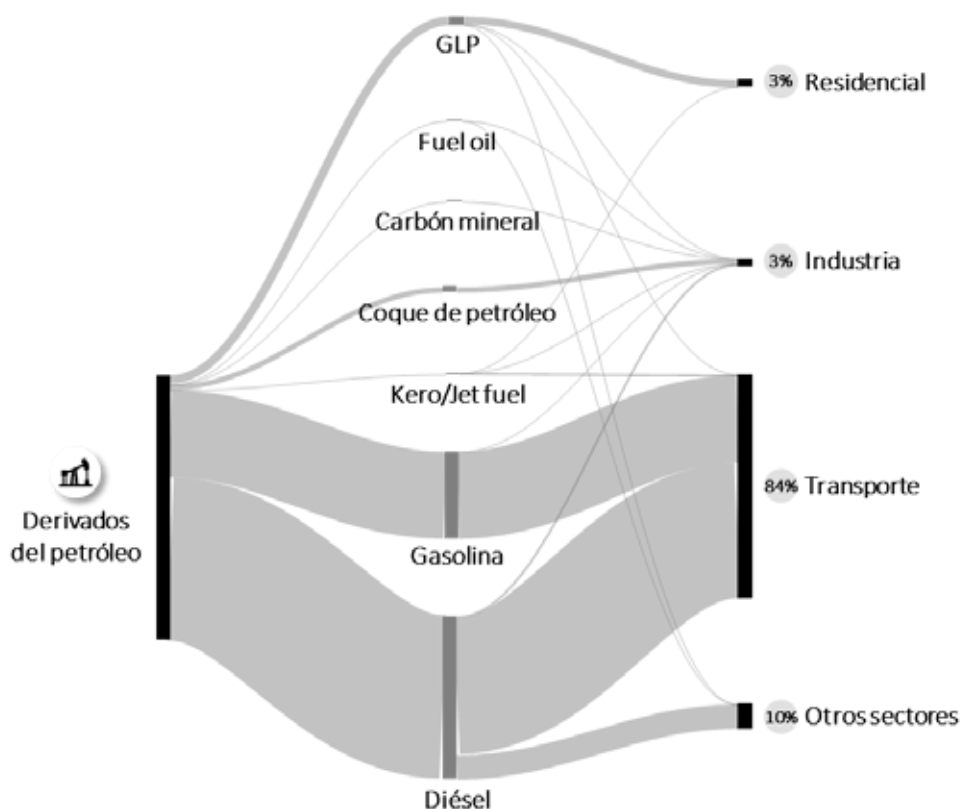


Ilustración 17 - Distribución de los derivados del petróleo por sectores en Paraguay⁵⁴

⁵⁴ (VMME, 2023).

- **Transporte pesado por carretera:**

En términos del parque automotor, Paraguay cuenta con más de 2.8 millones de vehículos registrados en 2022, una cifra que ha aumentado considerablemente en la última década.

Vehículos del parque automovilístico de Paraguay

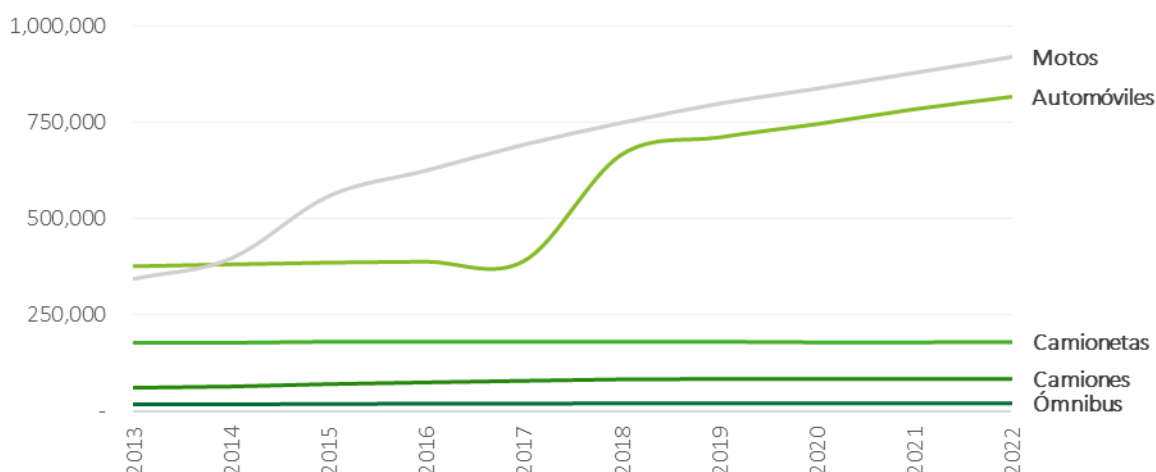


Ilustración 18 - Vehículos del parque automovilístico en Paraguay por tipología⁵⁵

Del total, alrededor de 85,000 corresponden a camiones, que son fundamentales en el transporte de mercancías dentro del país. El segmento de camionetas también juega un papel relevante, con más de 179,000 unidades en circulación. Estos vehículos pesados, que constituyen una parte fundamental del sector transporte, son especialmente difíciles de electrificar, lo que subraya la importancia del hidrógeno verde y sus derivados como una solución viable para este sector.

En el caso de los vehículos ligeros, los automóviles y las motos dominan el parque vehicular. Sin embargo, la adopción de soluciones basadas en e-combustibles, como el e-metanol o el e-diésel, podría acelerar la transición hacia una movilidad más sostenible. Esto es particularmente relevante en un país como Paraguay, que actualmente carece de una infraestructura desarrollada para vehículos eléctricos y donde los vehículos eléctricos suman menos de 1,500 unidades.⁵⁶

El sector transporte es el mayor consumidor de energía en Paraguay, consumiendo aproximadamente 2,200 ktep en 2022.

Además, es responsable de una parte significativa de las emisiones de CO₂ dentro del sector energético. Si bien se espera que el uso de vehículos eléctricos aumente en los próximos años en las zonas urbanas, el transporte pesado y de largo recorrido seguirá siendo una de las principales áreas donde el hidrógeno verde y sus derivados podrán tener un mayor impacto.

⁵⁵ (Paraguay I., 2022).

⁵⁶ ((CADAM), 2023).

• Transporte fluvial:

El transporte fluvial es clave para Paraguay, dado que el país no cuenta con acceso directo al mar. La Hidrovía Paraná-Paraguay es la principal ruta para el comercio y el transporte de mercancías, lo que coloca a Paraguay en una posición estratégica.

Paraguay cuenta con la tercera flota fluvial más grande del mundo, con más de 3,000 barcasas operando en la Hidrovía.⁵⁷

Esta flota ofrece una oportunidad única para integrar e-metanol como combustible, impulsando la descarbonización de la Hidrovía. Se estima que la implementación de combustibles derivados del hidrógeno, como el e-metanol, podría comenzar a mediados de la década de 2030, con un enfoque en proyectos piloto. La infraestructura de metaneras y puntos de recarga en los puertos será crucial para hacer factible esta transición, y, aunque inicialmente la inversión requerida es significativa, el retorno económico puede ser elevado al atraer mayor demanda internacional.

Además, el desarrollo de la producción de e-fuels en hubs cercanos a los puertos de la Hidrovía permitiría que Paraguay abastezca a las embarcaciones que transitan por la vía fluvial de manera más eficiente. Este enfoque también ayudaría a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, como el diésel, que es actualmente el principal combustible usado en la Hidrovía.

El costo del e-metanol se proyecta entre 0.10 y 0.16 USD/kWh⁵⁸, mientras que el diésel ronda por debajo de 0.10 USD/kWh.⁵⁹ Aunque el precio del e-metanol es mayor inicialmente, su adopción a lo largo del tiempo, combinada con políticas de incentivos, podría llevar a una mayor competitividad en comparación con el diésel, especialmente a medida que la presión por descarbonizar el transporte fluvial aumenta.

La producción de e-fuels se presenta como una estrategia clave para el futuro de Paraguay, especialmente si se enfoca en atraer el repostaje de embarcaciones internacionales en la Hidrovía Paraguay-Paraná. Con una fuente confiable de e-combustibles, Paraguay podría mejorar su competitividad regional y aprovechar la creciente demanda internacional de combustibles verdes.

• 2. Nuevos desarrollos industriales

El hidrógeno verde puede ser la base para el desarrollo en Paraguay de nuevas industrias emergentes, tales como la producción de fertilizantes verdes o acero verde. Actualmente, Paraguay importa numerosos productos fabricados con combustibles fósiles, incluyendo la mayoría de los fertilizantes.

⁵⁷ (ASAMAR, s.f.) (Dende, 2022).

⁵⁸ Análisis propio.

⁵⁹ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

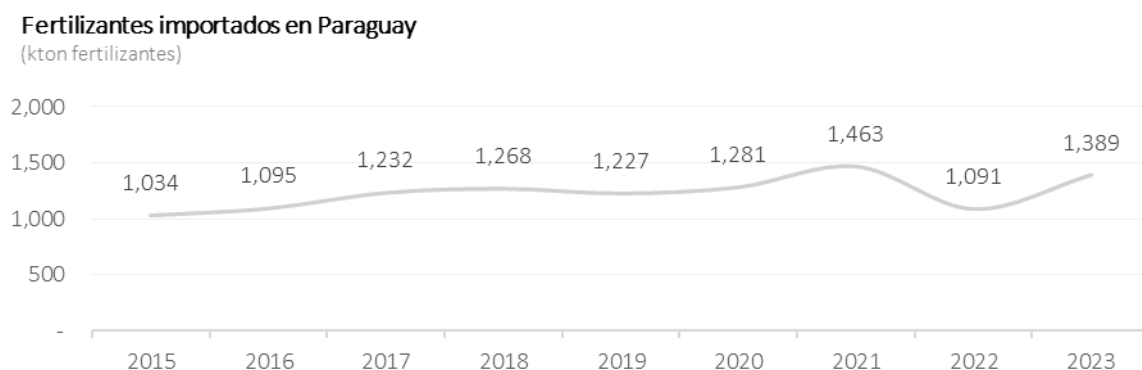


Ilustración 19 – Cantidad de fertilizantes importados en Paraguay históricos y proyección a 2025⁶⁰

Con el hidrógeno verde, el país tiene la oportunidad de reforzar su industria nacional de fertilizantes, produciendo amoníaco verde que no sólo permita cubrir parte de la demanda interna, sino que también pueda posicionar al país como exportador de fertilizantes verdes o sostenibles. Esto no sólo reduciría la dependencia de importaciones, sino que también mejoraría la competitividad de Paraguay en mercados internacionales al ofrecer productos más sostenibles y atractivos para el mercado global. La creación de una industria de fertilizantes basada en hidrógeno verde ofrece múltiples ventajas:

- **Valor añadido:** Los fertilizantes producidos a partir de amoníaco verde no solo tendrían un impacto directo en la balanza comercial del país, sino que también fortalecerían el PIB mediante la creación de empleos directos en sectores como la producción, operación, logística, y mantenimiento.⁶¹
- **Mercado premium:** Los fertilizantes verdes son altamente valorados en mercados internacionales que buscan productos con bajas emisiones de carbono, como la Unión Europea. El precio de mercado de estos productos suele ser más alto, lo que convierte a Paraguay en un proveedor atractivo para países con regulaciones ambientales estrictas.
- **Paquetización del hidrógeno:** Convertir el hidrógeno en fertilizantes o derivados facilita su transporte y minimiza las pérdidas energéticas en el proceso de transformación, lo que aumenta la eficiencia de estos productos en el mercado global.

En Paraguay, 53% de los fertilizantes importados en 2023 podrían ser producidos utilizando amoníaco verde, lo que equivale a unas 451 kton, con un valor aproximado de 366 millones de USD. Entre los fertilizantes más destacados se encuentran el cloruro de potasio (KCl), los fertilizantes con fosfato diamónico (DAP) y los abonos minerales o químicos con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK).

⁶⁰ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

⁶¹ Se estima que una planta de fertilizantes puede generar entre 200 y 400 empleos directos, con picos de actividad que pueden alcanzar hasta 1,300 puestos de trabajo durante fases específicas como la construcción o el mantenimiento intensivo. Además, se crean entre 30 y 40 empleos indirectos, asociados principalmente a la cadena de suministro, servicios logísticos y otras actividades de soporte necesarias para la operación de la planta.

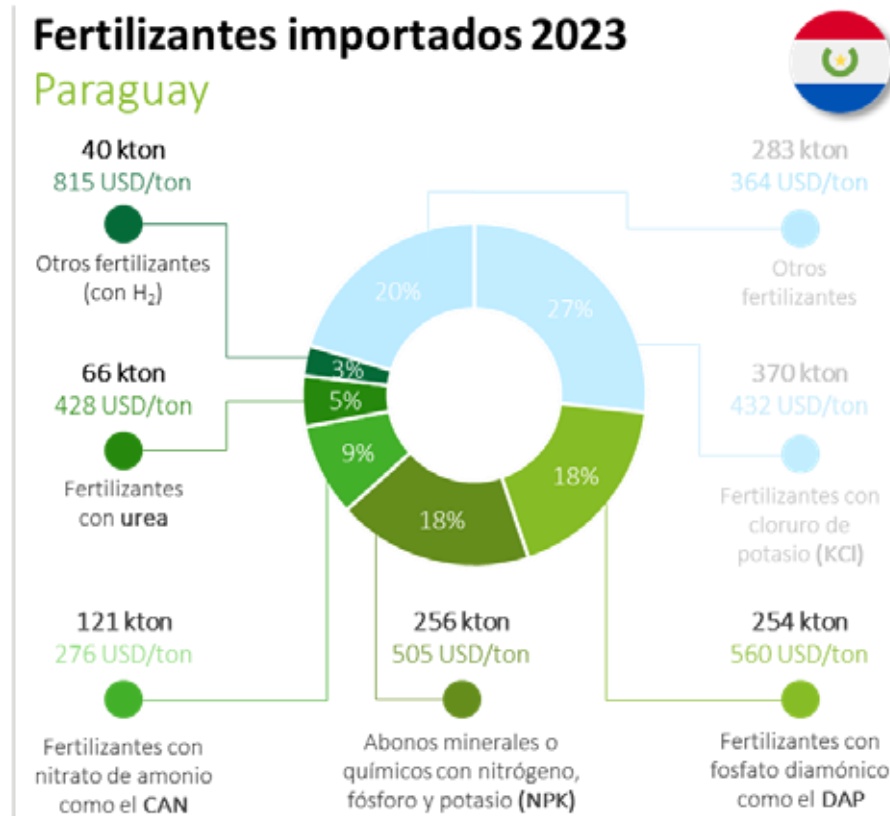


Ilustración 20 – Balance de fertilizantes importados en Paraguay en 2023⁶²

Este enfoque permite a Paraguay atender su demanda interna de fertilizantes, lo que genera mayor estabilidad en los precios y asegura un suministro confiable, factores clave para el desarrollo del sector agrícola. No obstante, el país cuenta con dos opciones estratégicas: si decide enfocarse en satisfacer las necesidades internas, podría garantizar su autosuficiencia y mitigar la volatilidad de precios y suministros externos. Por otro lado, si el objetivo es priorizar los mercados internacionales, Paraguay puede posicionarse como un exportador clave de fertilizantes verdes, capturando mercados que valoran la sostenibilidad y generando ingresos adicionales que fortalecerían su balanza comercial.

En este sentido, para satisfacer la demanda interna, los principales cultivos de Paraguay, como la soja, caña de azúcar, maíz y trigo, dependen de fertilizantes con macronutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Estos insumos resultan clave para mantener los altos niveles de productividad agrícola, que sostienen tanto el consumo local como la competitividad de las exportaciones del país.

Garantizar la disponibilidad de estos fertilizantes, especialmente a partir de fuentes sostenibles como el amoníaco verde, permitiría a Paraguay asegurar su autosuficiencia agrícola y la estabilidad en los precios de los insumos.

⁶² (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

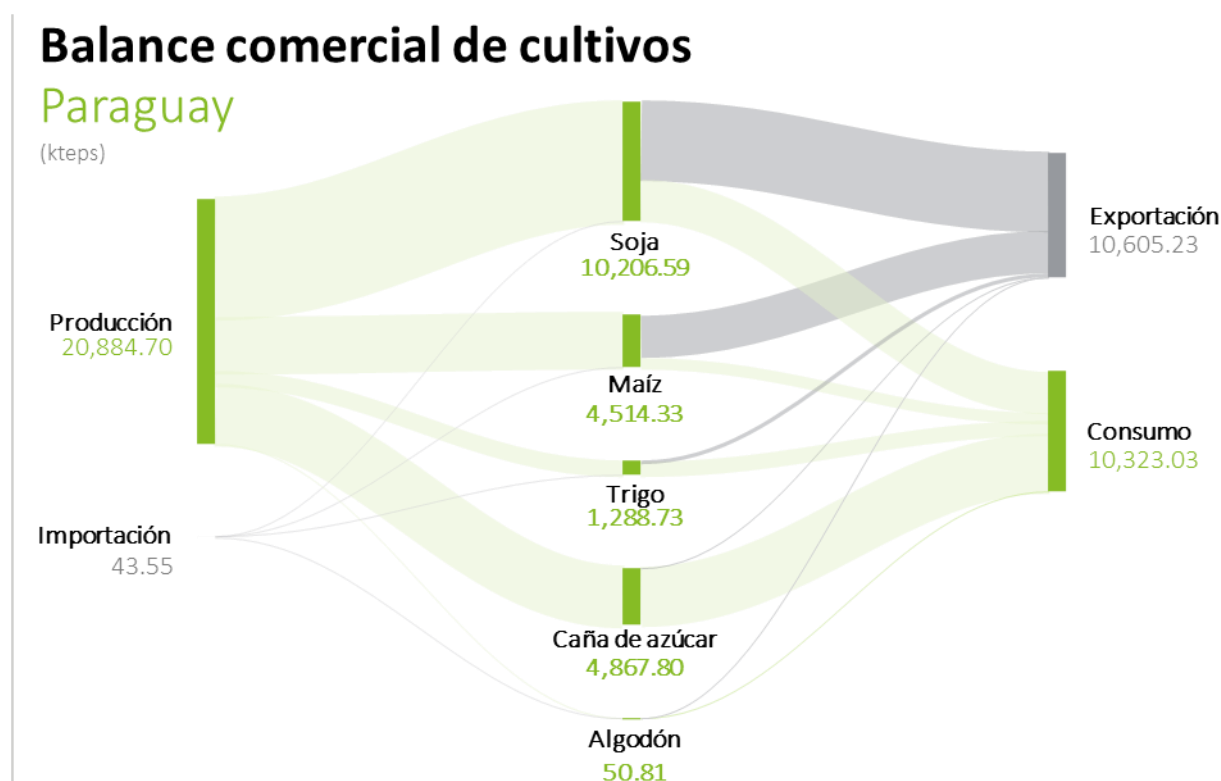


Ilustración 21 – Balance comercial de cultivos en Paraguay⁶³

Por otro lado, Paraguay tiene la capacidad de aprovechar su producción de fertilizantes verdes para exportar a países como Brasil y Argentina, o mercados como el europeo, los cuales presentan una alta demanda de fertilizantes nitrogenados.⁶⁴ Al orientar su producción hacia mercados internacionales, Paraguay podría beneficiarse del creciente interés en productos sostenibles, fortaleciendo su posición como proveedor regional de fertilizantes verdes y mejorando su balanza comercial mediante la exportación de insumos estratégicos.

La demanda global de fertilizantes ha crecido constantemente en las últimas décadas, y se proyecta que podría superar las 200,000 kton para 2050, lo que subraya la importancia de la producción sostenible.

⁶³ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024). Análisis propio.

⁶⁴ En Brasil, el 54 % de los fertilizantes importados, equivalentes a 22.2 millones de toneladas, podrían incorporar amoníaco verde en su proceso de producción. Este volumen de importación tiene un valor de aproximadamente 7,896 millones de USD. Entre los principales fertilizantes importados en Brasil se destacan el cloruro de potasio (KCl), la urea y el fosfato diamónico (DAP), lo que convierte a este país en un mercado relevante para la exportación de fertilizantes sostenibles provenientes de Paraguay. De manera similar, Argentina muestra una elevada demanda de fertilizantes nitrogenados, con un 90 % de sus importaciones, equivalentes a 2.5 millones de toneladas, que podrían utilizar amoníaco verde en su producción. Estas importaciones representan un valor aproximado de 1,059 millones de USD, y se concentran principalmente en fertilizantes que contienen urea y DAP. Europa también se perfila como un mercado estratégico, con un 87 % de sus fertilizantes que podrían ser producidos a partir de amoníaco verde. En este caso, el crecimiento en la importación de fertilizantes en la región resalta la importancia de productos más sostenibles, como los que contienen nitrato de calcio y amonio (CAN), que representa el 30% de su matriz. Este mercado busca activamente soluciones que reduzcan la huella de carbono, lo que representa una oportunidad para la exportación de fertilizantes verdes desde Paraguay. (Research and Markets, 2022).

En este contexto, los fertilizantes derivados del hidrógeno verde se posicionan como una alternativa viable para satisfacer esta creciente demanda, mientras se alinean con las metas globales de descarbonización.



Fertilizantes derivados del hidrógeno con potencial de transición a hidrógeno verde

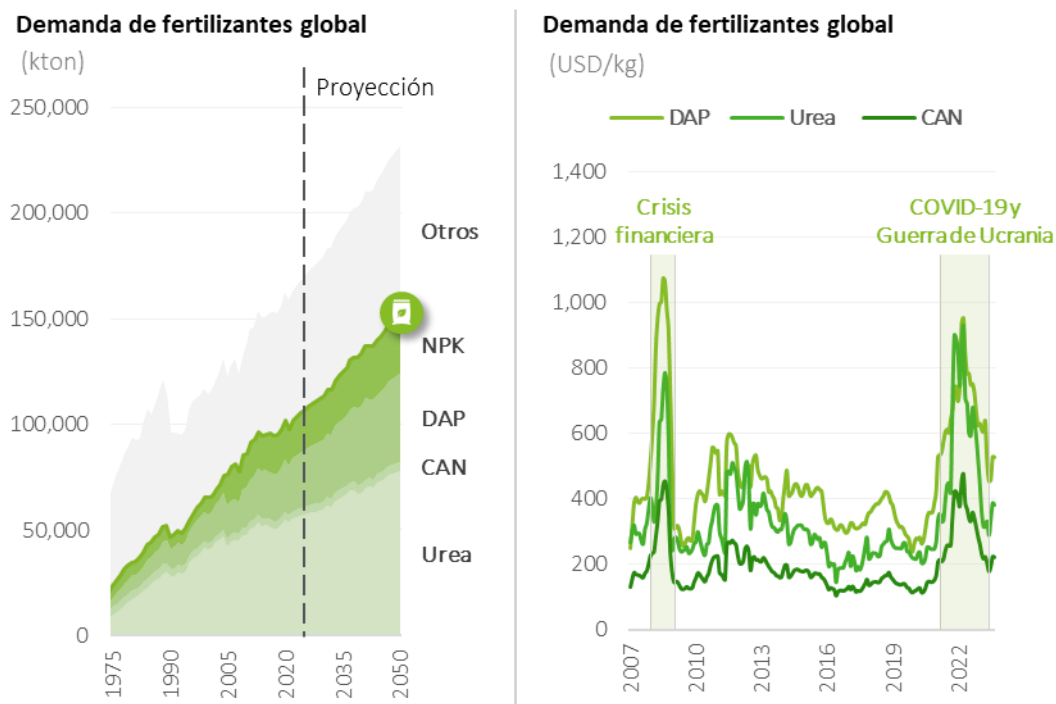


Ilustración 22 – Demanda de fertilizantes global, histórica y proyectada a 2050 y sus precios históricos⁶⁵

El mercado internacional ofrece una oportunidad considerable para que Paraguay exporte fertilizantes verdes, particularmente a países con regulaciones ambientales estrictas y mercados dispuestos a pagar un sobreprecio por productos sostenibles, además de mercados de proximidad, como Brasil con una creciente demanda de fertilizantes. La demanda de fertilizantes derivados del hidrógeno ha mostrado un crecimiento sostenido y, a pesar de la volatilidad de los precios, estos productos continúan siendo altamente valorados, especialmente en épocas de crisis globales, lo que resalta su potencial como una inversión estratégica.

Esto no solo mejoraría la balanza comercial del país, sino que también fortalecería su posición como proveedor de soluciones agrícolas sostenibles a nivel mundial. Al aprovechar las fluctuaciones de precios y la creciente demanda de fertilizantes sostenibles, Paraguay puede posicionarse como un exportador competitivo de fertilizantes sostenibles en mercados internacionales que buscan reducir su huella de carbono.

⁶⁵ (Research and Markets, 2022).

Al hacerlo, Paraguay avanzaría en la construcción de una economía más verde y resiliente, capaz de enfrentar los desafíos ambientales y económicos del futuro.

Estas aplicaciones representan un paso hacia una economía más verde, ofreciendo oportunidades para innovar y desarrollar nuevas tecnologías que maximicen la eficiencia y la sostenibilidad del hidrógeno verde. La adopción de estas tecnologías en Paraguay podría reforzar el posicionamiento del país como uno de los principales países de la región en materia de transición energética, aprovechando sus abundantes recursos renovables para producir y utilizar hidrógeno verde de manera efectiva.



2. LA OPORTUNIDAD DEL HIDRÓGENO VERDE EN PARAGUAY

2.1 Producción de hidrógeno verde en Paraguay

Paraguay cuenta con abundantes recursos hídricos y una sólida infraestructura hidroeléctrica, además de un gran potencial renovable para el desarrollo de nuevos proyectos de generación eléctrica sostenible. La disponibilidad de todos estos recursos le proporciona una ventaja diferencial para la producción de hidrógeno verde, en relación con otros países. La combinación de diferentes fuentes de generación eléctrica renovable, con una base sólida de su infraestructura hidroeléctrica disponible, garantiza un suministro continuo y sostenible de hidrógeno verde.

La Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay sienta las bases para la integración del hidrógeno verde en el sistema energético nacional, permitiendo adicionalmente una transición gradual y sostenible hacia un modelo de producción eléctrica más autónomo y diversificado.

En este sentido, una producción de hidrógeno verde optimizada requiere ubicaciones estratégicas de los electrolizadores, que optimicen el acceso a la red y a la generación eléctrica y que, a su vez, se encuentren próximos a la demanda o rutas logísticas para la distribución de los productos derivados del hidrógeno verde que se produzca, con objeto de minimizar los costos y las necesidades de nuevas inversiones. A continuación, se analizan algunos aspectos clave que definirán las principales ubicaciones estratégicas para su desarrollo en Paraguay.

- **Disponibilidad de recursos naturales y fuentes de energía para producir hidrógeno verde**

A. Recurso hídrico

Paraguay, situado en el corazón de la cuenca del Plata, cuenta con una abundancia significativa de recursos hídricos que lo posicionan favorablemente para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde.

Los ríos Paraguay y Paraná son los dos principales cursos de agua del país, aportando caudales sustanciales que no sólo facilitan el transporte fluvial y el comercio a través de la Hidrovía Paraguay Paraná, sino que también alimentan la infraestructura hidroeléctrica esencial para la generación de energía renovable.⁶⁶

El río Paraguay⁶⁷, con una cuenca de aproximadamente 1,103,000 km² y un caudal de alrededor de 2,700 m³/s, y el río Paraná⁶⁷, cuya extensión asciende a unos 1,510,000 km² y un caudal aproximado de 17,290 m³/s, son fundamentales para la sostenibilidad y desarrollo económico del país. Además, Paraguay alberga dos grandes acuíferos: el Acuífero Guaraní⁶⁸, uno de los más grandes del mundo, con una extensión aproximada de 87,500 km² y una capacidad estimada de 30,000 km³, y el Acuífero Yrenda⁶⁹, que, aunque contiene principalmente agua salada, contribuye significativamente al sistema acuífero del país con una extensión de aproximadamente 180,000 km².

La red hídrica de Paraguay se complementa con numerosos ríos nacionales, como el río Acaray, así como lagos importantes como los lagos Ypoá e Ypacaraí, además de un régimen de lluvias favorable, con precipitaciones medias anuales de hasta 2,000 mm en algunas regiones.⁷⁰ Esta abundancia hídrica no sólo proporciona agua suficiente para diversas aplicaciones, sino que también sostiene ecosistemas ricos y biodiversos, reforzando la sostenibilidad ambiental a largo plazo. Para la producción de hidrógeno verde, es esencial contar con fuentes de agua abundantes y accesibles. Los recursos hídricos superficiales y subterráneos disponibles en Paraguay, incluidos los ríos y acuíferos mencionados, son adecuados para este fin. Además, la calidad del agua es un factor crítico, siendo preferible el uso de agua dulce debido a su menor necesidad de tratamiento previo a la electrólisis.

La abundancia de recursos hídricos en Paraguay, combinada con su baja presión sobre estos recursos, coloca al país en una posición ventajosa para la producción sostenible de hidrógeno verde. Paraguay se destaca por su elevada disponibilidad de agua per cápita y una cantidad considerable de recursos hídricos renovables, lo que es una ventaja significativa para la producción de hidrógeno verde a gran escala.

La ubicación estratégica de electrolizadores cerca de estas fuentes de agua garantiza una producción eficiente y sostenible.

⁶⁶ El río Paraná es el emplazamiento de las dos principales instalaciones hidroeléctricas que abastecen de electricidad a Paraguay: la represa de Itaipú, compartida con Brasil, y la represa de Yacyretá, compartida con Argentina.

⁶⁷ (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

⁶⁸ (Gobierno de la República Oriental del Uruguay, 2022).

⁶⁹ (Fernando Larroza, 2005).

⁷⁰ (Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, 2019).

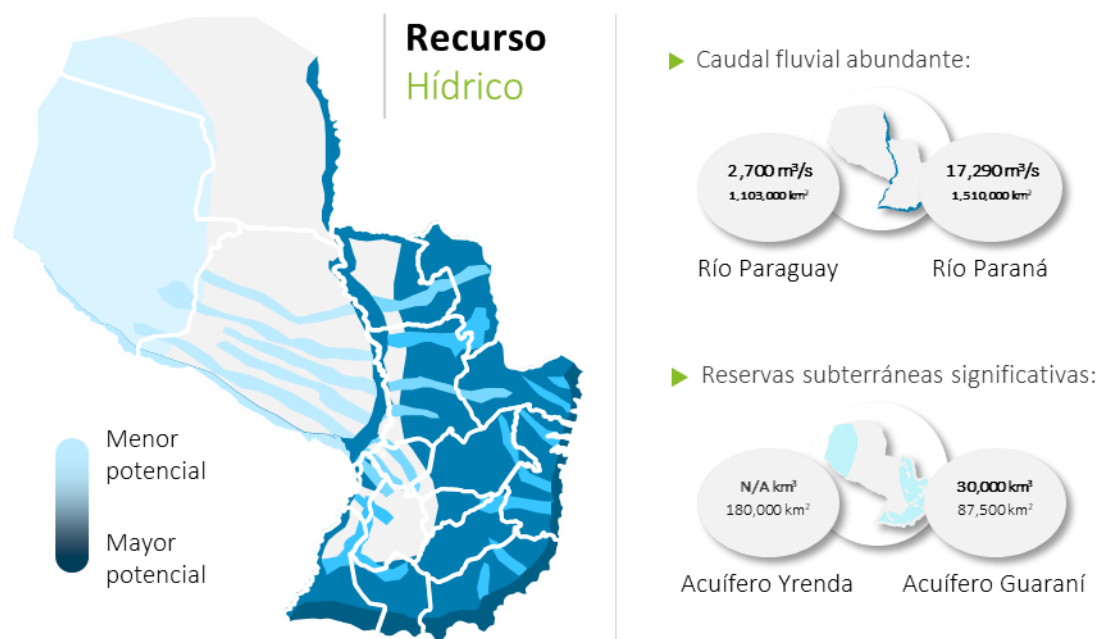


Ilustración 23 - Mapa ilustrativo del potencial del recurso hídrico en Paraguay⁷¹

La disponibilidad de agua de calidad y fácilmente accesible es fundamental para asegurar la eficiencia y viabilidad de la producción de hidrógeno verde en el país. La red hídrica de Paraguay, con sus ríos, lagos y acuíferos, ofrece las condiciones más favorables para el establecimiento de operaciones de hidrógeno verde.

El marco regulatorio paraguayo para el uso del agua, establecido en la Ley N° 3239 de los Recursos Hídricos⁷², prioriza el uso de los recursos hídricos en actividades como el consumo humano, la preservación de ecosistemas acuáticos y la generación de energía.

Aunque esta legislación proporciona una base para la gestión del agua en el país, no contempla específicamente la producción de hidrógeno verde, lo cual requerirá ajustes normativos para asegurar una integración adecuada de esta nueva industria.

Actualmente, cualquier uso industrial del agua, como sería la producción de hidrógeno verde, debe realizarse bajo la obligatoriedad de una evaluación de impacto ambiental (EIA). Dado el crecimiento del hidrógeno verde como una tecnología clave en la transición energética, se espera que el Plan Nacional de Recursos Hídricos, desarrollado por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), incluya directrices adaptadas para este tipo de proyectos, asegurando que el desarrollo industrial sea compatible con los objetivos de sostenibilidad y la preservación de los recursos hídricos del país.⁷³

⁷¹ (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), (Crespo, 2000), (Instituto Nacional de Estadística, 2023) Análisis propio.

⁷² (Gobierno Nacional de Paraguay, 2014).

⁷³ En la Unión Europea, la instalación de electrolizadores requiere licencias específicas para la extracción de agua, un criterio que se espera sea incluido en el futuro Plan Nacional de Recursos Hídricos de Paraguay para abordar las especificidades del hidrógeno verde (MADES, 2020).

G. Recurso eléctrico 100% renovable

Paraguay se encuentra en una posición privilegiada para el desarrollo del hidrógeno verde gracias a su infraestructura de generación energética renovable.

El sistema eléctrico del país, basado en energía hidroeléctrica, permite una producción constante y sostenible de electricidad. Las tres principales centrales hidroeléctricas, Itaipú, Yacyretá y Acaray, son responsables de la totalidad de la producción eléctrica del país, generando un total de 43,880 GWh de electricidad en 2022.⁷⁴

Aproximadamente el 79.4% de esta energía proviene de Itaipú, resaltando su importancia en el mix eléctrico nacional. Con una capacidad hidroeléctrica que abastece el 100% de la demanda y con solo el 33% de la producción destinada al consumo nacional, Paraguay podría tener una disponibilidad inmediata de energía renovable que facilitaría la implementación de proyectos de hidrógeno verde de manera eficiente y sostenible.

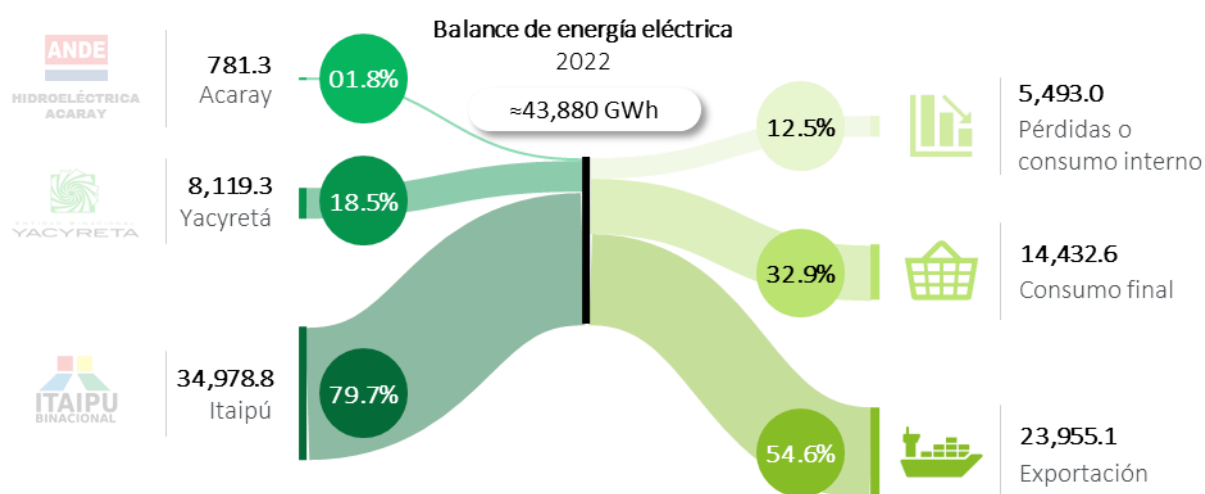


Ilustración 24 - Principales recursos eléctricos en Paraguay⁷⁴

El sistema eléctrico nacional de Paraguay tiene previsto un crecimiento significativo en los próximos años. El Plan Maestro de Generación 2021-2040⁷⁵ de la ANDE prevé la incorporación de nuevas instalaciones de generación renovable, como parques solares y eólicos, y la expansión de infraestructuras existentes. Esto no sólo permite mantener la autosuficiencia energética, sino que también apoyará el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, aprovechando tanto la capacidad hidroeléctrica actual como el potencial de las nuevas tecnologías renovables.

⁷⁴ (VMME, 2023).

⁷⁵ (ANDE, 2021).

Paraguay cuenta con un considerable potencial para el desarrollo de energía solar y eólica. Las zonas del norte del país presentan altos niveles de radiación solar, ideales para la instalación de parques solares fotovoltaicos.⁷⁶ De igual manera, la región noroeste cuenta con condiciones favorables de viento, lo que permite el desarrollo de proyectos eólicos. La integración progresiva de estas nuevas instalaciones de generación renovable, con los electrolizadores, mejorará la eficiencia del sistema y reducirá las pérdidas energéticas.

La combinación de estos recursos naturales con una planificación estratégica permitiría a Paraguay obtener un posicionamiento relevante en la producción de hidrógeno verde en la región. Paraguay se encuentra en una posición estratégica para aprovechar su excedente de energía hidroeléctrica en la producción de hidrógeno verde, pero este proceso se debe desarrollar bajo ciertos lineamientos que garanticen la sostenibilidad y la gestión responsable de sus recursos energéticos. Aunque actualmente gran parte de la energía proviene de sus hidroeléctricas, como Itaipú y Yacyretá, la estrategia nacional tiene como objetivo integrar nuevas fuentes renovables, como la solar y eólica, a medida que el sistema eléctrico se amplie y se diversifique.

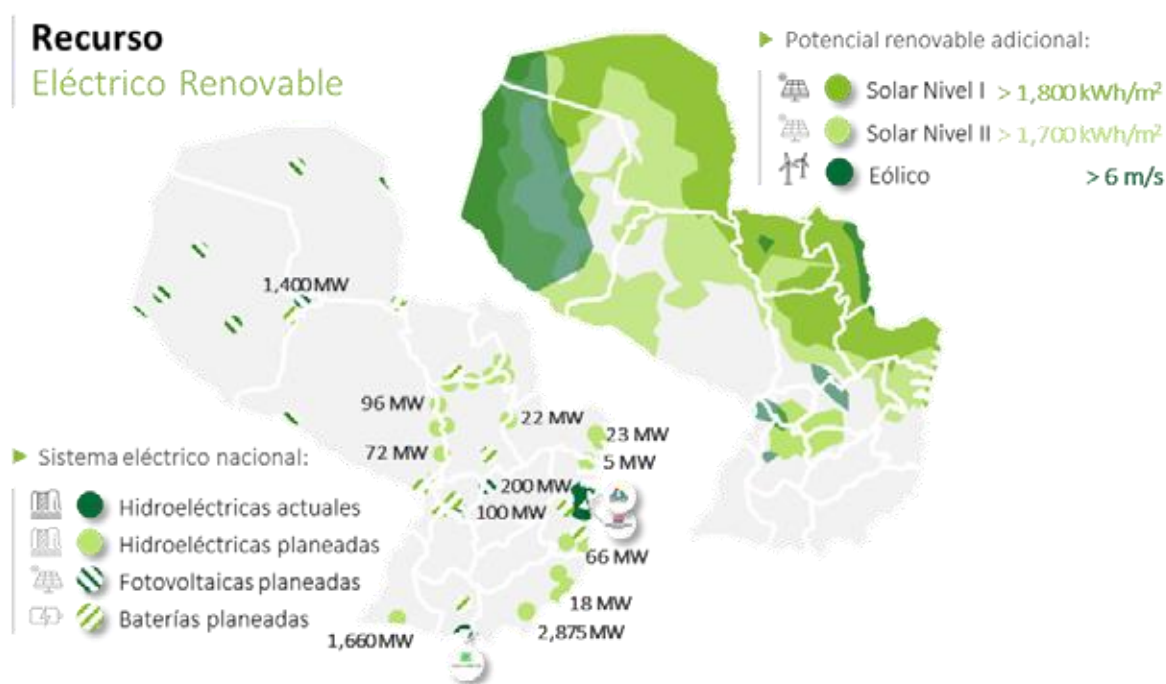


Ilustración 25 – Mapa ilustrativo del potencial del recurso eléctrico renovable de Paraguay⁷⁷

La producción de hidrógeno verde en Paraguay no se basa exclusivamente en el uso irrestricto de la energía disponible en la red. A pesar de los excedentes energéticos actuales, la electricidad renovable que se extrae de la red para estos proyectos estará regulada y sujeta a ciertos límites, priorizando siempre el abastecimiento de la demanda interna del país. De este modo, aunque el hidrógeno verde puede aprovechar el excedente energético existente de forma inmediata, esto no

⁷⁶ Además, existe cierto potencial para aprovechar los embalses de las centrales hidroeléctricas del país mediante la instalación de sistemas de energía solar flotante, lo que permitiría una utilización más eficiente del espacio y los recursos disponibles.

⁷⁷ (ANDE, 2021) (PTI-PY / Itaipu, 2014) Análisis propio.

implica una disponibilidad ilimitada de recursos. En todo momento, se priorizará el consumo doméstico y otras posibles necesidades del país.

Además, cualquier proyecto que busque producir hidrógeno verde deberá cumplir con un requisito clave: la instalación progresiva de plantas de generación renovable adicionales.⁷⁸ Es decir, los electrolizadores que utilicen electricidad de la red para producir hidrógeno deberán estar respaldados por la construcción de nuevas infraestructuras solares y/o eólicas que sean capaces de suministrar la misma cantidad de energía consumida.

Si bien el electrolizador puede aprovechar los excedentes en el corto plazo, la estrategia a largo plazo garantiza que cada instalación esté sustentada por energía renovable adicional, asegurando así la sostenibilidad del proyecto y el cumplimiento de objetivos ambientales.

Esta medida representa una ventaja competitiva frente a otras regiones, como la Unión Europea, donde la normativa exige que las instalaciones de energías renovables estén en funcionamiento antes de la operación de los electrolizadores.⁷⁹ En Paraguay, este proceso es más flexible, lo que permite acelerar el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y dinamizar la economía asociada, mientras se asegura que, a mediano y largo plazo, los proyectos sean completamente sostenibles y alimentados por energía renovable adicional.

La disponibilidad inmediata de energía hidroeléctrica y el potencial para un futuro despliegue de nuevas tecnologías de generación renovable favorecen una producción futura de hidrógeno verde de manera extremadamente competitiva en Paraguay.

- **Infraestructuras disponibles y planificadas para el transporte del hidrógeno verde**

H. Ubicación y conexión con mercados internacionales

Paraguay está localizado estratégicamente como un eje central en la logística de América Latina, contando con proyectos significativos como el Corredor Bioceánico o la Hidrovía Paraguay-Paraná.

Por una parte, el Corredor Vial Bioceánico⁸⁰ es una infraestructura vial que conectará el océano Atlántico en Brasil, pasando por Paraguay y Argentina, hasta llegar a los puertos del Pacífico en el norte de Chile. Este proyecto es especialmente relevante en Paraguay, donde se está construyendo una ruta de 531 kilómetros con una inversión estimada de 450 millones de dólares.⁸¹ Se espera que el Corredor facilite un ahorro considerable en tiempo y distancia para el transporte de mercancías⁸²,

⁷⁸ Ver Medida 9: Desarrollar una regulación que promueva la adicionalidad eléctrica para proyectos de hidrógeno verde conectados a la red.

⁷⁹ (Comisión Europea, 2023) (Comisión Europea, 2023) (Consejo de la Unión Europea, 2023).

⁸⁰ (MOPC, s.f.).

⁸¹ (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2014).

⁸² Este avance representará un ahorro estimado de 15 días de navegación y 8 mil kilómetros por trayecto en buques con carga de exportación. (La Nación, 2022).

mejorando así la eficiencia en la exportación hacia mercados como Asia y la costa oeste de Estados Unidos. Además, este Corredor no sólo acortará distancias y tiempos de transporte, sino que también podrá potenciar la integración regional y la capacidad de Paraguay para movilizar productos a escala global, incluyendo productos del hidrógeno verde y sus derivados.

Por otro lado, la Hidrovía Paraguay-Paraná, juega un papel relevante en la logística del transporte acuático en la región. Esta Hidrovía, que discurre a lo largo de los ríos Paraguay y Paraná, permite la navegación desde el interior del continente hasta el Río de la Plata y el Océano Atlántico, pasando por países vecinos, conectando Paraguay con mercados internacionales y facilitando así las posibilidades de exportación. Asimismo, Paraguay en la actualidad cuenta con más de 50 empresas operando en esta vía y más de 3,000 barcasas que circulan por ella⁸³, la Hidrovía es un activo logístico para Paraguay, ofreciendo una vía eficiente para exportar sus productos, incluidos productos derivados del hidrógeno verde, y se prevé que el incremento en el comercio internacional aumentará el tránsito y la capacidad de exportación del país.

La consolidación de estos dos grandes proyectos de infraestructura permitirá destacar aún más a Paraguay como un centro logístico relevante en América Latina, mejorando su capacidad para exportar productos a mercados internacionales.

► Infraestructuras logísticas:



► Flota fluvial paraguaya relevante:



Ilustración 26 - Principales infraestructuras de transporte de hidrógeno en Paraguay^{80 81 82 83}.

Aunque Paraguay cuenta con una infraestructura logística destacada, la capacidad actual de estas rutas para manejar el transporte de hidrógeno verde y sus derivados presenta ciertos desafíos.

La Hidrovía Paraguay-Paraná y el Corredor Bioceánico son eficientes para el transporte de mercancías tradicionales, no obstante, la logística del transporte de hidrógeno y derivados requiere condiciones técnicas especiales, sobre todo en lo que respecta a la capacidad de carga y la profundidad de las embarcaciones.

- El transporte marítimo global de hidrógeno y derivados demanda embarcaciones de gran tonelaje y profundidad. Estas embarcaciones, necesarias para transportar grandes volúmenes de hidrógeno y sus derivados de manera segura, no pueden navegar adecuadamente por la Hidrovía debido a las limitaciones de calado. Esto reduce la capacidad de Paraguay para usar este canal como una ruta eficaz de exportación a corto plazo para el hidrógeno y sus productos

⁸³ (ASAMAR, s.f.) (Dende, 2022).

derivados, limitando su competitividad en los mercados internacionales de hidrógeno en comparación con otras naciones.

- En el caso del Corredor Bioceánico y otras rutas terrestres, si bien son alternativas viables, presentan altos costos logísticos. El uso de camiones para transportar grandes volúmenes de hidrógeno no es económicamente eficiente ni sostenible a largo plazo. La necesidad de realizar múltiples envíos en vez de un transporte masivo aumenta significativamente los costos operativos, haciendo que estas opciones solo sean viables en escenarios limitados.

Por tanto, para poder transportar hidrógeno y derivados de forma eficiente, Paraguay deberá realizar inversiones estratégicas en su infraestructura de transporte. Estas inversiones incluyen la adecuación de la Hidrovía Paraguay-Paraná, enfocándose en mejorar el calado para permitir la navegación de embarcaciones más grandes. Además, se requiere el desarrollo de la infraestructura portuaria para manejar el transporte especializado de productos derivados del hidrógeno, como el amoníaco y el e-metanol, que también son clave para la comercialización global. Asimismo, sería relevante evaluar la posibilidad de construir ductos pequeños o sistemas especializados dentro de zonas industriales clave, lo que facilitaría el transporte del hidrógeno hacia puertos y mercados internacionales.

Este enfoque permitiría a Paraguay consolidar una red de logística más eficiente, competitiva y preparada para manejar los volúmenes de hidrógeno verde y derivados que se proyectan a futuro, acelerando su integración en el comercio global, y en especial con países próximos como Brasil.

• **Ubicaciones para la producción de hidrógeno verde en Paraguay**

Aunque la producción de hidrógeno puede establecerse en cualquier zona donde exista una demanda que lo requiera, es relevante tener en consideración que Paraguay cuenta con varias zonas que destacan por su alto potencial para la producción de hidrógeno verde, gracias a la combinación de abundantes recursos hídricos, elevado potencial de energía solar y eólica, y una infraestructura eléctrica con capacidad de crecimiento para permitir el acceso al sistema eléctrico.

El análisis de las ubicaciones óptimas para la producción de hidrógeno verde en Paraguay se realiza mediante una metodología que considera criterios técnicos, logísticos y ambientales.

En primer lugar, se excluyen las áreas protegidas y las zonas ecológicamente sensibles, asegurando que la producción no comprometa ecosistemas clave. Posteriormente, se identifican áreas donde convergen recursos hídricos abundantes, esenciales para la electrólisis, y acceso cercano a fuentes de energía renovable, como las centrales hidroeléctricas, parques solares o eólicos, lo que garantiza un suministro energético eficiente y constante. La proximidad a la red eléctrica también es crítica, permitiendo optimizar la transmisión de energía hacia los electrolizadores, minimizando pérdidas y reduciendo costos operativos.

Para asegurar la viabilidad de las zonas de producción, se seleccionan ubicaciones cercanas a fuentes de energía renovable confiables, ya sea mediante la construcción de nuevos parques

solares y eólicos o mediante el aprovechamiento de los excedentes de las centrales hidroeléctricas existentes. La conexión a la red eléctrica es fundamental, tanto para garantizar un suministro de energía estable como para maximizar la eficiencia operativa de los electrolizadores.

Este enfoque permite aprovechar al máximo los recursos disponibles y reducir los costos asociados al transporte de energía hacia las plantas de hidrógeno verde, que a su vez deben contar con un acceso sencillo a subestaciones eléctricas.

Además, el análisis se orienta hacia la identificación de centros de demanda de hidrógeno o zonas industriales cercanas a infraestructuras logísticas clave, como la Hidrovía Paraguay-Paraná y el Corredor Bioceánico. Estas áreas son estratégicas tanto para reducir los costos de transporte y almacenamiento del hidrógeno como para facilitar su exportación hacia mercados internacionales. Así, la ubicación óptima de los electrolizadores no solo depende de los recursos energéticos e hídricos, sino también de la cercanía a centros de consumo y rutas de exportación, asegurando la competitividad de Paraguay en el mercado del hidrógeno verde.

Estas regiones son óptimas para la instalación de electrolizadores debido a su capacidad de ofrecer una producción eficiente y sostenible de hidrógeno verde, garantizando un suministro constante y aprovechando al máximo los recursos naturales disponibles.

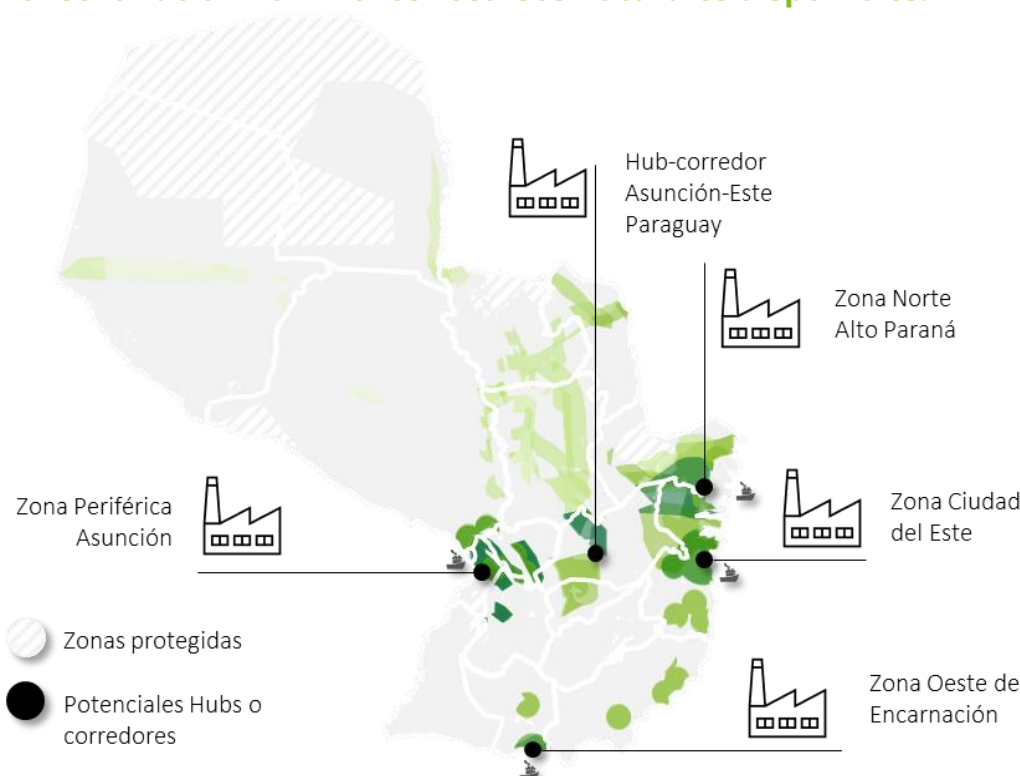


Ilustración 27 - Mapa ilustrativo de ubicaciones óptimas para hubs o corredores de hidrógeno verde⁸⁴

⁸⁴ Las zonas identificadas en el mapa representan áreas con un alto potencial para convertirse en hubs estratégicos de hidrógeno verde en Paraguay. Estas zonas han sido seleccionadas tras un exhaustivo análisis que considera la disponibilidad de recursos hídricos, el acceso a energía renovable,

Estas zonas identificadas se perfilan como centros estratégicos para la producción de hidrógeno verde. No sólo tienen la capacidad de satisfacer la demanda interna, encontrándose en zonas de desarrollo industrial próximo, sino que también están bien posicionadas para facilitar la exportación, aprovechando infraestructuras clave como la Hidrovía Paraguay-Paraná y los corredores viales.

Esto permite que Paraguay maximice su potencial como productor y exportador de hidrógeno verde, impulsando así su desarrollo económico y consolidando su papel en el mercado energético sostenible.

2.2 Usos finales del hidrógeno verde en Paraguay

El transporte implica un incremento en el costo del hidrógeno verde, especialmente en países como Paraguay sin salida al mar. Esta Estrategia prioriza la producción del hidrógeno verde en la proximidad de potenciales zonas de uso, minimizando no solo las necesidades de inversión en infraestructuras logísticas sino también la complejidad del transporte a grandes distancias.

El uso industrial de este hidrógeno en procesos productivos, como los fertilizantes verdes, o el uso en el transporte fluvial, permite consumos de proximidad en las zonas de producción de hidrógeno verde, eliminando desarrollos logísticos y de infraestructuras difíciles de acometer en el corto plazo. De esta manera, Paraguay puede optimizar la logística mediante la localización estratégica de los centros de producción cerca de las áreas industriales clave, reduciendo tanto costos como emisiones.

No obstante lo anterior, una de las principales barreras globales para el desarrollo de los mercados de hidrógeno verde es garantizar un mercado de consumo estable (*"offtaker"*). En este sentido, Paraguay puede superar este obstáculo más fácilmente debido a la alta demanda de fertilizantes en la región, destacando Brasil. Paraguay presenta unas condiciones óptimas para un uso inmediato del hidrógeno verde en la producción de fertilizantes, con grandes mercados de consumidores en sus fronteras, como Brasil o Argentina, y un mercado emergente⁸⁵ de fertilizantes verdes. La cercanía a Brasil y Argentina, ambos países con una alta demanda de fertilizantes, refuerza el posicionamiento de Paraguay como un proveedor clave, facilitando tanto la creación de alianzas comerciales como la expansión del mercado.

Esta ventaja competitiva permite a Paraguay aprovechar el hidrógeno verde rápidamente, producido con costos competitivos, facilitando la creación de un mercado sólido para esta tecnología. Asimismo, el desarrollo de un mercado de fertilizantes verdes, con una producción a

la infraestructura eléctrica existente y las rutas logísticas para facilitar tanto el consumo interno como la exportación. Cada área refleja la convergencia de estos factores, lo que les permite ofrecer condiciones óptimas para la instalación de electrolizadores y la creación de una red eficiente de producción de hidrógeno verde. Análisis propio.

⁸⁵ El término *"mercado emergente"* no implica un mercado plenamente desarrollado, sino uno en crecimiento con gran potencial. En el caso de los fertilizantes verdes, el mercado está proyectado a crecer a una tasa compuesta anual (CAGR) del 4.5% hasta 2034, alcanzando un valor de 3,442 millones de dólares para ese año. Este crecimiento está impulsado por la necesidad de soluciones agrícolas sostenibles y la reducción de emisiones, lo que posiciona a Paraguay en una situación ventajosa para aprovechar esta tendencia global (Analytic, 2024).

escala de hidrógeno verde, puede permitir el desarrollo de otras aplicaciones a nivel nacional. En este sentido, su aplicación en el transporte pesado por carretera o fluvial tiene un gran potencial, debido a la dependencia energética en términos de combustibles fósiles de Paraguay. A corto y medio plazo, el hidrógeno verde puede integrarse en el sector de transporte, especialmente en el ámbito fluvial, aprovechando la infraestructura de la Hidrovía Paraguay-Paraná para impulsar la descarbonización del transporte regional. A nivel global existen desarrollos tecnológicos que viabilizan estas soluciones, sin embargo, su aplicación en Paraguay implica el desarrollo de una red de hidrogeneras, adaptaciones portuarias y cooperación internacional con los países próximos, lo que supone plazos de adaptación más amplios y mayores inversiones.

Por otro lado, el hidrógeno tiene otras aplicaciones de más amplio plazo, como es el almacenamiento de energía y la descarbonización de procesos industriales. Estas aplicaciones requieren una estrategia de largo plazo que incluya no solo la producción de hidrógeno, sino también su uso final. Para lograr esto, son necesarias inversiones significativas y transformaciones profundas, como la reconversión de procesos industriales y la integración del hidrógeno en la red energética a gran escala.

El establecimiento de alianzas con otros mercados internacionales puede facilitar la adopción de estas tecnologías a gran escala y atraer inversiones extranjeras. La versatilidad en los usos del hidrógeno verde y las condiciones excepcionales de Paraguay puede permitir al país un posicionamiento estratégico en el mercado de fertilizantes verdes de forma inmediata, además de reducir progresivamente su dependencia exterior de combustibles fósiles.

Demanda potencial nacional del hidrógeno, derivados y otros productos verdes

A. Industria química

El hidrógeno verde representa una oportunidad estratégica clave para la industria química de Paraguay, con aplicaciones tanto en la creación de fertilizantes verdes para la exportación como en la sustitución de combustibles fósiles en los procesos industriales nacionales. Este enfoque no solo permite mejorar la competitividad internacional del país, sino también avanzar en su transición energética hacia una mayor sostenibilidad, reduciendo la dependencia de fuentes de energía contaminantes.

Por un lado, en lo que respecta a los **fertilizantes verdes**, se proyecta un crecimiento significativo impulsado por la creciente demanda de productos agrícolas sostenibles. Estos fertilizantes, producidos a partir de amoníaco verde, generado mediante el proceso Haber Bosch, que utiliza hidrógeno verde, permiten reducir la huella de carbono en comparación con los fertilizantes tradicionales basados en combustibles fósiles. Los mercados internacionales están comenzando a mostrar una disposición a pagar un sobreprecio por productos etiquetados como “verdes”,

ofreciendo a Paraguay una ventaja competitiva.⁸⁶ A medida que el mundo avanza hacia una menor dependencia de los combustibles fósiles, los mercados internacionales están comenzando a dar prioridad a los fertilizantes verdes sobre los fertilizantes producidos con amoníaco derivado de combustibles fósiles.

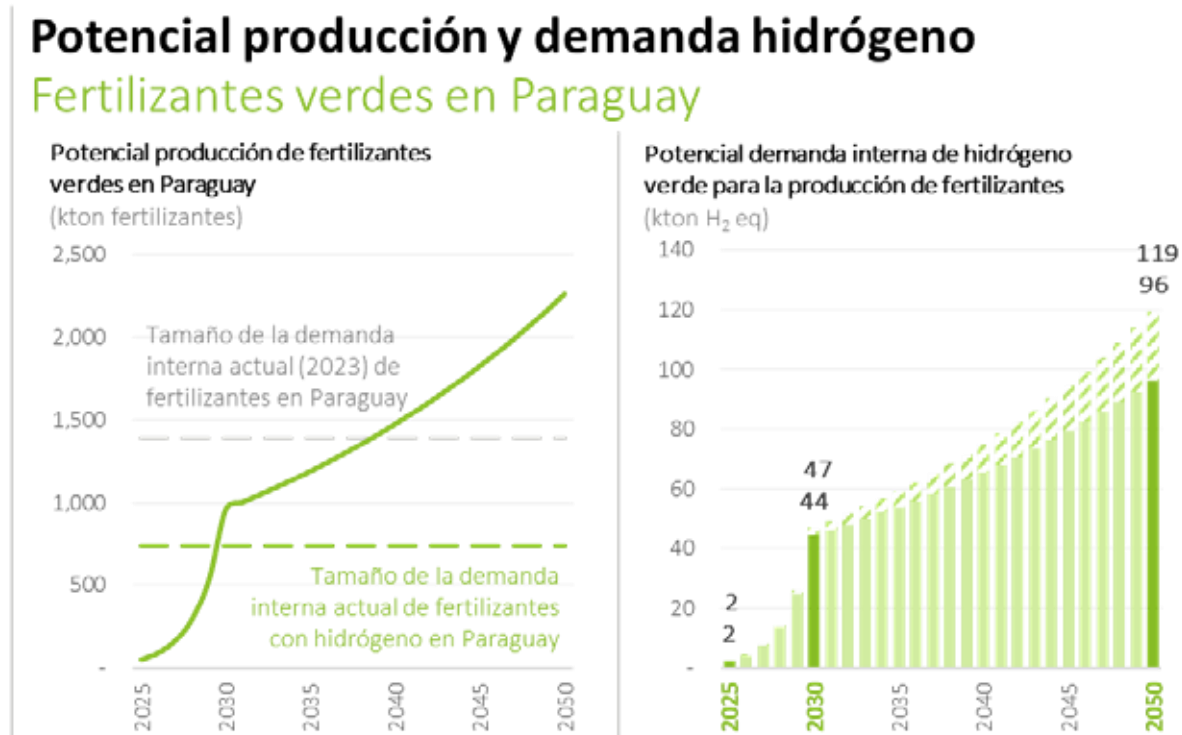


Ilustración 28 – Potencial producción de fertilizantes verdes y demanda de hidrógeno asociada⁸⁷

Para el año 2030, Paraguay podría producir cerca de 1,000 kilotoneladas de fertilizantes verdes, mientras que para 2050, esta cifra podría alcanzar más de 2,000 kilotoneladas. En cuanto a hidrógeno verde, la demanda proyectada será de 44-47 kilotoneladas en 2030 y entre 96 y 119 kilotoneladas en 2050. Esta producción demandará una capacidad instalada de electrolizadores de aproximadamente 0.5 GW para 2030 y de entre 1.12 GW y 1.40 GW para 2050, lo que equivale a un consumo eléctrico anual estimado de aproximadamente 4,700 GWh para 2030 y entre 9,800 GWh y 12,200 GWh para 2050.

Estos nuevos mercados de fertilizantes verdes buscan un doble objetivo, i) permiten la reducción de la huella de carbono en la producción de estos fertilizantes, algo demandado en determinados mercados y, por otro lado, ii) la reducción en el consumo de combustibles fósiles para la producción de fertilizantes que permitirá una autonomía energética mayor a nivel nacional y una menor dependencia de los mercados internacionales, altamente volátiles durante los últimos años. Estos

⁸⁶ Especialmente en el contexto de mecanismos como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM, por sus siglas en inglés) de la Unión Europea. El CBAM, que impone un gravamen a las importaciones con alto contenido de carbono, podría posicionar a los productos paraguayos, como los fertilizantes verdes, de manera preferencial en mercados europeos. (European Commission, 2021).

⁸⁷ Análisis propio.

aspectos, están llevando a una disposición a pagar un sobre costo por productos etiquetados como verdes, impulsando así la demanda de estos fertilizantes.

Por otro lado, la **sustitución de combustibles fósiles** en la **industria química nacional** de Paraguay constituye otro paso estratégico. Si bien el consumo energético del sector es comparativamente pequeño en relación con otros sectores industriales, su potencial es notable. En particular, la industria química emplea actualmente combustibles como el diésel, el gas licuado de petróleo (GLP) y la gasolina, todos ellos importados, lo que expone al país a la volatilidad de precios en los mercados internacionales de energía y a la inseguridad energética. La adopción del hidrógeno verde como sustituto de estos combustibles ofrece una vía clara para mejorar la autonomía energética de Paraguay y reducir su dependencia de combustibles fósiles.

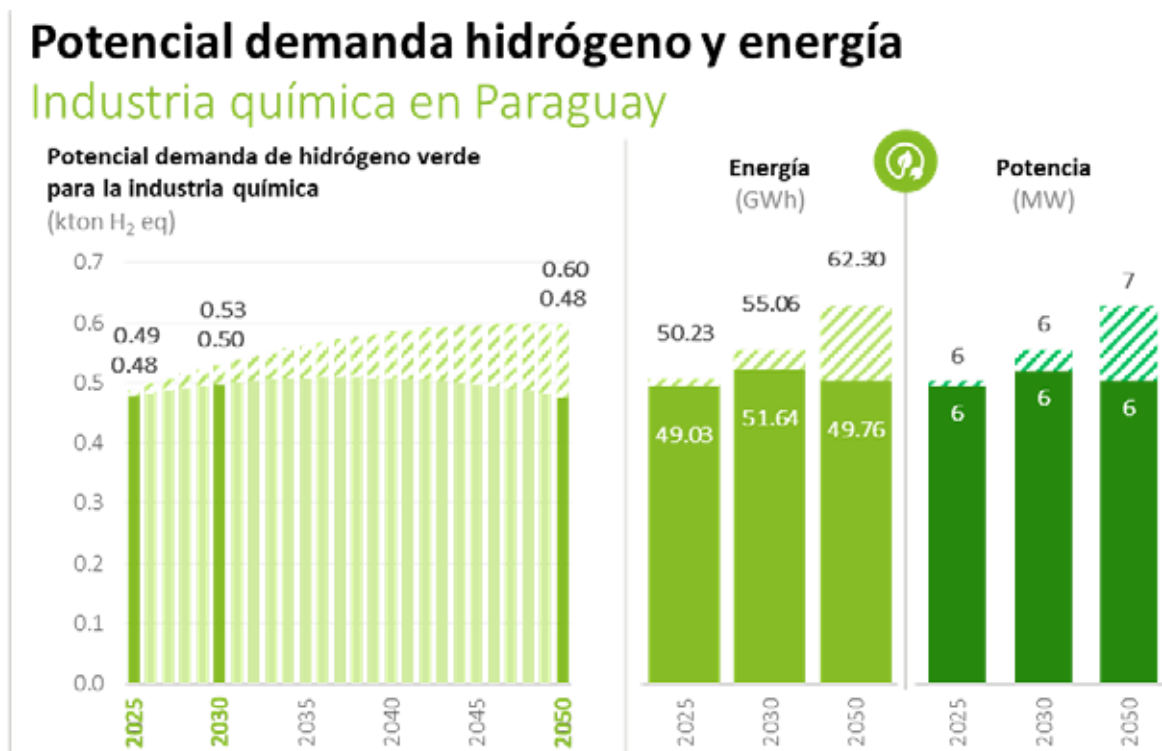


Ilustración 29 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para la industria química⁸⁸

Para el año 2030, se proyecta que la demanda de hidrógeno verde en la industria química alcanzará aproximadamente entre 0.50 y 0.53 kilotoneladas, lo que requerirá una capacidad instalada de electrolizadores de 6 MW y un consumo eléctrico de entre 51.6 y 55.06 GWh anuales. Para 2050, estas cifras podrían aumentar a entre 0.48 y 0.60 kilotoneladas de hidrógeno verde, con una

⁸⁸ Este escenario representa la demanda máxima estimada de hidrógeno verde para sustituir todos los combustibles fósiles actualmente utilizados en la industria química paraguaya, lo que significa que la viabilidad dependerá de los procesos industriales específicos que finalmente adopten el hidrógeno como fuente de energía. La proyección toma en cuenta el posible reemplazo de diésel, GLP y gasolina, lo que contribuiría a reducir la huella de carbono del país y aumentar la competitividad de sus productos en mercados internacionales que valoran la sostenibilidad. (VMME, 2023) (VMME, 2019).

capacidad de electrolizadores entre 6 MW y 7 MW, y un consumo de entre 49.8 GWh y 62.3 GWh, respectivamente.

Paraguay tiene la oportunidad de posicionarse como un actor clave en la industria química internacional mediante la producción de fertilizantes verdes, mientras que a nivel nacional puede transformar su industria química a través de la sustitución de combustibles fósiles.

I. Transporte

El hidrógeno verde ofrece una solución viable y de largo plazo para la descarbonización del sector transporte en Paraguay, uno de los principales consumidores de combustibles fósiles en el país. Dada la dependencia actual del diésel, gasolina y keroseno, la transición hacia el hidrógeno verde, junto con derivados como el amoníaco, el e-metanol o el SAF, promete no solo reducir la huella de carbono, sino también mejorar la eficiencia energética y fomentar la independencia de Paraguay respecto a los combustibles fósiles importados.

El hidrógeno verde se perfila como un elemento capaz de descarbonizar el **transporte terrestre pesado**, especialmente en vehículos pesados, como camiones y autobuses. Aunque actualmente el sector del transporte avanza hacia la electrificación y el uso de biocombustibles, la implementación de pilas de combustible de hidrógeno ofrece una solución efectiva para vehículos que requieren mayor autonomía y carga útil, sin la penalización del peso que implican las baterías eléctricas de gran tamaño. La tecnología de pilas de combustible convierte el hidrógeno en electricidad, proporcionando energía a los motores eléctricos de los vehículos pesados, ideales para aplicaciones como camiones y autobuses que necesitan mayor potencia y autonomía para largas distancias. Sin embargo, la viabilidad de la descarbonización del transporte pesado mediante hidrógeno depende del desarrollo de infraestructuras de repostaje y la maduración de la tecnología de vehículos.

Potencial demanda hidrógeno y energía

Sector transporte carretera en Paraguay

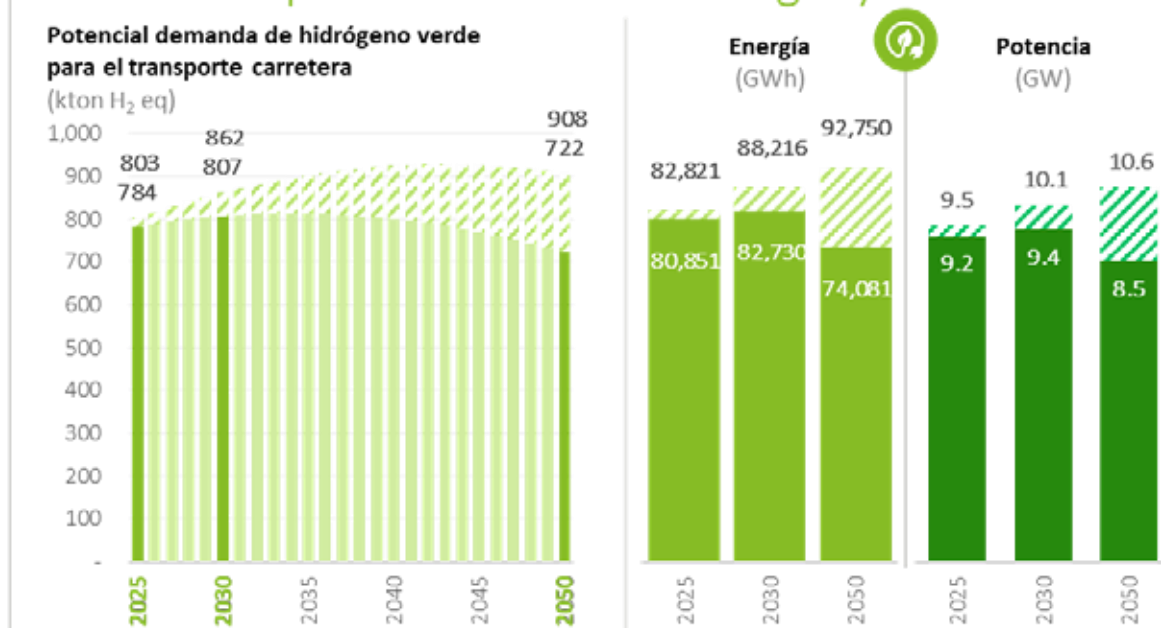


Ilustración 30 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para transporte carretera⁸⁹

Para 2030, se estima que el país podrá requerir entre 784 y 807 kilotoneladas de hidrógeno verde. Este número crecerá para 2050, alcanzando entre 722 y 908 kilotoneladas, lo que exigirá una capacidad instalada de electrolizadores de entre 8.5 GW y 10.6 GW. La producción de dicho hidrógeno necesitará entre 82,730 y 88,216 GWh de electricidad en 2030 y desde 74,081 hasta 92,750 GWh en 2050.

Asimismo, el hidrógeno verde podría ser clave para descarbonizar las **flotas fluviales** mediante el uso de e-metanol o amoníaco como combustibles, ofreciendo una alternativa más eficiente y menos contaminante que el diésel. Estas soluciones no solo reducirían significativamente las emisiones de carbono, sino que también aprovecharían la infraestructura de distribución y almacenamiento ya existente, lo que facilitaría la transición energética sin la necesidad de desarrollar infraestructuras completamente nuevas.

⁸⁹ Este escenario representa la demanda máxima estimada de hidrógeno verde para sustituir todos los combustibles fósiles actualmente utilizados en el transporte carretero en Paraguay. La viabilidad de esta transición dependerá de los tipos específicos de vehículos que adopten el hidrógeno como fuente de energía, particularmente en camiones y autobuses de larga distancia. La proyección considera el posible reemplazo de diésel, gasolina y GLP. (VMME, 2023) (VMME, 2019).

Potencial demanda hidrógeno y energía

Sector transporte fluvial en Paraguay

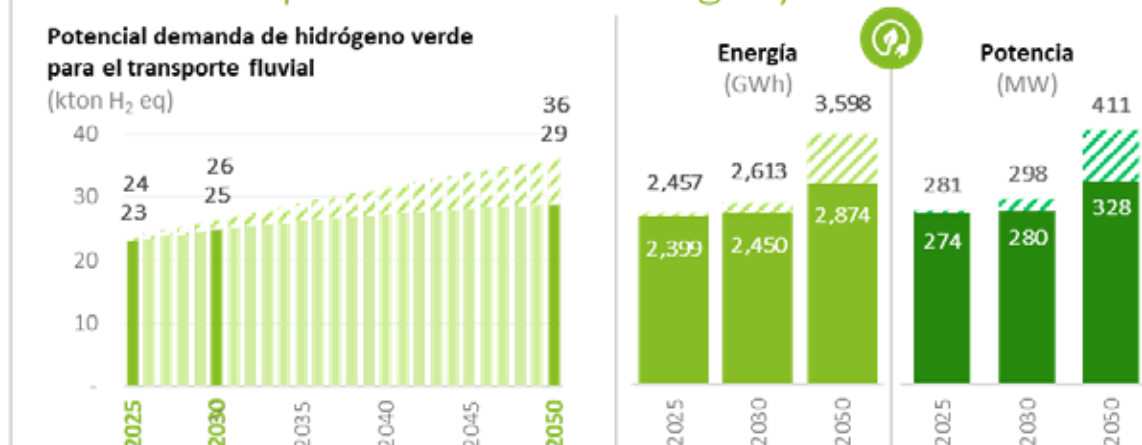


Ilustración 31 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para el transporte fluvial⁹⁰

Para el año 2030, se estima que el transporte fluvial podría demandar entre 25 y 26 kilotoneladas de hidrógeno verde, y entre 29 y 36 kilotoneladas para 2050. La capacidad de electrolizadores necesaria para satisfacer dicha demanda será de entre 280 y 298 MW en 2030, y se espera que ascienda a entre 328 y 411 MW en 2050. Esto implica una demanda de entre 2,399 y 2,450 GWh para 2030, que se incrementará hasta 3,598 GWh para 2050.

En cuanto al **transporte aéreo**, los Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), producidos a partir de hidrógeno verde, ofrecen una alternativa en el largo plazo para la reducción de emisiones en este sector, que depende del keroseno. Los SAF permiten reducir las emisiones de CO₂ sin necesidad de modificar significativamente las infraestructuras actuales de las aerolíneas, lo que facilita una transición más rápida y eficiente.

⁹⁰ Este escenario estima la demanda máxima de hidrógeno verde tanto para el transporte fluvial como para el transporte aéreo de Paraguay. En el sector fluvial, se proyecta la sustitución del diésel por combustibles derivados del hidrógeno, como el e-metanol o el amoníaco, lo que sería clave para la descarbonización de las flotas que operan en la Hidrovía Paraguay-Paraná. La viabilidad de esta transición dependerá de la adopción de estas nuevas tecnologías, que permitirían una reducción significativa de las emisiones de carbono y consolidarían a Paraguay como un referente en transporte fluvial sostenible. Por su parte, el transporte aéreo presenta un escenario en el que la demanda de hidrógeno verde se destina a sustituir el keroseno con combustibles de aviación sostenibles (SAF), también derivados del hidrógeno. La adopción de SAF en las aerolíneas nacionales no solo contribuiría a la descarbonización del sector, sino que mejoraría la competitividad internacional de Paraguay en un mercado cada vez más enfocado en la sostenibilidad de los vuelos. (VMME, 2023) (VMME, 2019).

Potencial demanda hidrógeno y energía

Sector transporte aéreo en Paraguay

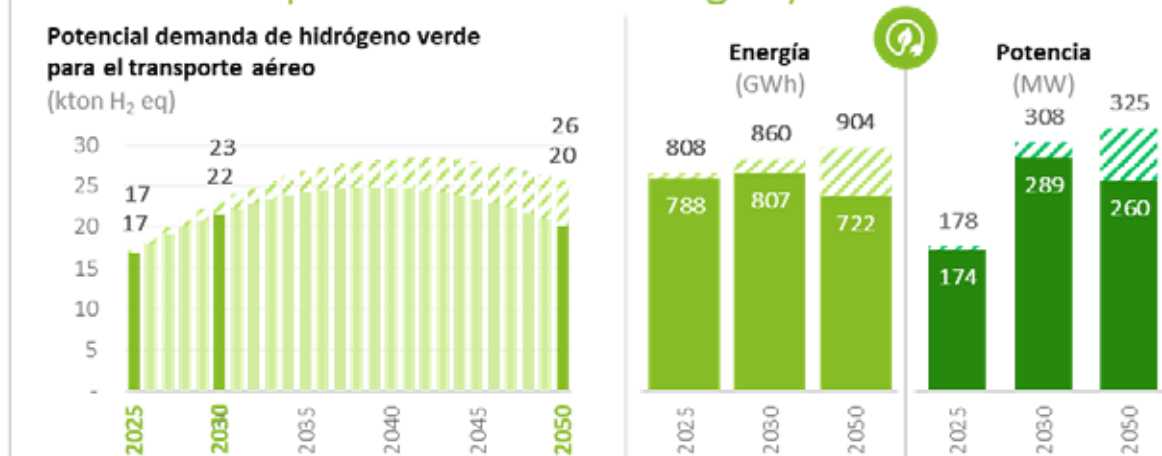


Ilustración 32 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para transporte aéreo⁹⁰

Para 2030, la demanda de hidrógeno verde para el sector aéreo se estima entre 22 y 23 kilotoneladas, y entre 20 y 26 kilotoneladas en 2050. La capacidad necesaria de electrolizadores oscilará entre 289 y 308 MW en 2030 y aumentará a entre 260 y 325 MW en 2050. La electricidad necesaria para producir el hidrógeno verde se estima entre 807 y 860 GWh en 2030, llegando a 904 GWh en 2050.

J. Industria pesada

El hidrógeno verde se presenta como una solución prometedora para reemplazar los combustibles fósiles en la **industria pesada**, ofreciendo una ruta hacia la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, como la producción de acero, cemento y hierro.

En la industria del acero, el hidrógeno puede sustituir al carbón y al coque de petróleo como agente reductor en la producción de hierro, lo que puede reducir significativamente las emisiones de CO₂. Este cambio tendría un impacto considerable en la reducción de la huella de carbono global, ya que la producción de acero es una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ a nivel global. Además, las industrias del vidrio, plástico y cemento también se podrían beneficiar de esta transición hacia el uso de hidrógeno verde, contribuyendo a una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente de estos productos, con un mercado y demanda emergente global de productos industriales con baja huella de carbono.

No obstante lo anterior, la adopción del hidrógeno verde en la industria pesada requiere una adaptación profunda de sus infraestructuras energéticas, lo que está ralentizando su implementación a nivel global. En este sentido, su desarrollo no se considera como una prioridad en el corto y medio plazo para Paraguay. Esta estrategia prevé una adaptación progresiva a 2050, con objeto de promover la transformación y modernización industrial nacional, con nuevos procesos más eficientes, implementación de nuevas tecnologías y la fabricación de productos verdes con alta demanda internacional, como acero verde, el cemento verde o los plásticos verdes.

Las aplicaciones del hidrógeno verde en industrias con gran demanda internacional, como la del acero, hierro o cemento, permitirían en el largo plazo, no sólo un fortalecimiento de la industria paraguaya, sino también reforzar el posicionamiento de Paraguay en los mercados internacionales.

K. Energía

El hidrógeno verde tiene el potencial de desempeñar en el largo plazo un papel transformador en la economía de Paraguay, especialmente como medio de **almacenamiento energético** para dar flexibilidad y gestionar el sector eléctrico. La capacidad de almacenar energía en forma de hidrógeno permitiría suministrar electricidad durante períodos de alta demanda, ofreciendo una mayor estabilidad y eficiencia en la red eléctrica.

La expansión de la economía del hidrógeno verde habrá impulsado el despliegue de estas energías intermitentes, generando una mayor demanda de soluciones para gestionar su variabilidad. En este contexto, el hidrógeno verde, actuando como un vector de almacenamiento, se posiciona como una solución atractiva para equilibrar la intermitencia de las renovables. Esto permitirá mejorar la estabilidad y resiliencia del sistema energético nacional, ofreciendo una mayor seguridad de suministro.

Esto podría ser especialmente relevante para la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), que podría utilizar el hidrógeno para equilibrar la carga y mejorar la gestión de los recursos eléctricos del país, asegurando un suministro energético continuo y sostenible.

Sin embargo, mientras Paraguay cuente con una abundante fuente de energía hidroeléctrica, no enfrenta una necesidad inmediata de utilizar el hidrógeno como sistema de almacenamiento. A diferencia de otros países que dependen más de fuentes renovables intermitentes, como la solar o eólica, Paraguay puede confiar en la estabilidad que ofrece su capacidad hidroeléctrica. En este sentido, aunque la integración del hidrógeno como almacenamiento energético podría ser una estrategia interesante en algunas regiones de Europa, para Paraguay conviene considerar este uso final en el largo plazo, una vez se hayan cubierto las demandas de hidrógeno verde más prioritarias de sectores como los fertilizantes y el transporte.

2.3 Competitividad y perspectivas del costo nivelado de hidrógeno verde (LCOH) en Paraguay

El Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) es un indicador crítico para determinar la viabilidad económica de la producción de hidrógeno verde. Este indicador permite evaluar la competitividad del hidrógeno en comparación con otras fuentes de energía a lo largo del ciclo de vida del proyecto, tomando en cuenta la inversión inicial (CAPEX), los costos operativos (OPEX), el costo de la electricidad, mantenimiento y otros factores. El LCOH se expresa comúnmente en USD por kilogramo de hidrógeno producido (USD/kg H₂) y es clave para evaluar la capacidad del hidrógeno verde de competir en el mercado energético.

En general, el LCOH se ve influenciado principalmente por dos factores: el costo de la electricidad y el número de horas operativas de los electrolizadores. Debido a que el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis, un proceso intensivo en el uso de electricidad, el costo de esta es uno de los

componentes más significativos del LCOH. Por tanto, un bajo costo de la electricidad es fundamental para reducir el LCOH y asegurar que el hidrógeno verde sea competitivo en relación con otras alternativas energéticas.

- El costo de la electricidad es el principal componente del LCOH, y Paraguay está en una posición privilegiada gracias a su abundante generación hidroeléctrica. Las plantas hidroeléctricas, como Itaipú y Yacyretá, ofrecen precios de electricidad relativamente competitivos en comparación con otros países que dependen de combustibles fósiles o fuentes de energía más caras. Inicialmente, los proyectos podrán aprovechar los excedentes hidroeléctricos para impulsar la producción de hidrógeno verde a corto plazo, con precios competitivos, lo que convierte a Paraguay en un gran potencial en la producción de hidrógeno verde a bajo costo. Sin embargo, este uso de energía eléctrica de la red estará sujeto a condiciones de adicionalidad, y en el largo plazo, se exigirá la construcción de nuevas plantas solares y/o eólicas para cubrir la demanda adicional de los electrolizadores. El análisis del LCOH en Paraguay considera diferentes escenarios tarifarios que reflejan tanto el uso de energía hidroeléctrica de la red como la integración de energías renovables adicionales como la solar y la eólica.⁹¹ Esta obligación de adicionalidad asegura que, en el futuro, la producción de hidrógeno verde se realice de manera sostenible, sin impactar el mercado de exportación de electricidad, proporcionando mayor flexibilidad y un suministro continuo de electricidad a los electrolizadores, lo que es clave para maximizar su eficiencia operativa.
- El número de horas en las que los electrolizadores operan cada año es otro factor determinante del LCOH. A mayor número de horas de operación, se distribuyen mejor los costos de inversión inicial (CAPEX), lo que reduce el costo por kilogramo de hidrógeno producido. En Paraguay, gracias a la estabilidad de su generación hidroeléctrica, los electrolizadores podrían funcionar un número significativo de horas al año, optimizando así la producción de hidrógeno verde. Según los análisis, para que el LCOH sea competitivo, los electrolizadores en Paraguay deben operar al menos 1,500 horas anuales. El uso de excedentes de energía hidroeléctrica durante los períodos de baja demanda, combinado con la energía solar y eólica, tiene el potencial de aumentar este número, maximizando la producción de hidrógeno verde y reduciendo su costo.

⁹¹ El análisis de los diferentes escenarios tarifarios que afectan al Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés) en Paraguay refleja una amplia gama de precios de la electricidad, tanto de la red hidroeléctrica como de fuentes renovables adicionales. Según el modelo utilizado, se proyectan diferentes escenarios de costos para el año 2050. (i) En el escenario tarifario BAU (Business As Usual), los precios de la electricidad rondarán los 24 USD/MWh, basados en tarifas de alta tensión actuales en Paraguay. (ii) En el escenario tarifario incremental, en el que se asume un aumento progresivo en las tarifas debido a posibles impuestos, los costos podrían llegar a los 39 USD/MWh. (iii) Finalmente, en el escenario marginal, que considera un apoyo gubernamental con precios basados en el costo unitario de los excedentes de la red hidroeléctrica (CUER), el costo proyectado se reduciría hasta un máximo de 10.45 USD/MWh. Estas proyecciones permiten visualizar el rango de costos que podría enfrentar la producción de hidrógeno verde, dependiendo del entorno regulatorio y las políticas energéticas adoptadas. Por otra parte, el análisis del Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) en Paraguay también considera el impacto de la energía renovable adicional, evaluando los costos nivelados de la energía (LCOE) para tecnologías como la solar y la eólica. En cuanto a la energía solar fotovoltaica, se han identificado dos niveles de radiación solar: el Nivel 1, que corresponde a áreas con mayor irradiación (> 1,800 kWh/m²), proyecta un LCOE de 17 a 19 USD/MWh para 2030 y de 10 a 11 USD/MWh para el año 2050; y el Nivel 2, con menor irradiación (> 1,700 kWh/m²), donde el LCOE será ligeramente superior, alcanzando entre 20 y 23 USD/MWh y 11 y 12 USD/MWh para 2030 y 2050 respectivamente. Por otro lado, para los proyectos de energía eólica terrestre en las zonas con mayor velocidad de viento (más de 6 m/s), el LCOE proyectado oscila entre 17 y 20 USD/MWh para 2030 y entre 14 y 16 USD/MWh para 2050. De este modo, el análisis considera un rango completo de precios energéticos, desde los 10.45 USD/MWh para los excedentes hidroeléctricos bajo el escenario tarifario marginal, hasta los 39 USD/MWh bajo el escenario tarifario incremental, y con la integración de energías renovables adicionales que varía entre 10 y 16 USD/MWh para 2050 dependiendo del recurso renovable y la ubicación.

En este sentido, los análisis realizados en Paraguay consideran diferentes tipos de proyectos para la producción de hidrógeno verde:

- **1. Proyectos conectados a la red eléctrica nacional**

Estos proyectos utilizan la electricidad de la red eléctrica nacional, aprovechando los excedentes de energía generada por las plantas hidroeléctricas. El LCOH para estos proyectos se ve influenciado por las tarifas eléctricas actuales y por las posibles variaciones en las políticas energéticas. En este contexto, en los análisis realizados se han modelado tres escenarios tarifarios:

- Escenario BAU ("*Business As Usual*"): Bajo este escenario, se asume que las tarifas de electricidad de alta tensión permanecen constantes, sin cambios regulatorios ni intervenciones en el mercado.
- Escenario incremental: Este escenario proyecta un aumento progresivo en el precio de las tarifas eléctricas, considerando posibles impuestos sobre el uso de energía de la red para la producción de hidrógeno verde.
- Escenario marginal: En este escenario, se contempla una reducción en los costos de electricidad para los productores de hidrógeno verde, aprovechando los excedentes hidroeléctricos a bajo costo. Esto permitiría que el LCOH alcance valores entre 1.2 y 1.7 USD/kg H₂ en 2050, posicionando a Paraguay como uno de los países con hidrógeno verde más competitivo en la región.

- **2. Proyectos con generación renovable adicional**

Además de los proyectos conectados a la red, se han modelado escenarios que incluyen la instalación de nuevas plantas de energía solar y eólica para complementar la generación eléctrica. Estos proyectos permitirían aumentar el suministro de energía renovable y reducir el costo de producción del hidrógeno verde a largo plazo. Los escenarios considerados incluyen:

- Escenario solar fotovoltaico (alto potencial solar): Este escenario asume que la energía solar se genera en zonas de alto potencial, maximizando la eficiencia de la planta fotovoltaica. El LCOH en este escenario se estima entre 1.2 y 1.8 USD/kg H₂ para 2050.
- Escenario solar fotovoltaico (bajo potencial solar): En este caso, las plantas solares se ubican en regiones con menor irradiación solar, lo que resulta en un LCOH ligeramente más elevado, proyectado entre 1.3 y 1.9 USD/kg H₂ para 2050.
- Escenario eólico: Considera el uso de parques eólicos terrestres en áreas con buen potencial de vientos. Este escenario ofrece un LCOH competitivo, estimado entre 1.5 y 2.2 USD/kg H₂ para el año 2050.

Estos proyectos con generación renovable adicional permitirían diversificar la matriz energética de Paraguay, reduciendo su dependencia de la energía hidroeléctrica y optimizando el LCOH al incorporar tecnologías solares y eólicas, cuyos costos han disminuido drásticamente en los últimos años.

- **3. Proyección del LCOH para Paraguay**

El cálculo del LCOH en Paraguay parte de un modelo de consumo eléctrico mixto, que considera tanto el uso de electricidad proveniente de la red hidroeléctrica como la incorporación de nuevas fuentes de energía renovable. Inicialmente, la energía hidroeléctrica cubre la totalidad de la demanda de producción de hidrógeno, pero con el paso del tiempo, se prevé que las energías renovables adicionales desempeñen un papel creciente.

Este enfoque permitirá aprovechar los excedentes hidroeléctricos en el corto plazo, mientras se alinean con el principio de adicionalidad, es decir, aumentando la proporción de energía renovable a medida que estas fuentes se despliegan en el país.

Los análisis realizados consideran desde proyectos a pequeña escala (hasta 100 MW) que operen bajo condiciones menos favorables, con una mayor dependencia de la red hidroeléctrica y menores eficiencias en los electrolizadores, así como grandes proyectos (más de 500 MW) que maximicen la eficiencia, integren una mayor proporción de energía renovable y aprovechen economías de escala. Estos últimos, con una mayor inversión inicial, permitirán reducir significativamente los costos operativos a largo plazo, optimizando el LCOH.

La proyección refleja, además, la importancia de una infraestructura hidroeléctrica robusta, que proporciona una base de costos bajos para la producción de hidrógeno verde. Este aspecto sitúa a Paraguay en una posición ventajosa frente a otros países que dependen mayormente de energías renovables más variables. La estabilidad de la energía hidroeléctrica no solo permite que Paraguay produzca hidrógeno a precios competitivos, sino que también le facilita la transición hacia un modelo completamente renovable en el futuro.

Paraguay, con su abundante generación hidroeléctrica y su potencial en energía solar y eólica, está en una posición ventajosa para establecer un Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) competitivo, pudiendo alcanzar, de acuerdo con estimaciones razonables, hasta 1.55 USD/kg H₂ en 2030 y 1.18 USD/kg H₂ en 2050.⁹²

La infraestructura hidroeléctrica existente proporciona una base de costos bajos que, cuando se combina con energía renovable adicional, puede resultar en un LCOH mixto muy competitivo. Esta combinación estratégica permite que el LCOH aproveche los precios bajos de la energía hidroeléctrica y se beneficie del principio de adicionalidad, aumentando progresivamente el uso de fuentes renovables a lo largo del tiempo.

⁹² Considerando únicamente la conexión a la red eléctrica nacional, beneficiándose del potencial hidroeléctrico de Paraguay.

LCOH estimado en Paraguay

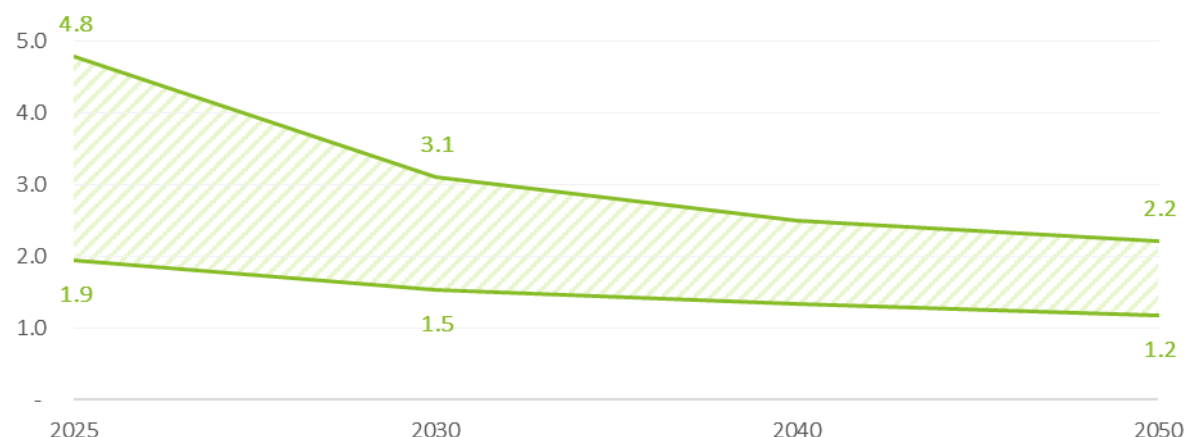
USD/kg H₂

Ilustración 33– Costos nivelados del hidrógeno verde estimados para Paraguay⁹³

El modelo de LCOH propuesto para Paraguay⁹⁴ contempla una variación en la proporción de energía proveniente de la red y de fuentes renovables adicionales. Inicialmente, la energía para la producción de hidrógeno podría provenir en su totalidad de la red hidroeléctrica, si bien se asume que se debe complementar en el futuro cercano con el uso de energía renovable de nueva instalación.

Este enfoque no sólo es viable sino también económicamente atractivo, ya que a medida que las tecnologías renovables se abaratan y su eficiencia aumenta, el LCOH decrecerá.

La sinergia entre la estabilidad de la energía hidroeléctrica y la variabilidad de los recursos renovables, solar y eólico, permitirá a Paraguay mantener la competitividad de su industria de hidrógeno verde, posicionándose estratégicamente en el mercado de energías limpias.

⁹³ La ilustración muestra el rango de escenarios evaluados, atendiendo a las condiciones específicas de Paraguay. En este sentido, los escenarios evaluados identifican proyectos de menor y mayor escala, con tecnologías de producción de electricidad renovable como la solar, la eólica y la hidroeléctrica, con distintos grados de producción de hidrógeno. Análisis propio.

⁹⁴ En el Anexo II: Costos nivelados del hidrógeno se encuentra un mayor detalle de los cálculos realizados.

3. OPORTUNIDADES Y OBJETIVOS

3.1 Oportunidades para Paraguay

Paraguay cuenta con oportunidades únicas debido a sus recursos y características específicas, que lo posicionan favorablemente en el ámbito del hidrógeno verde. En concreto, existen dos factores clave que aportan a Paraguay un grado de diferenciación y competitividad muy elevado:

- **Disponibilidad inmediata del recurso renovable, hídrico e infraestructuras:** Paraguay destaca por su capacidad de generar energía renovable y por contar con una infraestructura eléctrica adecuada para su transporte y distribución. Con una capacidad instalada de 8.8 GW en generación hidroeléctrica a través de las plantas de Itaipú y Yacyretá, Paraguay tiene acceso a una fuente de energía limpia y abundante, accesible de forma inmediata. Asimismo, más del 50% de su producción eléctrica es exportada, lo que subraya la importancia de utilizar este excedente en la producción de hidrógeno verde. La disponibilidad de otros recursos naturales (sol, viento y agua), además de infraestructuras logísticas, como las desarrolladas en la Hidrovía Paraguay-Paraná, proporciona las condiciones favorables para la producción de hidrógeno verde y otros productos derivados y el transporte de los derivados. El acceso a estos recursos e infraestructuras, y su disponibilidad inmediata, convierten al país en un lugar atractivo para la inversión en proyectos de hidrógeno verde.
- **Uso final en mercados de proximidad:** Existen condiciones favorables en Paraguay para la transformación del hidrógeno verde producido como fertilizantes verdes y su venta en mercados de proximidad fácilmente accesibles con una creciente demanda de fertilizante, dominada por Brasil. Se estima que Paraguay podrá producir más de 2,000 kilotoneladas para 2050, e impulsar su uso en sectores como la movilidad pesada por carretera o en el transporte fluvial de la Hidrovía Paraguay-Paraná. En este sentido, la adopción de combustibles derivados del hidrógeno, como el e-metanol, podría descarbonizar una parte significativa del transporte en Paraguay.

En este sentido, la integración de estos factores en la elaboración de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay permite una oportunidad multifacética para el país.

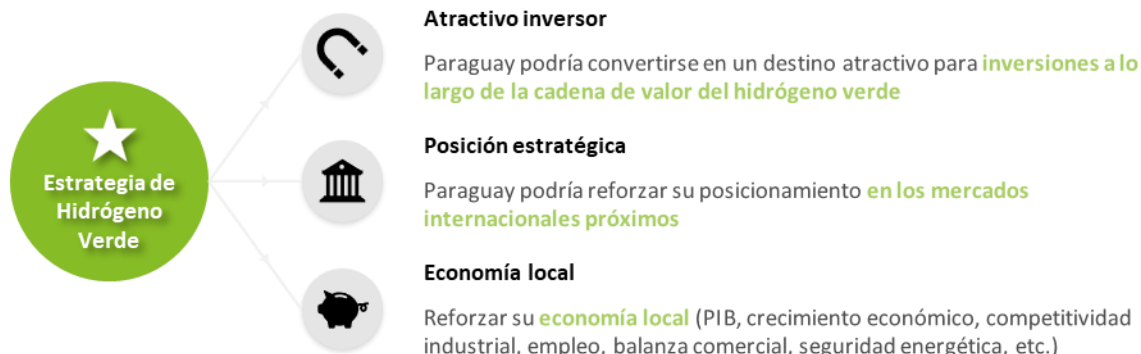


Ilustración 34 - Esquema ilustrativo de la oportunidad de Paraguay en el diseño de la Estrategia⁹⁵

- **Paraguay tiene el potencial de convertirse en un destino atractivo para inversiones a lo largo en toda la cadena de valor del hidrógeno verde, permitiendo así un crecimiento sostenible.**

Las inversiones requeridas para desarrollar infraestructuras adicionales, tanto en el sector renovable como en el hidrógeno, podrían superar los mil millones de USD en las próximas décadas, en proyectos que incluyan plantas de producción de hidrógeno y electrolizadores. La fuerte capacidad en energías renovables, especialmente la hidroeléctrica, lo posiciona estratégicamente para captar inversiones en tecnologías limpias y sostenibles, que impulsen el desarrollo económico del país de forma sostenible.

- **Desarrollar una Estrategia centrada en el hidrógeno verde permitiría a Paraguay consolidarse como un nuevo actor en los mercados internacionales del hidrógeno verde y sus derivados.**

La capacidad para producir y exportar hidrógeno verde, o productos derivados de éste, como son los fertilizantes verdes, permitiría a Paraguay el acceso a estos mercados todavía en configuración. Esto permitiría a Paraguay fortalecer su participación en mercados regionales como Mercosur y otros globales como proveedor de energías limpias.

- **Una Estrategia de Hidrógeno Verde tendría un impacto positivo en la economía local.**

Permitiría el crecimiento de su PIB y la mejora de su balanza comercial, favoreciendo el crecimiento económico sostenible del país y su competitividad, con nuevos desarrollos industriales, nuevo empleo de calidad y mejorando la balanza comercial. El acceso a nuevas tecnologías y un mayor desarrollo industrial, se desarrollarían nuevas capacidades industriales y tecnológicas a nivel nacional, favoreciendo el desarrollo de su infraestructura energética y la seguridad energética nacional.

⁹⁵ Análisis propio.

3.2 Principales desafíos para Paraguay

Si bien el potencial de Paraguay es muy relevante en materia de hidrógeno verde, los desafíos asociados con su desarrollo son muy retadores, al igual que ocurre en multitud de países y geografías. El diseño de esta Estrategia de Hidrógeno de Paraguay no solo trata de aprovechar las importantes ventajas diferenciales de Paraguay en cuanto a producción y mercados, sino que también prioriza determinadas medidas fundamentales para dar respuesta a los desafíos a los que se enfrenta Paraguay. A continuación, se identifican aquellos desafíos de mayor relevancia:

- **Ausencia actual de un marco regulatorio específico para el desarrollo del hidrógeno verde**

La necesidad de un marco regulatorio específico para el desarrollo del hidrógeno verde podría llevar a un crecimiento desordenado de esta nueva industria emergente en Paraguay, además de no aprovechar las capacidades de Paraguay y no atender todas las necesidades específicas que se requieren a lo largo de toda su cadena de valor. La versatilidad en los usos del hidrógeno implica nuevas necesidades regulatorias en áreas industriales, energéticas y de transporte, así como en aspectos relacionados con su producción, seguridad y comercialización, tanto como hidrógeno puro, como derivado o en otros productos verdes, como pueden ser los fertilizantes verdes.

La ausencia de una regulación específica impide un desarrollo ordenado y eficiente de una economía nacional basada en el hidrógeno verde en Paraguay. Una regulación clara y específica es fundamental para orientar bajo una única línea estratégica el desarrollo armonizado de este nuevo ecosistema en Paraguay.

Un crecimiento desordenado no sólo sería ineficiente desde el punto de vista económico, sino que también podría comprometer el equilibrio del sistema energético nacional, un aprovechamiento apropiado de los recursos naturales e infraestructuras o el acceso a mercados internacionales.

Definir la producción de hidrógeno como actividad industrial permite un diseño adecuado de su regulación con el sistema energético nacional, con mecanismos tarifarios estables y predictibles, además de reglas de acceso transparentes, entre otros aspectos, con objeto de garantizar el desarrollo de proyectos e inversiones con compromisos firmes en el país, y priorizar proyectos alineados con los objetivos estratégicos nacionales.

- **El desarrollo de nuevos proyectos de producción de hidrógeno verde precisa de nuevos desarrollos en redes eléctricas y nuevos proyectos a gran escala de renovables**

Si la demanda de energía para la electrólisis supera la capacidad de generación o de las redes eléctricas de Paraguay, podría haber un impacto negativo en otros usuarios del sistema eléctrico. Es esencial una planificación energética integral que optimice el sistema y las redes eléctricas del país, acorde con los nuevos desarrollos de producción de hidrógeno planificados.

Esto implica desarrollar proyectos cercanos a la generación eléctrica renovable disponible, así como repotenciar y modernizar las redes eléctricas para absorber y gestionar adecuadamente los nuevos proyectos de producción de hidrógeno.

Además, es crucial fomentar nuevos desarrollos en generación renovable, especialmente de gran escala, que permitan reforzar la matriz energética nacional y atiendan a la futura creciente demanda de proyectos de hidrógeno verde.

La integración del hidrógeno verde en la matriz energética de Paraguay debe realizarse de manera que complemente y fortalezca el sistema eléctrico existente.

- **La necesidad de nuevas infraestructuras o medios impide la salida a escala del país del hidrógeno verde o sus derivados**

El desarrollo del ecosistema del hidrógeno verde requiere importantes inversiones en infraestructuras y otros aspectos necesarios para su logística, que permitan la comercialización y uso del hidrógeno o sus derivados. Esto requiere una planificación integral de infraestructuras que considere necesidades inmediatas y futuras, con objeto de garantizar un equilibrio adecuado entre inversiones y necesidades. Paraguay, es un país donde no ha habido hasta la fecha un desarrollo de la industria gasista, no disponiendo de una red de infraestructuras amplia para el almacenamiento o transporte de gases. A su vez, Paraguay como país mediterráneo sin salida al mar de forma directa, enfrenta importantes retos logísticos frente a la alternativa de un posible transporte marítimo de derivados del hidrógeno o sus portadores. Estos aspectos si bien dificultan en gran medida el transporte del hidrógeno o sus derivados, también son elementos que suponen un reto en numerosas geografías, al precisarse normalmente infraestructuras y flotas dedicadas para su transporte y almacenamiento.

Paraguay, sin embargo cuenta con una importante ventaja competitiva para la producción y comercialización de productos verdes, como son los fertilizantes verdes, no sólo por su eficiencia en costos, sino también por la proximidad de importantes mercados emergentes fronterizos, que permite la utilización del hidrógeno y sus derivados en las zonas de consumo, factibilizando el transporte de estos productos con un costo final competitivo.

Esta Estrategia aborda un plan de desarrollo de infraestructuras, que aprovecha este potencial productivo y de mercado, priorizando el desarrollo de hubs de hidrógeno, con consumos próximos a la producción, y priorizando las adaptaciones logísticas y de infraestructuras necesarias para el comercio de estos fertilizantes verdes, con especial foco en la Hidrovía Paraná-Paraguay o las instalaciones portuarias.

- **Necesidad de mecanismos de financiación apropiados para el desarrollo del hidrógeno verde en Paraguay**

Desarrollar el hidrógeno verde implica la movilización de importantes volúmenes de inversión privada y pública a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno. El aprovechamiento a nivel nacional de estos desarrollos y la conexión con los mercados internacionales, implica importantes inversiones que permitan la modernización y mejora de las infraestructuras logísticas nacionales, especialmente aquellas relacionadas con la Hidrovía Paraná-Paraguay o las instalaciones portuarias, adaptación de flotas de transporte, una reconversión gradual de la industria, u otras con menor intensidad monetaria, pero igualmente importantes, como la generación de capacidades locales en este ámbito.

En este sentido, en esta etapa, se considera que, en determinados ámbitos, es importante el apoyo público, con objeto de priorizar y orientar las inversiones e incentivar la transformación de la industria nacional y la fuerza laboral paraguaya, entre otras.

Para ello, la creación de un Fondo de Sostenibilidad, con aportes económicos a través de mecanismos de financiación cruzada, que permita apoyar estas inversiones clave y desarrollo de nuevas capacidades locales es fundamental.

3.3 Objetivos de la Estrategia

Esta Estrategia busca como objetivo establecer el marco para el desarrollo integral de la economía del hidrógeno verde en Paraguay, no sólo de su producción, sino de toda la cadena de valor asociada, con el objeto de promover un desarrollo sostenible desde una perspectiva medioambiental, social y económica.

Este enfoque permitirá impulsar nuevos desarrollos industriales en áreas estratégicas, fortalecer una industria nacional más competitiva y generar empleo de calidad. Además, reducirá la dependencia exterior energética en materia de fuentes de energía fósiles, y por lo tanto su uso, contribuyendo a la descarbonización de la economía nacional.

Para ello, esta Estrategia da respuesta a los siguientes seis objetivos específicos que se atienden a partir de diversas líneas de acción, que integran una serie de medidas concretas, con el objeto de permitir el desarrollo de la economía del hidrógeno verde en Paraguay y maximizar el potencial del hidrógeno como un nuevo vector energético en el país.



Ilustración 35 - Esquema ilustrativo de los objetivos de la Estrategia⁹⁶

• 1. Desarrollo de un marco regulatorio específico para el hidrógeno

Para ello la Estrategia identifica diversas líneas de acción con objeto de establecer un marco regulatorio adaptado a las particularidades de Paraguay, que establezca las bases para su producción, almacenamiento, transporte y uso, asegurando que se cumplan los estándares de seguridad, sostenibilidad y eficiencia. En este sentido, un aspecto clave es la definición de la producción de hidrógeno en Paraguay como una actividad industrial que permita su regulación adecuada. Además, implicará esfuerzos educativos y de sensibilización para que la población comprenda y se involucre en la transición hacia fuentes de energía más limpias.

• 2. Aprovechamiento de la situación geográfica y recursos naturales de Paraguay

El país podría convertirse en un actor clave en la producción de hidrógeno, sus derivados y otros productos verdes en la región y su exportación a países próximos como Brasil. La Estrategia incluye líneas de acción para el desarrollo de infraestructuras adecuadas y la búsqueda de la optimización del uso de sus recursos hídricos y terrenos, con un enfoque prioritario en la generación eficiente de energía renovable.

⁹⁶ Análisis propio.

• 3. Creación de un entorno favorable para la inversión

Las líneas de acción definidas en la Estrategia permiten la creación de un entorno favorable para la inversión, con regulación estable y robusta que incentive inversiones de calidad, asegurando, a su vez, el desarrollo de proyectos alineados con los objetivos nacionales de desarrollo y sostenibilidad.

• 4. Garantizar un crecimiento ordenado y sostenible de la industria del hidrógeno

La definición de líneas de acción que permitan el desarrollo de una planificación holística de la producción, distribución y uso del hidrógeno verde, garantiza que los beneficios se retengan a nivel nacional y se promueva un uso sostenible de los recursos, consistente con la Estrategia.

• 5. Acelerar el desarrollo industrial a través del hidrógeno verde

El apoyo a nuevos desarrollos industriales estratégicos para Paraguay, como la producción de fertilizantes verdes en un plazo corto, y una transformación progresiva de otras industrias, contribuirá al posicionamiento de Paraguay en los mercados emergentes con productos descarbonizados y permitirá desarrollar un nuevo ecosistema industrial sostenible y descarbonizado que contribuya al crecimiento del PIB y a la generación de empleo de calidad.

• 6. Autonomía estratégica

El desarrollo de la economía del hidrógeno verde en Paraguay y su ciclo inversor, fomentará un sistema energético más resiliente, con nuevas inversiones y desarrollo industrial que, a su vez, favorecerán el crecimiento sostenible del país, su competitividad y la creación de nuevos empleos y capacidades industriales y tecnológicas, reforzando la autonomía energética en una economía más descarbonizada.



4. PILARES, LÍNEAS DE ACCIÓN Y MEDIDAS

Con el objeto de satisfacer adecuadamente las **necesidades específicas** y **potenciar las capacidades diferenciales de Paraguay**, para la consecución de los objetivos definidos en esta Estrategia, se han identificado cuidadosamente **6 pilares fundamentales**. Estos pilares engloban una serie de **líneas de acción**, que, a su vez, identifican **acciones** concretas a implementar, a lo largo de la **cadena de valor del hidrógeno**.

En este sentido, los pilares de la Estrategia son:

Producción de hidrógeno como actividad industrial: Impulsar el desarrollo de un marco regulatorio específico que considere al hidrógeno como una actividad industrial independiente, con el fin de promover su producción y utilización en diversos sectores de la economía nacional. **Generación renovable y acceso a la red eléctrica:** Garantizar un uso sostenible de los recursos renovables y eléctricos nacionales, fomentando el desarrollo ordenado de nuevos proyectos de generación eléctrica renovable que aseguren su disponibilidad para el conjunto de la sociedad y la economía nacional.

Uso de agua para la producción de hidrógeno: Regular el uso del recurso hídrico de manera eficiente y sostenible para la producción de hidrógeno, estableciendo tasas específicas y priorizando proyectos que incluyan tratamientos de aguas.

Infraestructura, logística y seguridad: Desarrollar un plan estratégico para la adecuación de infraestructuras eléctricas y logísticas, así como el transporte de mercancías, facilitando el establecimiento de nuevas rutas comerciales internacionales y la adaptación de flotas de transporte.

Usos finales y aplicaciones del hidrógeno producido: Fomentar la descarbonización y adaptación de las industrias nacionales, y la creación de nuevas, mediante la implementación de mecanismos de financiación cruzada y la creación de un Fondo de Sostenibilidad.

Elementos transversales Se precisa de la estructuración e implementación de determinados elementos que aplican sobre toda la cadena de valor y permiten, de forma sostenible y eficiente, garantizar un despliegue de la estrategia exitoso. Estos elementos transversales son:

- **Diseño regulatorio incentivador, estandarización y armonización.**
- **Desarrollo de capacidades e innovación.**
- **Fomento de alianzas internacionales.**
- **Difusión y sensibilización.**
- **Gobernanza.**

4.1 Producción de hidrógeno como actividad industrial

• Integración de la producción de hidrógeno verde en el tejido industrial nacional

El impulso hacia la producción de hidrógeno verde en Paraguay responde a una visión estratégica centrada en el aprovechamiento de sus abundantes recursos naturales para fomentar el crecimiento económico y la generación de empleo. El hidrógeno verde no sólo representa una apuesta por la diversificación de la matriz energética del país, sino que también se perfila como un catalizador para el desarrollo industrial, promoviendo la innovación y atrayendo inversiones que dinamizan el tejido económico nacional. La creación de empleos especializados y la promoción de un entorno propicio para el desarrollo de nuevas tecnologías y capacidades industriales subrayan el compromiso del país con un futuro económico robusto y sostenible.

La definición de la producción de hidrógeno verde como actividad industrial surge de la necesidad de establecer un marco regulatorio específico para la creciente industria del hidrógeno verde en Paraguay.

Esta clasificación permite la creación de un sistema de autorización y control adaptado a las particularidades de esta industria, estableciendo obligaciones a los productores de hidrógeno verde para asegurar el cumplimiento de estándares de seguridad, sostenibilidad y eficiencia. Además, la inclusión de la producción de hidrógeno verde dentro del Clasificador Nacional de Actividades Económicas del Paraguay (CNAEP) facilita, además, un seguimiento completo de la cadena de valor del hidrógeno, lo cual facilitará el desarrollo de políticas energéticas integradas y coherentes.

Esta medida responde a la necesidad de evitar un desarrollo desorganizado del sector energético que podría tener consecuencias negativas tanto para el medio ambiente como para la economía nacional, garantizando así un crecimiento sostenible y responsable de esta industria emergente.

Medida 1: Actualizar el Clasificador de Actividades Económicas del Paraguay⁹⁷ (CNAEP) para definir y clasificar la producción de hidrógeno verde como una actividad industrial.

Incorporar la producción de hidrógeno verde en el CNAEP mediante la creación de una subcategoría específica que la distinga de otras actividades industriales.

Esta actualización reconocerá formalmente al hidrógeno verde como actividad industrial, permitiendo su regulación específica y resaltando su importancia para el desarrollo sostenible y el impulso económico nacional.

• Estrategia de selección y priorización de iniciativas de proyectos de producción de hidrógeno verde para garantizar un crecimiento ordenado

En Paraguay, el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde es fundamental para fortalecer la economía y promover la sostenibilidad ambiental.

Para garantizar un crecimiento ordenado, es crucial implementar una estrategia clara de selección y priorización de estos proyectos, lo que asegura que solo las iniciativas más viables y beneficiosas desde el punto de vista técnico, ambiental y económico sean apoyadas.

Establecer un marco normativo que simplifique los procesos regulatorios y promueva la inversión en tecnologías limpias es esencial. Esta estrategia no sólo facilita el desarrollo de proyectos piloto, sino que también fomenta la innovación y la eficiencia en el uso de recursos locales, contribuyendo al crecimiento sostenible del sector energético en Paraguay.

Medida 2: Evaluar la implementación de un mecanismo de excepcionalidad transitorio en el régimen de incentivos fiscales para proyectos piloto⁹⁸ de hidrógeno verde específicos.

Evaluar la implementación de un mecanismo excepcional transitorio en el régimen de incentivos fiscales que conceda beneficios y reducciones tributarias a proyectos piloto específicos de producción de hidrógeno verde derivados, en ubicaciones estratégicas de Paraguay.

Esta medida busca facilitar y promover las primeras iniciativas en este sector emergente, seleccionando proyectos que cumplan criterios determinados para maximizar la utilización eficiente de los recursos locales, incentivar la innovación sostenible y fomentar tecnologías pioneras en la producción, almacenamiento y uso del hidrógeno verde o derivados.

⁹⁷ El Clasificador Nacional de Actividades Económicas del Paraguay (CNAEP) es una herramienta estadística desarrollada por la Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos (DGEEC) que se utiliza para categorizar y estandarizar las actividades económicas realizadas por las unidades productivas en el territorio nacional, facilitando así la organización, análisis y comparación de datos económicos a nivel local e internacional. Este clasificador se alinea con estándares internacionales para asegurar la comparabilidad de la información económica y es necesario para la elaboración de políticas públicas, estudios de mercado y análisis sectoriales. (Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos (DGEEC), 2009).

⁹⁸ Se consideran proyectos piloto aquellos desarrollos a pequeña escala y con un enfoque experimental o demostrativo, cuyo objetivo es probar la viabilidad técnica, económica y ambiental de tecnologías y procesos relacionados con la producción, almacenamiento y uso del hidrógeno verde. Estos proyectos sirven como pruebas iniciales antes de su implementación a mayor escala.

Medida 3: Establecer un marco de requisitos de documentación y garantías ajustado a la capacidad de producción de los proyectos de hidrógeno verde.

Establecer un marco que defina y clasifique los proyectos de hidrógeno verde en pequeña, mediana y gran escala⁹⁹, ajustando los requisitos de documentación, garantías y trámites administrativos a su capacidad de producción.

Este marco evaluará la incorporación de procesos más simplificados o acelerados para proyectos de pequeña escala o estratégicos, reduciendo cargas administrativas y facilitando su aprobación y desarrollo. Los proyectos de mayor escala deberán cumplir con requisitos más estrictos, incluyendo, entre otros, estudios de impacto ambiental, titularidad de terrenos y planes de generación renovable vinculados al tamaño del proyecto, asegurando una gestión responsable de su impacto en la red eléctrica nacional, entre otros

Medida 4: Implementar un mecanismo integral de evaluación multidimensional para priorizar estratégicamente proyectos de hidrógeno verde que maximicen los beneficios para Paraguay.

Implementar un mecanismo integral de evaluación que, mediante una metodología de análisis costo-beneficio, priorice estratégicamente los proyectos de hidrógeno verde con mayor contribución al desarrollo de Paraguay.

Este sistema de valoración multidimensional podrá considerar criterios como la sostenibilidad ambiental, el impacto social y económico, la optimización y circularidad en el uso del agua, priorizando aquellos que traten aguas residuales o salinas, la creación de empleo local, la incorporación de sistemas avanzados de almacenamiento energético, la formalización de acuerdos nacionales de venta, la participación activa de la industria local en todas las etapas del proyecto o la adopción de prácticas de gestión transparentes, entre otros aspectos. Ante la inminente afluencia de múltiples iniciativas en el emergente mercado del hidrógeno verde, esta medida busca garantizar que se impulsen los proyectos que maximicen los beneficios nacionales y contribuyan al progreso socioeconómico y ambiental del país.

4.2 Generación renovable y acceso a la red eléctrica

• Maximización del potencial de las energías renovables en la producción de hidrógeno verde

En Paraguay, el impulso hacia la producción de hidrógeno verde se basa en la maximización del potencial de las energías renovables, ofreciendo una oportunidad para fortalecer la economía y generar empleo, mientras se promueve la sostenibilidad ambiental.

La abundante capacidad hidroeléctrica del país permitiría aprovechar su energía renovable para la producción de hidrógeno verde.

Aunque Paraguay tiene una capacidad instalada que satisface su demanda de potencia, las proyecciones indican un crecimiento continuo de esta demanda, que en algunos escenarios podría

⁹⁹ En este contexto, se consideran proyectos de pequeña escala aquellos cuya capacidad de producción es inferior a 100 MW, de mediana escala los que se sitúan entre 100 MW y 500 MW, y de gran escala los que superan los 500 MW de capacidad instalada.

acelerarse. En la siguiente ilustración se pueden identificar varios escenarios posibles, para los cuales se requieren medidas específicas.

El desarrollo de un marco normativo para gestionar la producción de hidrógeno verde y un plan de transición energética busca armonizar el desarrollo económico con la protección del medio ambiente. Estas medidas aseguran un equilibrio energético sostenible y permitirían a Paraguay la integración de renovables en la economía del hidrógeno, garantizando que el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde se realice de manera eficiente y responsable.

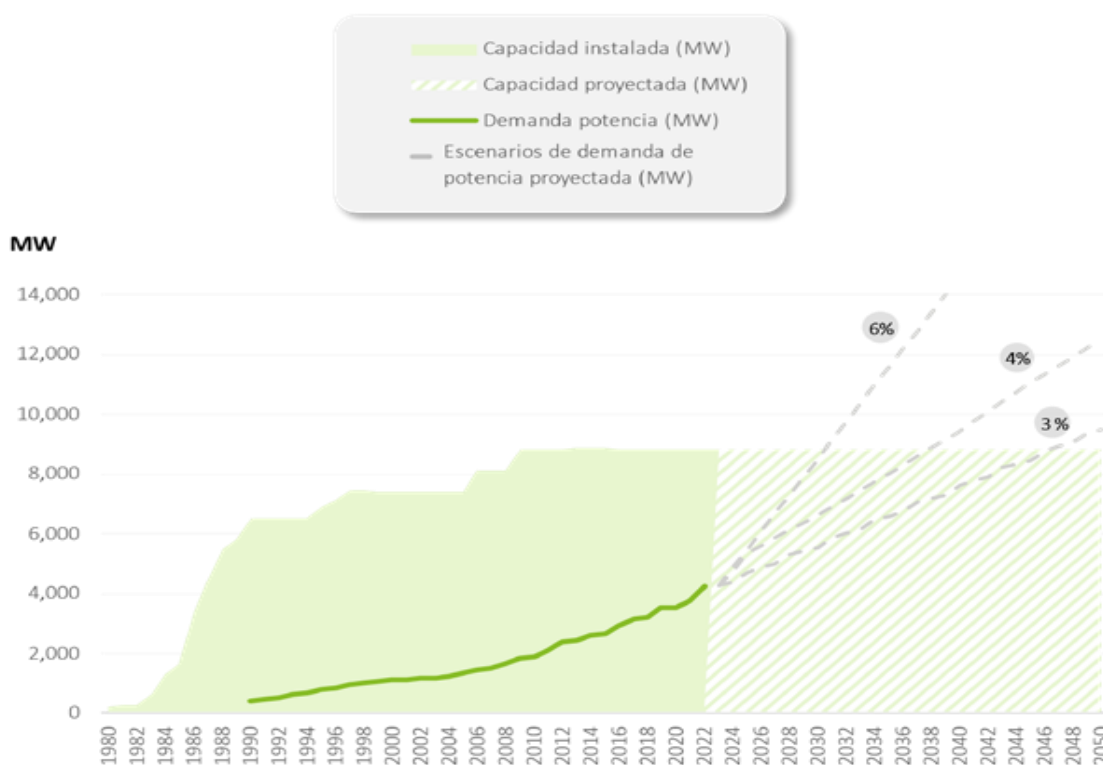


Ilustración 36 – Demanda de potencia (MW) histórica y proyectada de Paraguay¹⁰⁰.

Medida 5: Definir y establecer un marco que garantice una integración eficiente de la hidroeléctrica en proyectos de hidrógeno verde sin comprometer el abastecimiento energético.

Definir y establecer un marco integral que regule la utilización de los excedentes hidroeléctricos en proyectos de hidrógeno verde, con el fin de promover un equilibrio entre la producción de hidrógeno renovable y la seguridad energética nacional.

A través de este sistema, se pretende evaluar la disponibilidad de energía y definir criterios claros para poder asignar estos excedentes a los proyectos de hidrógeno verde de manera que se maximice el uso de las fuentes renovables sin comprometer el consumo energético interno nacional.

Se evaluará la incorporación en el marco de mecanismos flexibles de ajuste de la demanda energética, junto con medidas de contingencia para asegurar la

¹⁰⁰ La demanda de potencia histórica corresponde a compilaciones estadísticas (ANDE, 2011) (ANDE, 2023) y, con estos datos, se ha proyectado la demanda de potencia futura, considerado el crecimiento observado en los últimos años, estimando un incremento anual de entre el 3% y el 6%. Adicionalmente, se ha incluido la proyección de demanda estimada por el VMME, con un crecimiento anual del 4% (VMME, 2019) (Expansión, 2022).

disponibilidad de energía para el consumo nacional en situaciones críticas de alta demanda.

Medida 6: Desarrollar un plan energético nacional integral que coordine el desarrollo de las energías renovables, la producción de hidrógeno verde y la optimización de la red eléctrica de Paraguay.

Desarrollar un plan energético nacional integral, diseñado para coordinar de manera estratégica la generación, transporte y distribución de energía en Paraguay, incorporando la producción de hidrógeno verde como un componente relevante.¹⁰¹ La implementación de este plan energético requerirá una fase de análisis previo y diseño técnico.

Este plan pretende unificar los esfuerzos de expansión de la infraestructura energética con el desarrollo de fuentes renovables adicionales, asegurando una transición energética eficiente y equilibrada.

A través de una planificación detallada y colaborativa, el plan buscará fortalecer la matriz energética del país, mejorando la seguridad energética, reduciendo la dependencia externa y optimizando la red eléctrica para garantizar un desarrollo sostenible del sector energético. Además, el plan deberá incluir mecanismos de evaluación continua para adaptarse a los avances tecnológicos y las nuevas necesidades del sistema energético nacional.

De esta forma, este plan que se defina, considerará en su fase de análisis y preparación: i) el desarrollo de nuevos proyectos de producción de hidrógeno verde, ii) reforzar y diversificar la matriz de generación eléctrica nacional con la incorporación de nuevas plantas de generación eléctrica, que combine varias tecnologías renovables, refuerzo de las existentes o aprovechamiento de embalses de las hidroeléctricas para el desarrollo de proyectos de fotovoltaica flotante, iii) modernizar e incrementar la capacidad de las redes eléctricas, iv) expandir la capacidad energética nacional a partir de la incorporación del hidrógeno verde como vector energético, v) reducir la dependencia energética exterior, y vi) otros aspectos relevantes para asegurar la eficiencia operativa y en costos del sistema energético nacional, además de garantizar la seguridad energética nacional.

• Planificación del acceso y conexión a la red eléctrica de las plantas de producción de hidrógeno verde

En Paraguay, la industria del hidrógeno verde se presenta como una de las formas estratégicas para diversificar la matriz energética y fortalecer el futuro económico del país.

Planificar el acceso y la conexión a la red eléctrica para las plantas de hidrógeno verde es esencial para integrar estas nuevas fuentes de energía limpia sin comprometer la estabilidad del sistema eléctrico nacional.

Para ello, es necesario implementar un sistema de planificación detallada para estos proyectos, asegurando que su desarrollo esté

¹⁰¹ El plan propuesto deberá ampliar los actuales planes de generación, transporte y distribución de la ANDE (ANDE, 2021) (ANDE, 2021), que ya han demostrado ser efectivos, pero no incluyen la producción de hidrógeno verde como parte de su visión energética. Este nuevo plan buscará unificar y mejorar los esfuerzos existentes, integrando la nueva economía del hidrógeno para asegurar una mayor sostenibilidad y flexibilidad del sistema energético.

alineado con los planes estratégicos nacionales. La presentación de proyectos de hidrógeno verde debe estar sujeta a estos planes, de forma coordinada con los agentes interesados como la ANDE.

Establecer un marco normativo robusto que regule los derechos y condiciones para la conexión a la red garantizará que el desarrollo del hidrógeno verde sea compatible con las capacidades existentes y promueva la generación adicional de energía renovable¹⁰². Esta regulación no sólo refleja un compromiso con la sostenibilidad ambiental, sino que también asegura un crecimiento ordenado y planificado de la producción de hidrógeno verde, alineando las metas de sostenibilidad con los objetivos económicos nacionales.

Además, es fundamental definir criterios claros¹⁰³ para la integración de estas instalaciones electrointensivas, gestionando eficientemente su incorporación al sistema eléctrico. Esto evitará la saturación de la red y garantizará un suministro eléctrico estable y seguro para todos los usuarios, promoviendo un desarrollo sostenible del sector energético en Paraguay.

Medida 7: Marco normativo asociado con los derechos de acceso y conexión a la red eléctrica nacional, garantizando un equilibrio entre la demanda eléctrica y la capacidad contratada para proyectos de hidrógeno verde, garantizando que la documentación, garantías y tasas de conexión¹⁰⁴ sean proporcionales a la potencia requerida.

Revisar el marco normativo actual que regula los procesos de permisos para acceso y conexión a la red eléctrica de nueva demanda o incrementos de potencia, y adaptarlo o desarrollarlo en aquellos aspectos asociados con el acceso y conexión de electrolizadores de hidrógeno verde a la red eléctrica, asegurando que los proyectos presenten la documentación adecuada y ofrezcan garantías proporcionales a la potencia contratada.

Esta medida busca evaluar la necesidad de establecer un conjunto de requisitos técnicos, ambientales y administrativos específicos para proyectos de hidrógeno, que aseguren la viabilidad de los proyectos, promoviendo la estabilidad del sistema eléctrico y una planificación equitativa de los costos asociados a la conexión a la red eléctrica nacional.

Además, se evaluará la necesidad de establecer normativamente un esquema claro de tasas y garantías según la demanda de energía, asegurando una distribución equitativa de los costos de infraestructura y una integración armónica en el sistema eléctrico nacional

¹⁰² Aunque la ANDE jugará un papel crucial en la planificación y coordinación del acceso a la red, la adición de capacidad renovable para los proyectos de hidrógeno verde será responsabilidad de los mismos desarrolladores, quienes deberán construir sus propios parques de generación renovable, en coordinación con los planes nacionales y la ANDE.

¹⁰³ Estos criterios pueden incluir, entre otros, la capacidad de generación renovable requerida para cada proyecto, los procedimientos técnicos para la conexión a la red sin comprometer su estabilidad, los requisitos de almacenamiento y respaldo energético, las garantías para asegurar la sostenibilidad del suministro, así como las condiciones de cumplimiento con las normativas ambientales y de seguridad eléctrica.

¹⁰⁴ (ANDE, 2022).

Medida 8: Marco normativo asociado con los derechos de acceso y conexión a la red eléctrica nacional para proyectos de generación renovable adicional, garantizando que la documentación, garantías y tasas de conexión¹⁰⁵ sean proporcionales a la capacidad de generación proyectada.

Revisar el marco normativo actual que regula los procesos de permisos para la conexión a la red eléctrica nacional de los proyectos de generación renovable adicional, como parques fotovoltaicos o eólicos, y adaptarlo o desarrollarlo en aquellos aspectos que permitan garantizar que los desarrolladores presenten la documentación adecuada y ofrezcan garantías proporcionales a la capacidad de generación instalada.

Esta medida busca definir un conjunto de requisitos técnicos, ambientales y administrativos que garanticen la viabilidad de los proyectos, promoviendo la estabilidad del sistema eléctrico y una planificación justa de los costos asociados a la conexión a la red eléctrica nacional.

Además, se evaluará la necesidad de establecer normativamente un esquema claro de tasas y garantías basado en la capacidad de generación, asegurando una distribución equitativa de los costos de infraestructura y una integración sostenible de estos proyectos en la red eléctrica nacional.

Medida 9: Desarrollar una regulación que promueva la adicionalidad eléctrica para proyectos de hidrógeno verde conectados a la red.

Establecer un marco regulatorio que promueva la adicionalidad progresiva de fuentes renovables en proyectos de hidrógeno verde conectados a la red eléctrica.

Con esta medida se pretende permitir que los electrolizadores se conecten a la red general en fases iniciales, aprovechando el gran potencial hidroeléctrico de Paraguay, mientras desarrollen compromisos firmes y detallados para la construcción de capacidad renovable adicional.

Este enfoque busca alinear el crecimiento de la industria del hidrógeno verde con el aumento en la capacidad de generación renovable, facilitando una transición energética equilibrada y sostenible. Asimismo, se valorará introducir incentivos fiscales y económicos para aquellos proyectos que adelanten la implementación de sus parques renovables, asegurando un desarrollo armónico entre la producción de hidrógeno y la expansión del sector renovable.

• Fomento de una red eléctrica adaptativa para el apoyo a la industria del hidrógeno verde

En Paraguay, el desarrollo de la industria del hidrógeno verde es una oportunidad estratégica para fortalecer la economía nacional aprovechando su abundante potencial de recursos renovables.

¹⁰⁵ (ANDE, 2022).

Esto requiere la creación de una infraestructura eléctrica adaptativa que no sólo soporte las necesidades de la producción de hidrógeno verde, sino que también facilite una integración eficiente y sostenible en el sistema energético del país.

Fomentar una red eléctrica que trate de aprovechar y optimizar la producción de hidrógeno verde, implica establecer mecanismos que regulen desde aspectos asociados con su tarificación eléctrica hasta otros asociados con el grado de correlación temporal entre la generación eléctrica renovable y su consumo en una planta de hidrógeno verde, entre otros.

Este enfoque asegura que el desarrollo del hidrógeno verde contribuya al equilibrio y eficiencia del sistema eléctrico nacional.

Un marco normativo y tarifario específico permitirá a Paraguay maximizar los beneficios económicos y laborales de la expansión de la economía del hidrógeno verde, garantizando que este crecimiento sea coherente con las metas de sostenibilidad y seguridad energética del país.

Medida 10: Evaluar el diseño de un esquema de tarifas eléctricas industriales diferenciadas que optimice los costos eléctricos para la producción de hidrógeno verde, basado en la localización y la infraestructura de red disponible.

Evaluar el diseño de esquemas tarifarios diferenciados para la producción de hidrógeno verde, ajustando las tarifas eléctricas industriales de acuerdo con la proximidad de las plantas a los centros de generación renovable y la infraestructura de red eléctrica disponible.

Este diseño tarifario buscaría optimizar el uso del sistema eléctrico nacional, promoviendo la localización estratégica de las instalaciones de hidrógeno verde en zonas que minimicen las pérdidas de transmisión y maximizando la eficiencia operativa. Con esta medida se pretende incentivar un crecimiento ordenado y sostenible del sector, asegurando la integración de los proyectos de hidrógeno verde y derivados en el panorama energético del país

Medida 11: Analizar la viabilidad de tasas específicas para el consumo eléctrico en la producción de hidrógeno verde con objeto de garantizar su aportación al régimen retributivo como actividad industrial.

Analizar la viabilidad de implementación de un esquema de tasas específicas sobre el consumo eléctrico destinado a la producción de hidrógeno verde, cuyo objetivo sea crear un aporte directo al Fondo de Sostenibilidad definido en la medida 32.

Este fondo, gestionado por el Gobierno, se dedicará al financiamiento de proyectos estratégicos de transición energética, incluyendo tanto la expansión de las energías renovables como el crecimiento de la industria del hidrógeno verde.

El establecimiento de una tasa diferenciada busca que la producción de hidrógeno verde no solo contribuya al sistema eléctrico, sino también al desarrollo de nuevas capacidades energéticas que refuercen la sostenibilidad y resiliencia del sistema nacional.

Medida 12: Evaluar la implementación de un marco regulatorio de correlación temporal obligatoria entre la generación de energía renovable y el consumo de plantas de hidrógeno verde para optimizar la eficiencia del sistema energético.

Evaluar la implementación de un marco regulatorio integral que obligue a mantener una correlación temporal mínima entre la generación de electricidad en parques renovables adicionales asociados a plantas de hidrógeno verde y su consumo eléctrico. La presente medida busca garantizar que las instalaciones de hidrógeno utilicen su propia energía renovable generada en los periodos óptimos, mientras aprovechan los excedentes de la generación renovable adicional para alimentar la red eléctrica en horas pico, cuando la demanda es mayor.

Este enfoque pretende maximizar la eficiencia del sistema eléctrico paraguayo, promoviendo una gestión autónoma y flexible del consumo energético de las plantas de hidrógeno verde, fomentando así una mayor estabilidad y resiliencia en la red eléctrica nacional.

Medida 13: Evaluar la implementación de un marco regulatorio para integrar progresivamente sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

Evaluar la implementación de un marco regulatorio que promueva la incorporación gradual de sistemas de almacenamiento de hidrógeno como complemento a las centrales hidroeléctricas en Paraguay, evaluando su viabilidad técnica y económica con una visión a largo plazo.

Se evaluará, en su caso, una aplicación progresiva, teniendo en cuenta que su mayor impacto será en el largo plazo, cuando la demanda energética y las condiciones tecnológicas lo justifiquen plenamente.

El enfoque está orientado a convertir en hidrógeno aquellos excedentes hidroeléctricos que no puedan ser aprovechados de forma directa en el sistema eléctrico, especialmente en situaciones donde la generación supere la demanda interna. En este contexto, cuando las centrales hidroeléctricas operen a máxima capacidad debido a condiciones favorables, como un alto caudal o lluvias intensas, y la demanda eléctrica sea baja, los excedentes eléctricos podrían almacenarse en forma de hidrógeno para su uso estratégico en momentos de mayor demanda.

La implementación de este marco regulatorio buscaría optimizar la gestión de los recursos energéticos, alineando la producción y almacenamiento de hidrógeno con los objetivos de sostenibilidad y autonomía energética, asegurando una planificación eficiente para el futuro del sistema energético nacional.

4.3 Uso de agua para la producción de hidrógeno

• Reforma y alineación de las normativas existentes para una gestión sostenible del agua utilizada en la producción de hidrógeno verde

La transición hacia una economía sostenible requiere una gestión eficiente de los recursos hídricos, especialmente en la emergente industria del hidrógeno verde en Paraguay.

Es fundamental revisar las normativas existentes para asegurar que la producción de hidrógeno verde sea compatible con otros usos, garantizando la prioridad en el consumo humano y necesidades agropecuarias, así como la preservación de los ecosistemas nacionales.

La Ley N° 1614¹⁰⁶ y el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ERSSAN)¹⁰⁷ regulan el uso del agua, mientras que la Ley N° 3239¹⁰⁸ de los Recursos Hídricos del Paraguay establece directrices para su gestión sustentable. Estas normativas deben adaptarse para garantizar un uso responsable del agua en la producción de hidrógeno verde, promoviendo la sostenibilidad y la protección ambiental.

Medida 14: Evaluar una posible adaptación de la Política Nacional de Recursos Hídricos¹⁰⁹ para integrar criterios específicos para la producción de hidrógeno verde.

Evaluar una posible adaptación de la Política Nacional de Recursos Hídricos para incorporar criterios específicos aplicables a la producción de hidrógeno verde, bajo el marco de la Ley 3239/07 de los recursos hídricos del Paraguay. Esta evaluación pretende identificar las necesidades normativas que garanticen un acceso, uso y costo del agua, de forma que el desarrollo del hidrógeno verde no comprometa la disponibilidad de agua potable ni los recursos hídricos necesarios para la agricultura.

Asimismo, se evaluará la posibilidad de crear o asignar un organismo regulador independiente¹¹⁰, encargado de centralizar la gestión sostenible del agua a nivel nacional, promoviendo una administración eficiente y coordinada de los recursos hídricos, en estrecha colaboración con Consejos de Agua¹¹¹ y Comités de Cuencas locales.

Este organismo también sería el encargado de gestionar el Fondo del Agua, que se describe en la medida 33, destinado a financiar proyectos que aseguren la preservación de cuencas, el desarrollo de infraestructura hídrica, y la implementación de iniciativas de formación técnica y gestión hídrica, entre otros aspectos.

Esta medida permitirá fortalecer la seguridad hídrica de Paraguay, asegurando la preservación de sus recursos en el largo plazo y facilitando la expansión de proyectos de hidrógeno verde.

¹⁰⁶ (Gobierno Nacional del Paraguay, 2013).

¹⁰⁷ (Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ERSSAN), s.f.).

¹⁰⁸ La Ley 3239/2007 de los Recursos Hídricos del Paraguay establece un marco regulatorio para la administración eficiente y sostenible de las aguas y los ecosistemas acuáticos, buscando una gestión que integre todas las fases del ciclo hidrológico y la interrelación con otros recursos naturales, con el propósito de garantizar un desarrollo que beneficie equitativamente a la sociedad, preserve la economía y mantenga la integridad del medio ambiente para las presentes y futuras generaciones del país. (Gobierno Nacional de Paraguay, 2014).

¹⁰⁹ (MADES, 2020).

¹¹⁰ Se evaluará la creación o asignación de responsabilidades a la Secretaría Nacional del Agua u otro ente similar.

¹¹¹ Un consejo de aguas es un órgano regional de carácter deliberativo que se interesa sobre la gestión de las aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas, las cuales constituyen los recursos hídricos. Fue creada por la Resolución N° 170/06 de la Secretaría del Ambiente SEAM, y se ajusta a la Ley 3239/07 de los Recursos Hídricos del Paraguay que establece la Política Nacional de los Recursos Hídricos, la cual delinea la Gestión Integral de los mismos, tomando como unidad de gestión a la cuenca hidrográfica.

Medida 15: Evaluar el diseño de un sistema tarifario al agua progresivo que fomente la eficiencia hídrica en la producción industrial de hidrógeno verde.

Evaluar los requisitos para establecer un sistema tarifario al agua progresivo que promueva la eficiencia en el uso del agua para la producción de hidrógeno verde, alineado con los principios de la Ley N° 1614¹¹². Esta evaluación contemplará la idoneidad de una estructura de tarificación escalonada, en la que los costos del agua incrementarán a medida que aumente el volumen de consumo, con bloques diferenciados según el tipo de agua — potable, no potable o tratada— y el uso industrial específico.

Esta medida pretende garantizar prácticas hídricas responsables y el uso de tecnologías de tratamiento y reutilización de agua, evitando el uso no controlado de este recurso estratégico

Medida 16: Analizar la idoneidad en la implementación de una tasa asociada al consumo de agua en proyectos de hidrógeno verde para financiar un fondo destinado a la sostenibilidad hídrica (Fondo del Agua).

Analizar la idoneidad en la implementación de una tasa vinculada al consumo de agua en los proyectos de hidrógeno verde, con el objetivo de financiar el Fondo del Agua, descrito en la medida 33, destinado a la gestión sostenible y al desarrollo de infraestructuras hídricas. Esta tasa podría establecerse de forma diferenciada según el origen y calidad del agua utilizada, incentivando la reutilización de aguas no potables mediante exenciones fiscales.

A través de esta medida, se busca alinear los intereses de la industria del hidrógeno con los objetivos de conservación y uso eficiente del recurso hídrico, garantizando que los proyectos de hidrógeno contribuyan activamente al fortalecimiento de la infraestructura hídrica del país.

• Implementación de estrategias y protocolos para la conservación de los recursos hídricos ante la producción de hidrógeno verde industrial

La implementación de estrategias y protocolos para la conservación de recursos hídricos en la producción de hidrógeno verde es crucial para asegurar la sostenibilidad en Paraguay.

Este enfoque se alinea con el principio de precaución¹¹³ y la gestión sostenible de recursos naturales, garantizando que las necesidades actuales no comprometan la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Además, acuerdos como el "Acuerdo sobre el Acuífero

¹¹² (Gobierno Nacional del Paraguay, 2013).

¹¹³ Este principio se aplica especialmente en situaciones donde existe incertidumbre científica sobre los posibles daños ambientales o a la salud humana. Según este principio, la falta de certeza científica completa no debe ser utilizada como razón para posponer medidas eficaces para prevenir posibles daños ambientales o a la salud (Comisión Europea, 2016).

Guarani"¹¹⁴ y el "Acuerdo de Transporte Fluvial por la Hidrovía Paraguay-Paraná"¹¹⁵ establecen estándares y directrices para la conservación y uso sostenible de los recursos naturales, reforzando la cooperación regional y el cumplimiento de compromisos ambientales.

Medida 17: Analizar la necesidad de robustecer la normativa actual con objeto de garantizar la sostenibilidad y preservación de los recursos hídricos en la producción de hidrógeno verde.

Analizar la necesidad de robustecer la normativa actual con objeto de prevenir la contaminación hídrica por parte de la industria del hidrógeno verde, garantizando que los recursos hídricos de Paraguay se gestionen de manera sostenible y se preserven para el uso humano y agrícola.

Se revisará y evaluará la implementación de estándares estrictos de calidad del agua, prohibiendo el uso inapropiado de las aguas residuales o salinizadas que puedan comprometer las cuencas hídricas o acuíferos de Paraguay.

Asimismo, se revisará o evaluará la implementación de límites en los contaminantes generados por los procesos de electrólisis, pudiendo establecer un sistema de permisos y auditorías que aseguren el cumplimiento de estas normativas. La medida reforzará la Ley N° 3239 de los Recursos Hídricos, promoviendo una gestión integral, alineada con los principios internacionales de sostenibilidad hídrica.

Medida 18: Establecer mecanismos de restricción en el uso del agua para la producción de hidrógeno en situaciones de escasez hídrica.

Desarrollar un sistema integral y flexible de priorización y restricción del uso del agua para la producción de hidrógeno verde, particularmente en escenarios de vulnerabilidad hídrica, como posibles sequías o crisis hidrográficas.

Esta medida busca evaluar las necesidades de implementación de umbrales críticos de disponibilidad hídrica y su regulación. Entre otros aspectos, se evaluará la posibilidad de establecer restricciones dinámicas y escalonadas en función de la gravedad de la situación, con la finalidad de preservar los caudales y garantizar el suministro de agua para otros usos esenciales, como el consumo humano y la agricultura. Además, se incentivará a las industrias de alta demanda hídrica a desarrollar planes de emergencia que promuevan la eficiencia en el uso del agua y la implementación de tecnologías avanzadas de reciclaje y reutilización, equilibrando así las necesidades industriales con la sostenibilidad del recurso a largo plazo.

¹¹⁴ El "Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní", suscrito por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, representa un compromiso para la gestión sostenible y el uso racional del acuífero subterráneo, garantizando su conservación y protección (Gobierno Nacional del Paraguay, 2021).

¹¹⁵ El "Acuerdo de Transporte Fluvial por la Hidrovía Paraguay-Paraná", firmado por Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay, establece un marco de cooperación para el desarrollo y la gestión eficiente de este corredor fluvial (Gobierno Nacional del Paraguay, 2019).

Medida 19: Fortalecer los protocolos para la gestión del recurso hídrico empleado para la producción de hidrógeno, garantizando un uso sostenible, equitativo y responsable de estos a nivel nacional y en consonancia con los acuerdos internacionales.

Fortalecer los protocolos de gestión de los recursos hídricos en Paraguay, en el contexto de la producción de hidrógeno verde, con el objetivo de promover un uso sostenible, equitativo y eficiente del agua. A través de esta iniciativa, se evaluarán necesidades y se desarrollarán directrices que aseguren la preservación de los caudales mínimos en las cuencas hidrográficas afectadas y se introducirán prácticas de recirculación y reutilización del agua en las instalaciones de producción de hidrógeno.

El protocolo no solo se alineará con los acuerdos internacionales vigentes, como el “Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní”, sino que también buscará establecer estándares de monitoreo y supervisión para garantizar que los recursos hídricos sean gestionados de manera integral y en consonancia con los compromisos internacionales.

4.4 Infraestructura, logística y seguridad

• Planificación y desarrollo integral del transporte de hidrógeno, sus derivados y otros productos verdes

La planificación y desarrollo integral de la infraestructura logística necesaria para la operación, almacenamiento y transporte del hidrógeno, sus derivados y otros productos verdes, adaptada a sus características únicas, es esencial.

En este sentido, su planificación debe contemplar, entre otros aspectos, sistemas de almacenamiento, estaciones de carga, ductos especializados, flotas adaptadas o personal especializado.

La cooperación regional y la modernización de infraestructuras portuarias y aduaneras son cruciales para mejorar la eficiencia logística y la seguridad, facilitando un transporte seguro y económico del hidrógeno, sus derivados u otros productos verdes, lo que permitirá a Paraguay mejorar su capacidad de exportación y fortalecer su papel en el mercado global del hidrógeno.



Ilustración 37 – Esquema ilustrativo del desarrollo del plan estratégico de infraestructura logística¹¹⁶.

Medida 20: Desarrollar e implementar un plan estratégico de infraestructura logística dedicado al transporte y almacenamiento de hidrógeno, contemplando tanto redes nacionales como la exportación internacional.

Desarrollar e implementar un plan estratégico de infraestructura logística para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, diseñando una estructura robusta y adaptable que permita la distribución eficiente de hidrógeno, derivados y otros subproductos en todo Paraguay, y garantice su posible proyección hacia los mercados internacionales.

Para ello, se evaluarán diversas alternativas de transporte, tales como la optimización de los corredores fluviales y bioceánicos, los ductos de corta distancia, así como la adaptación de infraestructuras terrestres, asegurando una integración segura y eficiente de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno y derivados dentro de la red de distribución. Asimismo, se analizará, entre otros aspectos, la viabilidad de la creación de nuevas infraestructuras necesarias, como infraestructura ferroviaria, alineando esta Estrategia con las necesidades futuras de exportación internacional.

¹¹⁶ Esquema ilustrativo del desarrollo del plan estratégico de infraestructura logística que incluya un acuerdo de cooperación regional técnica y operativa para la implementación de mejoras en la Hidrovía Paraguay-Paraná, así como la adopción de tecnologías avanzadas en la modernización de infraestructuras portuarias y aduaneras. Análisis propio.

Medida 21: Promover un plan multilateral para optimizar la Hidrovía Paraguay-Paraná que garantice su capacidad logística ante el crecimiento esperado del tráfico de productos verdes.

Promover y coordinar esfuerzos con los países que comparten la Hidrovía Paraguay-Paraná para optimizar su infraestructura y capacidad logística, de forma que garantice un crecimiento del tráfico de productos verdes, como los fertilizantes derivados del hidrógeno. Este plan incluirá la promoción y coordinación de acuerdos de cooperación técnica y operativa, así como la actualización de mapas de navegación y la implementación de protocolos avanzados de dragado y mantenimiento, entre otros aspectos.

Dado que ciertos productos como el hidrógeno y sus derivados enfrentan limitaciones técnicas para ser transportados por la Hidrovía, se evaluará priorizar un enfoque en productos sólidos o líquidos más viables para el corto y mediano plazo, como los fertilizantes. De esta forma, con esta medida se pretende potenciar la capacidad logística de Paraguay en la región y asegurar que la Hidrovía esté preparada para soportar un incremento significativo en el tráfico de este tipo de productos verdes.

Medida 22: Evaluar el diseño de un plan de incentivos orientados a modernizar las infraestructuras logísticas y facilitar el transporte de productos verdes en la Hidrovía Paraguay-Paraná.

Evaluar el diseño de un plan de incentivos para promover la inversión privada en la modernización de infraestructuras portuarias y fluviales a lo largo de la Hidrovía Paraguay-Paraná. Este marco de incentivos se encontraría financiado por parte del Fondo de Sostenibilidad definido en la medida 32.

Con la previsión de un incremento en el tráfico de productos derivados del hidrógeno, como los fertilizantes verdes, estos incentivos se pretenderían adaptar las instalaciones y mejorar las capacidades logísticas para que puedan gestionar eficientemente el flujo creciente de estos productos. Este enfoque asegurará que Paraguay esté preparado para manejar la demanda futura de exportación de productos verdes, posicionándose como un actor logístico clave en la región. Esta medida promoverá la adopción de tecnologías avanzadas y fomentará la creación de una red logística más eficiente.

• Impulso a la innovación tecnológica y configuración de normativas específicas para el almacenamiento eficiente de hidrógeno, maximizando su valor energético

La innovación y regulación en el almacenamiento de hidrógeno verde son esenciales para una economía energética sostenible en Paraguay. Aprovechar las reservas naturales y desarrollar infraestructuras de almacenamiento permitirá maximizar el valor energético del hidrógeno.

Un enfoque proactivo en nuevas tecnologías y normativas garantizará eficiencia y seguridad, permitiendo un posicionamiento sólido de Paraguay en la economía del hidrógeno verde y contribuyendo al crecimiento económico, la creación de empleo y la sostenibilidad ambiental.

Medida 23: Desarrollar un análisis integral de las posibles tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, como la utilización de cavernas geológicas.

Llevar a cabo un análisis exhaustivo de las opciones tecnológicas más viables para el almacenamiento de hidrógeno en Paraguay, con un enfoque integral que considere tanto los aspectos técnicos como los posibles impactos ecológicos y sociales.

El análisis contemplará la posibilidad de utilizar sistemas de almacenamiento, como las cavernas geológicas, entre otras opciones, cuyo análisis incluirá la evaluación detallada de su capacidad de almacenamiento, seguridad operativa y compatibilidad con el entorno natural.

Particularmente, la exploración de las reservas geológicas del Chaco podría abrir oportunidades estratégicas para el desarrollo de instalaciones de almacenamiento a gran escala, siempre que se garantice una gestión responsable que minimice las repercusiones sobre la biodiversidad y respete los derechos de las comunidades locales. Este enfoque multidisciplinario permitirá desarrollar regulaciones específicas y guías técnicas que aseguren un almacenamiento eficiente y seguro de hidrógeno y derivados.

4.5 Usos finales y aplicaciones del hidrógeno

• Fomento de políticas de estímulo económico y apoyo financiero para integrar el hidrógeno en la infraestructura nacional

La transición hacia una economía baja en carbono es una prioridad global, en la que el hidrógeno verde emerge como un vector energético clave para alcanzar la descarbonización en sectores difíciles de abatir, como el transporte carretero pesado y de larga distancia, el transporte fluvial o determinadas industrias, como la industria química, la siderurgia o la producción de cemento, entre otras.

Paraguay cuenta con unas condiciones excepcionales para contribuir a esta transición global hacia la descarbonización, y posicionarse como actor relevante en los emergentes mercados globales de productos descarbonizados, como son los fertilizantes verdes.

Adicionalmente, una incorporación progresiva del hidrógeno verde en su economía, especialmente en el sector transporte, permitirá a Paraguay avanzar hacia sus objetivos de descarbonización¹¹⁷, cumplir con sus compromisos internacionales, además de garantizar la disponibilidad de combustibles renovables autóctonos.

En Paraguay, a pesar de contar con una matriz eléctrica 100% renovable, la dependencia actual de los derivados del petróleo en el transporte y en ciertos procesos industriales, se presenta como un área de oportunidad significativa para incorporar alternativas autóctonas y más sostenibles como el hidrógeno verde.

¹¹⁷ Los objetivos de descarbonización de Paraguay, según la actualización de la NDC de 2021, buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para 2030, comparadas con el escenario Business as Usual (BAU), lo que implica una reducción de las emisiones proyectadas de 102.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente a 82 millones de toneladas para dicho año. De este 20%, un 10% es incondicional y será alcanzado mediante recursos propios, mientras que el 10% restante depende de apoyo internacional en forma de financiamiento y tecnología (MADES - DNCC, 2021).

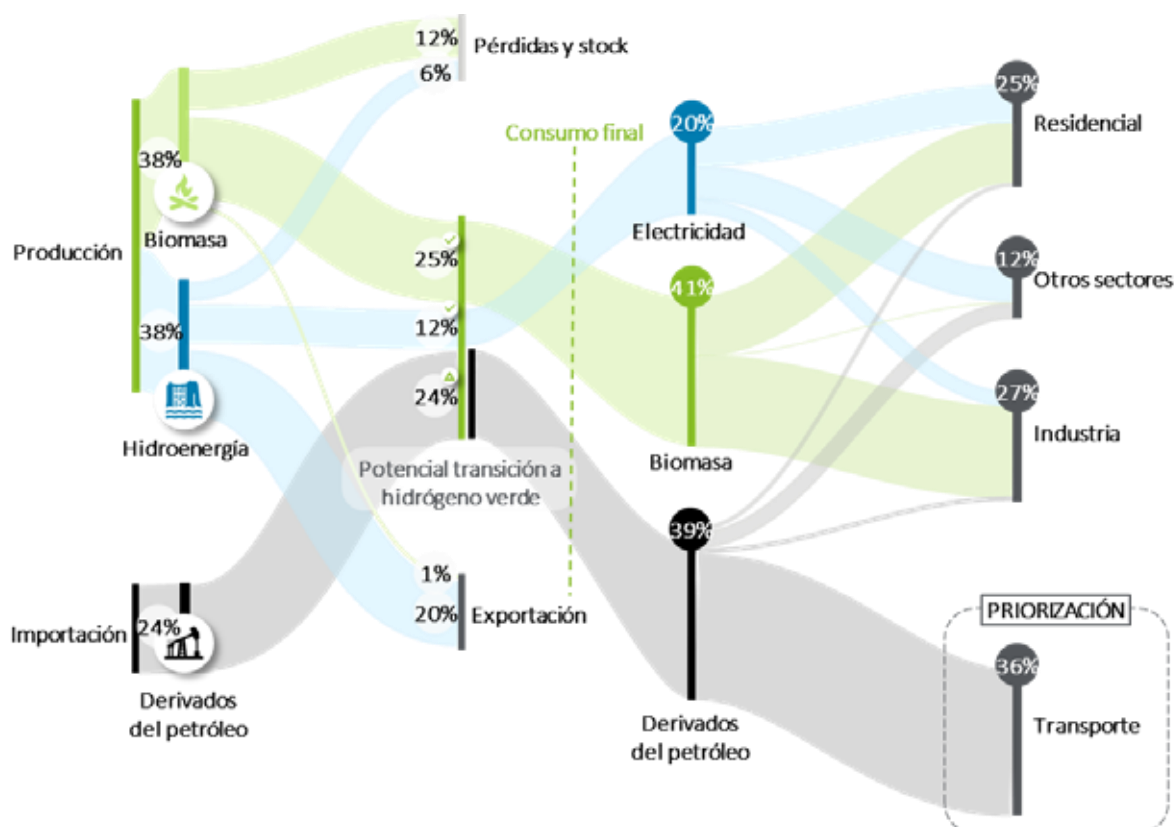


Ilustración 38 - Balance energético total de Paraguay¹¹⁸.

En los análisis de la matriz energética de Paraguay en 2022¹¹⁹, se aprecia que un porcentaje considerable de la energía consumida, aproximadamente el 39%, proviene de fuentes no renovables importadas, lo que afecta a la sostenibilidad ambiental del país, además de poder comprometer su seguridad energética en momentos de escasez o de precios elevados. Lo mismo ocurre con otros productos como los fertilizantes o el acero, donde la dependencia exterior es muy relevante.

El uso de hidrógeno verde en estos sectores catalizará el desarrollo de una economía del hidrógeno en Paraguay, promoviendo la innovación, el desarrollo tecnológico y la creación de nuevos mercados y oportunidades laborales.

Incentivar el desarrollo de hubs de hidrógeno en proximidad a los centros de consumo permitirá una transformación eficiente del hidrógeno verde en derivados y otros productos verdes, como fertilizantes verdes, lo que a su vez favorecerá el crecimiento de una industria emergente y sostenible en Paraguay.

Este enfoque minimizará los costos y las complejidades técnicas asociadas con el transporte del hidrógeno verde puro o sus derivados, fortaleciendo así la competitividad industrial del país.

¹¹⁸ (VMME, 2023).

¹¹⁹ (VMME, 2023)

Promover una economía del hidrógeno verde en Paraguay permite, a su vez, reforzar la industria, y la aparición de nuevos desarrollos industriales, como las asociadas con los fertilizantes verdes o la producción de combustibles sostenibles.

Medida 24: Promover la adopción de políticas que fomenten el uso de hidrógeno en determinadas actividades clave de la economía paraguaya, tales como la industria de fertilizantes o el transporte fluvial.

Evaluar alternativas políticas que impulsen la utilización del hidrógeno verde en sectores estratégicos de la economía paraguaya, priorizando acciones en distintos horizontes temporales.

En el corto plazo, este enfoque evaluará las necesidades con el desarrollo de una nueva industria de fertilizantes basada en el hidrógeno verde, aprovechando el potencial del hidrógeno verde para el desarrollo económico de Paraguay. Esta iniciativa permitirá a Paraguay fortalecer su sector industrial y convertirse en un actor clave en el mercado regional de fertilizantes verdes, con un enfoque en la autosuficiencia productiva y la competitividad exportadora.

En el corto-medio plazo, se evaluarán las necesidades para promover el uso del hidrógeno y sus derivados, como los e-fueles, en el transporte fluvial a través de la Hidrovía Paraguay-Paraná. La modernización de esta infraestructura permitiría a Paraguay no solo reducir su propia dependencia de los combustibles fósiles, sino también atraer a flotas internacionales de países vecinos, como las de Argentina y Brasil, interesadas en reducir su huella de carbono mediante el repostaje en puertos paraguayos que ofrezcan combustibles limpios. Esta acción estratégica posicionaría al país como un hub logístico regional para el abastecimiento de e-fueles, maximizando el uso de sus infraestructuras portuarias.

Medida 25: Definir un plan estratégico de hubs de hidrógeno para impulsar la industria de fertilizantes y productos verdes en Paraguay.

Definir un plan estratégico de hubs de hidrógeno verde que integre la producción de este recurso con su consumo en sectores clave, tales como la industria de fertilizantes.

A través de la localización estratégica de estos hubs, Paraguay podrá optimizar la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados, reduciendo los desafíos logísticos del transporte y facilitando el desarrollo de nuevas industrias.

Este enfoque permitirá que Paraguay se convierta en un referente regional, consolidando su posicionamiento como productor de fertilizantes y productos derivados del hidrógeno verde, y apoyando la expansión de mercados tanto locales como internacionales.

Medida 26: Evaluar el establecimiento de un plan transitorio para la descarbonización de la industria paraguaya que combine incentivos y obligaciones financiado por el Fondo de Sostenibilidad.

Evaluar la idoneidad de establecer un plan estratégico transitorio y de largo plazo para la descarbonización de la industria paraguaya, con el objetivo de estructurar la transición hacia el uso del hidrógeno verde y otras tecnologías sostenibles, dentro de un marco que combine incentivos financieros con regulaciones claras.

Se evaluaría la implementación de incentivos fiscales y esquemas de financiamiento verde, financiados a través del Fondo de Sostenibilidad definido en la medida 32, que se nutriría tanto de tasas derivadas de la producción de hidrógeno verde como de las contribuciones de aquellas industrias que no cumplan con los límites de emisiones que se establecerán en el plan.

Estos límites de emisión, junto con la posibilidad de desarrollar un mercado de carbono o mecanismos equivalentes, garantizarán que aquellas industrias que no puedan cumplir con las metas de descarbonización aporten financieramente al fondo. De esta manera, el plan permitiría una transición gradual, financiada de manera sostenible, y alineada con las oportunidades económicas del hidrógeno verde en Paraguay.

• **Implementación de mecanismos para la transición del transporte hacia una economía baja en carbono**

La implementación de mecanismos para la transición del transporte hacia una economía baja en carbono es crucial para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El hidrógeno verde, como fuente de energía limpia y renovable, ofrece una solución viable para descarbonizar el transporte pesado y transporte masivo público. Establecer una infraestructura adecuada y promover incentivos para la adopción de tecnologías de hidrógeno verde permitirá a Paraguay avanzar en su agenda de sostenibilidad, mejorar la calidad del aire y cumplir con los compromisos de actualización de la NDC¹²⁰.

Medida 27: Evaluar las necesidades asociadas para el desarrollo de un plan estratégico que planifique la expansión de una red nacional de hidrogeneras apoyada por un marco normativo que regule su construcción, operación y mantenimiento.

Evaluar las necesidades asociadas para el desarrollo de un plan estratégico que planifique la expansión de la infraestructura de hidrogeneras en Paraguay, priorizando la instalación de estaciones en rutas de transporte principales, y promover el uso del hidrógeno verde en el transporte pesado y de mercancías.

Para asegurar su viabilidad, se evaluará el diseño de un marco normativo robusto que regule la construcción, operación y mantenimiento de estas instalaciones, incorporando estándares técnicos avanzados que permitan una integración efectiva con el sistema energético y la infraestructura nacional. Además, se promoverá la colaboración público-privada a través de modelos de asociación que permitan compartir los riesgos y beneficios, acelerando la transición del sector transporte hacia un modelo basado en energías renovables.

¹²⁰ (MADES - DNCC, 2021).

Medida 28: Evaluar la idoneidad de establecer un marco de incentivos fiscales y financiamiento para impulsar el uso del hidrógeno verde en el transporte pesado de mercancías y en las flotas de transporte público de las ciudades o zonas de alta demanda.

Evaluar la idoneidad de establecer un marco de incentivos fiscales y mecanismos financieros que fomenten la adopción de vehículos de hidrógeno en el transporte pesado y en flotas de transporte público, reconociendo los desafíos económicos que enfrentan las empresas y operadores para incorporar estas tecnologías.

La iniciativa propone evaluar reducción en los costos a través de exenciones fiscales o mecanismos financieros para la adquisición de vehículos de hidrógeno, así como el desarrollo de la infraestructura necesaria para su operación y mantenimiento, entre otros aspectos.

En paralelo, se promoverá el desarrollo de proyectos piloto en ciudades clave, seleccionadas por su alta demanda de transporte público, para evaluar la eficiencia operativa y los beneficios medioambientales de esta tecnología.

Medida 29: Definir un plan de transición energética para la descarbonización del transporte fluvial en la Hidrovía Paraguay-Paraná.

Definir un plan regional para catalizar la descarbonización de la Hidrovía Paraguay-Paraná, mediante la adopción de combustibles sostenibles como el e-metanol. En este plan se evaluará una estrategia que no solo contemple la adaptación de las flotas mediante incentivos financieros y fiscales, sino también el despliegue de una red de infraestructuras de suministro en puertos estratégicos.

Se evaluará la ubicación óptima de las estaciones de repostaje de e-metanol con las rutas logísticas, permitiendo una adaptación progresiva de combustibles limpios por parte de las embarcaciones.

A su vez, los incentivos que se establezcan permitirían reducir las barreras económicas para la conversión de motores, apoyando a las embarcaciones en su evolución hacia una operación más eficiente y sostenible.

4.6 Elementos transversales

Para asegurar el éxito de la Estrategia y su integración efectiva en la economía y sociedad de Paraguay, se han definido cuatro elementos transversales, considerados como fundamentales para el desarrollo integral y sostenible de la industria del hidrógeno. Estos elementos transversales abordan aspectos críticos que, en conjunto, son indispensables para crear un entorno favorable y maximizar el impacto positivo de la estrategia.

A. Diseño regulatorio incentivador, estandarización y armonización

• Diseño regulatorio incentivador

Para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde es crucial diseñar un marco regulatorio favorable que promueva la inversión, fomente el desarrollo de mercados internacionales, estimule la demanda nacional y aumente su competitividad.

En este sentido, se deben establecer las bases para el diseño de un marco regulatorio estable y predecible, que elimine barreras regulatorias, simplifique los procedimientos administrativos y favorezca la competitividad de los productos basados en hidrógeno verde frente a otros productos tradicionales con base en carbono, además de garantizar reglas armonizadas con otros mercados internacionales, que garanticen el acceso de los productos basados en hidrógeno verde de Paraguay.

La adaptación de la demanda o el desarrollo de infraestructuras o soluciones logísticas que permitan el desarrollo de mercados nacionales o internacionales, requiere importantes inversiones. De esta forma, será clave establecer también políticas que provean acceso a financiamiento, incentivos fiscales y subvenciones a proyectos estratégicos en el campo del hidrógeno verde, garantizando un entorno competitivo justo que permita el desarrollo sostenible de la economía del hidrógeno verde en Paraguay.

La presente Estrategia establece medidas específicas agrupadas en los diferentes pilares. No obstante, estas medidas deben ser complementarias por otros aspectos transversales que se detallan a continuación.

Medida 30: Evaluar un desarrollo legislativo integral que promueva proyectos de hidrógeno verde con incentivos fiscales estratégicos.

Evaluar el desarrollo de un marco legislativo integral que impulse el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en Paraguay a través de incentivos fiscales estratégicos y un entorno normativo optimizado.

Se contemplará la inclusión de áreas clave con beneficios fiscales para atraer inversiones en sectores sostenibles que fomenten la creación de empleo de alta calidad y la innovación tecnológica.

Además, este marco debe garantizar que todos los proyectos cumplan con estrictos estándares de seguridad, eficiencia y sostenibilidad, garantizando que el desarrollo del hidrógeno verde en Paraguay esté alineado con los objetivos de transición energética, crecimiento económico y competitividad a nivel regional.

Medida 31: Evaluar la implementación de mecanismos de regulación flexible, como Sandbox Regulatorios para el hidrógeno verde.

Evaluar la implementación de un marco de regulación flexible y proactiva, mediante el desarrollo de Sandbox Regulatorios específicos para la industria del hidrógeno verde. Este enfoque permitirá la experimentación regulada de nuevas tecnologías y modelos de negocio, fomentando la innovación a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno: desde la producción y almacenamiento, hasta su distribución y uso final.

A través de estos Sandboxes, las empresas podrían operar en un entorno controlado donde se evaluarán los impactos y riesgos de manera temprana, ajustando las normativas de manera ágil y alineando la regulación con los avances tecnológicos.

Medida 32: Diseñar e implementar un Fondo de Sostenibilidad para impulsar proyectos estratégicos de hidrógeno verde en Paraguay.

Diseñar e implementar un Fondo de Sostenibilidad, financiado mediante un conjunto de mecanismos de financiación cruzada, tales como regulaciones, tasas impositivas, obligaciones y aportes de organismos e instituciones, con el fin de apoyar de manera integral el desarrollo de la economía del hidrógeno verde en Paraguay.

El fondo que se diseñe deberá garantizar los recursos necesarios para promover un desarrollo sostenible del hidrógeno verde, incluyendo iniciativas tales como la construcción de infraestructuras críticas, el impulso de proyectos industriales estratégicos y el fortalecimiento de las capacidades locales, entre otros aspectos, alineando todos los esfuerzos con los objetivos de la presente Estrategia.

Medida 33: Diseñar e implementar un Fondo del Agua para financiar proyectos de conservación, infraestructura y uso eficiente del recurso hídrico.

Diseñar e implementar un Fondo del Agua sostenible, financiado mediante mecanismos impositivos, tasas por uso industrial y regulaciones específicas sobre el consumo de agua.

El fondo que se diseñe deberá proporcionar los recursos necesarios para desarrollar infraestructuras críticas, asegurar la gestión sostenible de cuencas hidrográficas y fomentar proyectos que optimicen el uso del recurso hídrico, especialmente en sectores con alta demanda como la producción de hidrógeno verde.

El diseño de este fondo deberá garantizar una gestión integral del agua en el país, financiando tanto la modernización de infraestructuras como iniciativas de conservación, contribuyendo a la seguridad hídrica y a la sostenibilidad ambiental de Paraguay.

• Establecimiento de sistemas de garantías de origen (GdO) y esquemas de certificación del hidrógeno y sus derivados, para garantizar su reconocimiento a nivel global

En el marco del desarrollo sostenible y la búsqueda de nuevas oportunidades económicas, la producción de hidrógeno verde en Paraguay se presenta como un vector estratégico para la diversificación energética y la proyección internacional del país en mercados de energía limpia.

La creación de sistemas de certificación y garantías de origen (GdO) es esencial para consolidar la credibilidad del hidrógeno producido en Paraguay, asegurando su contribución a la sostenibilidad ambiental y al avance económico.

Este enfoque refleja el compromiso con los estándares internacionales de producción limpia, insertando a Paraguay en la economía global del hidrógeno con productos reconocidos por su calidad y origen renovable. La implementación de marcos normativos detallados y el desarrollo de entidades reguladoras dedicadas son pasos necesarios para garantizar la trazabilidad del hidrógeno verde desde su producción hasta su consumo, ofreciendo garantías sólidas a los mercados internacionales y promoviendo la confianza en los productos energéticos del país. La participación en iniciativas como CertHiLAC¹²¹ refuerza la posición de Paraguay como productor de hidrógeno verde y alinea al país con esfuerzos globales para estandarizar la producción y comercialización de hidrógeno sostenible, promoviendo prácticas que respetan el uso responsable de recursos naturales y el bienestar de las comunidades locales.

Medida 34: Desarrollar e implementar un sistema estructurado de certificación que categorice el hidrógeno, sus derivados y otros productos según su origen y sostenibilidad.

Desarrollar e implementar un marco de certificación estructurado para el hidrógeno verde y sus derivados, que integre un estándar para la medición y cálculo de la intensidad de carbono a lo largo de todo su ciclo de vida.

Para su desarrollo, se realizarán los análisis y evaluaciones pertinentes, con el fin de diseñar un sistema de certificación apropiado que no solo clasifique los productos según su origen y nivel de sostenibilidad, sino que también adopte un enfoque dinámico, actualizando los factores de emisión conforme a las mejores prácticas internacionales.

Con este fin, en su diseño se contemplará la adopción de acuerdos y mecanismos de reconocimiento internacional para garantizar que los productos certificados por Paraguay sean aceptados en los mercados globales estratégicos, facilitando su integración en las cadenas de suministro verdes y competitivas.

Medida 35: Diseñar un sistema de garantías de origen (GdO) para verificar la trazabilidad de la electricidad renovable empleada en la producción de hidrógeno verde, derivados y otros productos.

Diseñar un sistema integral de garantías de origen (GdO) para verificar la trazabilidad y el uso de electricidad renovable en la producción de hidrógeno verde.

El diseño de este sistema tendrá el fin de establecer un marco normativo con procedimientos detallados de medición, auditoría y certificación, asegurando que cada unidad de energía renovable pueda ser rastreada desde su generación hasta su uso final.

La medida también contemplará el impulso en la adopción de acuerdos internacionales que reconozcan la validez de las GdO emitidas en Paraguay, facilitando la exportación y aceptación de los productos de hidrógeno verde en mercados clave a nivel global.

¹²¹ (Christiaan Gischler - Eric Daza, 2023).

Medida 36: Designar un ente regulador encargado de la supervisión del sistema de certificación y de garantías de origen (GdO).

En la medida que se adopte un sistema de certificación y de garantías de origen, se designará un ente regulador encargado de supervisar el sistema de certificación del hidrógeno verde y las garantías de origen renovable, asegurando la integridad y transparencia de la trazabilidad desde la fuente de electricidad renovable hasta el consumo final.

Esta medida busca asignar dicha responsabilidad a un organismo, que podrá ser una entidad existente o uno de nueva creación, dotado con la autoridad para coordinarse con marcos internacionales, asegurando que los productos de hidrógeno verde de Paraguay cumplan con los estándares globales y puedan ser aceptados en los principales mercados.

El ente regulador designado podrá establecer un marco normativo que garantice auditorías y controles rigurosos para el sistema de certificación y de garantías de origen.

• **Normas de seguridad y otros estándares asociados con la producción, almacenamiento, transporte y usos finales del hidrógeno en Paraguay**

La adopción del hidrógeno verde como vector energético clave requiere un marco regulador robusto y estándares técnicos específicos. Actualmente, las normas y estándares aplicables al hidrógeno verde en Paraguay no son específicos o precisos, dependiendo de su ámbito de utilización, y no reflejando en muchos casos de forma adecuada los riesgos específicos y las oportunidades de la cadena de valor del hidrógeno, desde su producción hasta su uso final en diversas industrias, pasando por su almacenamiento y transporte.

La implementación segura y eficiente de proyectos de hidrógeno requiere, además de un marco regulatorio robusto, unos estándares técnicos precisos armonizados con otras normas internacionales. De esta forma la adopción de estándares internacionales permite establecer criterios técnicos consensuados por la industria. Su implementación debe ser coordinada con los desarrollos regulatorios que se realicen en la materia, con objeto de garantizar su cumplimiento.

Con estas acciones, no sólo se garantiza la seguridad y eficiencia de los proyectos de hidrógeno, sino que también permite potenciar las relaciones internacionales con marcos homogéneos en los mercados internacionales.

Esto permitirá minimizar riesgos, proteger a los operarios y la población, además de maximizar su producción y facilitar la aceptación social del hidrógeno como fuente de energía. Este enfoque impulsará la innovación, la creación de empleo y la sostenibilidad ambiental en el país.

Medida 37: Implementar un sistema de normalización técnica alineado con estándares internacionales para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde y derivados.

Desarrollar un sistema integral de normalización para la producción, almacenamiento, transporte y operación del hidrógeno y sus derivados, adaptando los estándares internacionales más avanzados al marco normativo nacional. El objetivo de esta medida es garantizar que cada fase de la cadena de valor del hidrógeno esté regulada bajo criterios de seguridad y eficiencia reconocidos globalmente.

A través de la colaboración con el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) y su Comité Técnico de Normalización (CTN) 70 de “Tecnologías del hidrógeno”, se busca asegurar que las tecnologías y procesos adoptados en Paraguay cumplan con los requisitos técnicos y normativos que faciliten su integración segura y eficiente en los mercados internacionales.

Medida 38: Desarrollar un marco normativo que garantice la seguridad en todas las fases de la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados.

Desarrollar un marco normativo exhaustivo que gestione la seguridad en toda la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados, desde su producción hasta su consumo final. Esta medida pretende revisar y adaptar las normativas actuales para asegurar que la producción, almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno verde se realicen bajo estrictos estándares de seguridad y sostenibilidad.

Además, este marco normativo incorporará protocolos alineados con las regulaciones internacionales más avanzadas, garantizando la mitigación de riesgos a lo largo de todas las fases, y facilitando la adopción del hidrógeno en sectores clave como la industria o el transporte.

Medida 39: Desarrollar un sistema de certificación que garantice la capacitación de operarios en la manipulación segura del hidrógeno o derivados.

Desarrollar un mecanismo de certificación que regule la capacitación exhaustiva de todos los operarios involucrados en la manipulación del hidrógeno y sus derivados, asegurando que cada trabajador cumpla con estrictos estándares de seguridad y competencia técnica.

A través de esta iniciativa se podrán establecer programas de formación que abarquen desde la física del hidrógeno hasta protocolos de emergencia, y que el título o certificado correspondiente sea accesible tanto a estudiantes de universidades como a técnicos, empleados actuales o trabajadores que deseen ampliar su formación.

Se evaluará, a su vez, la necesidad de renovación periódica de cada certificación, con objeto de que se adapten a los avances tecnológicos y garanticen la actualización continua de los conocimientos necesarios para una gestión segura del hidrógeno.

Medida 40: Implementar un esquema de certificación que clasifique la calidad del hidrógeno en función de su pureza y adecuación a diferentes usos.

Implementar un esquema de certificación que clasifique el hidrógeno según su pureza, alineando esta clasificación con las necesidades técnicas y operativas de sus diversas aplicaciones industriales y energéticas.

Esta medida propone que se diseñe y establezca un esquema riguroso que garantice que la calidad del hidrógeno sea adecuada para usos que van desde la producción de amoníaco en la industria química hasta la generación de electricidad en pilas de combustible, entre otros.

Este sistema deberá incluir métodos de análisis y verificación estandarizados, asegurando la coherencia y confiabilidad de los procesos de evaluación, mientras promueve un uso eficiente del hidrógeno a lo largo de su cadena de valor.

B. Desarrollo de capacidades e innovación

• Iniciativas de formación y políticas de empleo dirigidas a impulsar el desarrollo de nuevas capacidades y una fuerza laboral cualificada en la industria emergente del hidrógeno verde

Enfocarse en la formación especializada y la acreditación de competencias es esencial para que Paraguay prepare a sus ciudadanos para liderar en la transición energética hacia el hidrógeno verde. Promover la inclusión laboral local y el uso de recursos nacionales en proyectos de hidrógeno subraya el compromiso con el desarrollo sostenible y la creación de beneficios económicos tangibles.

Estas iniciativas representan una estrategia integral para capitalizar las ventajas de la economía del hidrógeno verde, con el objeto de permitir a Paraguay un posicionamiento estratégico entre los principales agentes regionales en el sector energético del futuro y garantizar la empleabilidad de la fuerza laboral nacional.

Medida 41: Diseñar un plan educativo integral que incluya el hidrógeno desde la enseñanza escolar hasta la creación de carreras técnicas y profesionales.

Diseñar un plan educativo integral que fomente la incorporación de conceptos sobre el hidrógeno verde en los planes de estudio desde la educación primaria hasta la formación universitaria, preparando a las futuras generaciones para los retos del sector energético. Este enfoque incluye la evaluación de la necesidad en la creación de nuevas carreras técnicas y programas especializados en áreas clave de la cadena de valor del hidrógeno, como la ingeniería química e industrial, en colaboración con universidades, instituciones técnicas y el sector privado.

A través de la red del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que reúne a las nueve universidades públicas de Paraguay y abarca todo el territorio nacional, se fomentará la cooperación académica y territorial en el desarrollo de estos programas. La medida establece también la promoción de programas de prácticas y alianzas estratégicas con proyectos de hidrógeno verde, fomentando una formación práctica y adaptada a las necesidades del mercado laboral emergente.

Medida 42: Diseñar un sistema integral de formación técnica y reconversión para integrar a trabajadores de otras industrias en el sector del hidrógeno y energías renovables, alineado con las demandas del sector.

Diseñar un sistema de formación técnica que aborde las necesidades de especialización en hidrógeno verde y energías renovables, facilitando la reconversión profesional de trabajadores activos y la creación de nuevas especialidades en áreas críticas de la transición energética. Esta medida establece el diseño de programas técnicos avanzados que incluyan tanto la formación en instalación, operación y mantenimiento de infraestructuras de hidrógeno como la integración de energías renovables, con un enfoque en la reconversión de la fuerza laboral existente.

Además, esta medida pretende garantizar que los empleados actuales en industrias en transformación no queden excluidos del mercado laboral, sino que reciban la capacitación técnica necesaria para adaptarse a las nuevas demandas del sector. Al mismo tiempo, se busca regularizar a la fuerza laboral, integrándola plenamente en la economía a través de programas de capacitación y acreditación que les permitan acceder a trabajos en el sector energético emergente, promoviendo la seguridad laboral y el crecimiento económico sostenible.

Medida 43: Fomentar la integración de mano de obra y empresas nacionales en la cadena de valor del hidrógeno verde, fomentando el uso de recursos locales para el crecimiento económico.

Promover un marco que impulse la contratación de mano de obra local, la utilización de recursos y materiales nacionales, y la participación activa de empresas paraguayas en el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde.

Esta medida pretende generar nuevas oportunidades de empleo, fomentar la capacitación de la fuerza laboral y fortalecer la industria nacional, integrando a empresas locales en áreas clave como la obra civil, la instalación y el mantenimiento de infraestructuras de hidrógeno y derivados. Asimismo, se busca asegurar que los beneficios económicos de la transición energética sean distribuidos equitativamente, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la autonomía económica de Paraguay.

• Refuerzo del compromiso con la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) para avanzar en las tecnologías del hidrógeno verde

El desarrollo del hidrógeno verde representa una oportunidad estratégica para impulsar el crecimiento económico, la innovación tecnológica y la generación de empleo, alineando las prioridades de desarrollo sostenible con las tendencias globales de sostenibilidad.

Fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en el campo del hidrógeno verde fortalecerá la autonomía energética del país y establecerá las bases para una industria competitiva y sostenible.

Medida 44: Fomentar el desarrollo de un Centro Tecnológico de Hidrógeno en Paraguay para coordinar la investigación, desarrollo y observación de tendencias globales, impulsando la innovación y la colaboración internacional.

Fomentar la creación de un único Centro Tecnológico de Hidrógeno, preferiblemente como parte del Parque Tecnológico Itaipú (PTI), que sirva de nexo entre las diferentes iniciativas y proyectos piloto desarrollados por el país, además de la coordinación transfronteriza con otros proyectos estratégicos.

Este centro coordinará y apoyará las actividades de investigación y pruebas tecnológicas en hidrógeno verde, gestionando y facilitando el desarrollo de un ecosistema de innovación sólido y coherente.

Medida 45: Fortalecer la inserción de Paraguay en la comunidad global del hidrógeno, promoviendo alianzas estratégicas y el desarrollo de capacidades nacionales en el ámbito del hidrógeno verde.

Impulsar la participación de Paraguay en la comunidad internacional del hidrógeno a través de su integración en redes globales como el Hydrogen Technology Collaboration Programme (Hydrogen TCP) de la Agencia Internacional de Energía¹²², y en otras iniciativas estratégicas internacionales.

Esta medida pretende fortalecer las capacidades nacionales mediante el acceso a

conocimiento especializado, tecnologías avanzadas y la implementación de proyectos colaborativos que impulsen el desarrollo del hidrógeno verde y derivados.

Al mismo tiempo, busca posicionar a Paraguay como un actor relevante en el mercado global del hidrógeno, facilitando la atracción de inversiones, la creación de alianzas y la alineación de sus estrategias nacionales con los compromisos internacionales en materia de cambio climático y sostenibilidad energética.

¹²² (Hydrogen Technology Collaboration Programme (Hydrogen TCP), 2020).

Medida 46: Promover alianzas estratégicas entre Gobierno, industria y academia para impulsar la innovación en la producción de hidrógeno verde y derivados.

Promover el desarrollo de un marco de colaboración público-privada que impulse la investigación y el desarrollo tecnológico en hidrógeno verde y derivados, promoviendo sinergias entre el Gobierno, la industria y la academia.

Esta medida pretende crear plataformas de interacción y proyectos conjuntos que favorezcan el intercambio de conocimientos y la innovación en los procesos de producción, almacenamiento y utilización del hidrógeno verde.

Asimismo, se evaluará la idoneidad de implementación de un sistema de incentivos fiscales, subvenciones y financiamiento dirigido a proyectos experimentales, facilitando la validación de tecnologías emergentes y asegurando un entorno propicio para la innovación continua en el sector energético de Paraguay.

Medida 47: Promover proyectos piloto para la producción de fertilizantes verdes y la descarbonización de flotas en la Hidrovía Paraguay-Paraná.

Impulsar proyectos piloto estratégicos que incluyan la producción de fertilizantes verdes basados en hidrógeno y la descarbonización de la Hidrovía Paraguay-Paraná, mediante la adopción de combustibles limpios como el e-metanol.

Esta medida pretende posicionar a Paraguay como un proveedor clave en el mercado de fertilizantes del Mercosur, al tiempo que busca transformar la flota fluvial hacia una operación más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. El enfoque en la descarbonización de la Hidrovía, como uno de los corredores más importantes de la región, garantizará una transición hacia prácticas más sostenibles y competitivas a nivel global, integrando a Paraguay en el escenario de la economía verde.



C. Fomento de alianzas internacionales

• Fomentar alianzas internacionales para fortalecer la cooperación, el comercio y la transferencia tecnológica en hidrógeno verde y productos derivados

El desarrollo de la industria emergente del hidrógeno y derivados depende en gran medida de la cooperación y el comercio con otros países. La integración en redes internacionales permite a Paraguay acceder a tecnologías avanzadas, conocimientos especializados y fuentes de financiamiento que son fundamentales para consolidar su posición en los mercados globales de hidrógeno verde y productos derivados, como los fertilizantes verdes.

Estas alianzas no solo facilitarán el comercio internacional, sino que también garantizarán que Paraguay cumpla con los más altos estándares en sostenibilidad y competitividad.

El establecimiento de tratados de cooperación y acuerdos estratégicos permitirá que Paraguay participe activamente en la economía global del hidrógeno verde, maximizando el uso de sus recursos naturales para impulsar el desarrollo sostenible.



Medida 48: Impulsar la validación de los certificados de hidrógeno verde y las garantías de origen renovables, para su aceptación en los mercados globales a través de colaboración internacional.

Impulsar la validación internacional de los certificados de hidrógeno verde y las garantías de origen renovables emitidos en Paraguay mediante la alineación de sus criterios con los estándares globales de sostenibilidad y bajas emisiones de carbono.

Esta medida pretende fomentar la adopción de normativas internacionales, como las contempladas por CertHiLAC¹²³ y la ISO/TC 197¹²⁴, garantizando la trazabilidad, el respeto al medio ambiente y el uso responsable de los recursos naturales. Además, busca establecer acuerdos de reconocimiento mutuo con mercados clave, fortaleciendo la competitividad internacional de Paraguay en el emergente sector del hidrógeno y sus derivados, asegurando su integración en la cadena de valor.



Medida 49: Promover tratados de cooperación internacional para la modernización de infraestructuras aduaneras y logísticas, facilitando el comercio seguro y eficiente de hidrógeno verde y derivados.

Promover tratados de cooperación internacional que favorezcan la modernización de infraestructuras aduaneras y logísticas a través de la adopción de tecnologías avanzadas, facilitando la eficiencia logística y el comercio seguro de hidrógeno verde y sus derivados en cumplimiento con las normativas internacionales de seguridad.

Esta medida pretende fortalecer las alianzas regionales en el Mercosur, impulsando una mayor cooperación técnica y operativa entre los países miembros, con el objetivo de

¹²³ (Christiaan Gischler - Eric Daza, 2023).

¹²⁴ (International Organization for Standardization (ISO), s.f.).

optimizar los procedimientos aduaneros y logísticos, mejorar la competitividad de los productos paraguayos y garantizar un transporte ágil, seguro y eficiente.

Medida 50: Fomentar la adopción de acuerdos estratégicos con mercados internacionales para favorecer la transferencia tecnológica, la financiación y el fortalecimiento de capacidades en la producción y comercialización de fertilizantes verdes.

Fomentar el afianzamiento y la adopción de nuevas alianzas estratégicas y tratados internacionales que permitan fortalecer la posición de Paraguay en el comercio global de fertilizantes verdes, facilitando la transferencia de tecnología avanzada, el acceso a fuentes de financiamiento y el desarrollo de capacidades nacionales.

Esta medida pretende favorecer acuerdos con mercados internacionales potenciales con objeto de garantizar el acceso a los mercados de exportación, incentivar la cooperación tecnológica y asegurar que los fertilizantes verdes producidos en Paraguay cumplan con los más altos estándares. Además, se promoverá la creación de marcos colaborativos que impulsen el crecimiento de la industria del hidrógeno verde y sus derivados en el contexto internacional.

D. Difusión y sensibilización

• Impulso de programas nacionales para la sensibilización y participación ciudadana en la transición hacia el hidrógeno verde

La sensibilización y participación ciudadana en la transición hacia el hidrógeno verde son esenciales para crear una base de apoyo y comprensión pública. Informar y educar a la población sobre el hidrógeno verde promoverá un entorno colaborativo donde diversos sectores puedan participar activamente en el diálogo y toma de decisiones.

Este enfoque fortalecerá el compromiso comunitario con la transición energética y asegurará que las iniciativas de hidrógeno verde reflejen las necesidades y aspiraciones de Paraguay, contribuyendo a un desarrollo sostenible y económico.

Medida 51: Impulsar la creación un “Clúster del hidrógeno verde” como catalizador de innovación y cooperación, promoviendo la creación de asociaciones y el fortalecimiento de los actores nacionales.

Impulsar la creación de un “Clúster del hidrógeno verde” en Paraguay como un núcleo estratégico que impulse la innovación y la cooperación en torno al desarrollo de esta tecnología, funcionando como un centro de convergencia para el intercambio de conocimiento, el fomento de políticas públicas y la creación de alianzas estratégicas.

Además, se promoverá la creación o el fortalecimiento de asociaciones y entidades ya existentes, con el objetivo de apoyar el desarrollo del hidrógeno verde en el país, facilitando la cooperación técnica, la divulgación de su impacto y la creación de espacios de diálogo y colaboración tanto a nivel nacional como internacional.



Medida 52: Definir un plan de socialización de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.

Definir un programa estratégico de comunicación y socialización que integre esfuerzos de educación pública y sensibilización acerca de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay. Esta medida pretende generar una comprensión profunda entre la ciudadanía, impulsando un respaldo informado a través de campañas de divulgación dirigidas, foros participativos y mecanismos de interacción comunitaria. Al promover una mayor participación social, el plan busca alinear las expectativas ciudadanas con los objetivos nacionales de desarrollo económico, fomentando una transición energética inclusiva y coherente.

E. Gobernanza

• Consolidación de una estructura de gobernanza que integre el hidrógeno verde en las directrices políticas y económicas nacionales

En el contexto paraguayo, el potencial para desarrollar una economía del hidrógeno verde no sólo representa una oportunidad para avanzar hacia la descarbonización y cumplir con los compromisos internacionales de sostenibilidad, sino también para impulsar el crecimiento económico, la innovación tecnológica y la creación de empleo. Al establecer un marco de gobernanza coordinado y transversal que involucre a todos los sectores relevantes, y al posicionarse estratégicamente en el escenario internacional, Paraguay podrá asegurar el desarrollo sostenible del hidrógeno verde, maximizando sus beneficios económicos y ambientales.

La implementación de estas medidas requiere de un enfoque integrado que fomente la cooperación entre el Gobierno, el sector privado, la academia y la sociedad civil, creando un ecosistema favorable para la inversión, la investigación y el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde que contribuyan al bienestar y al progreso del país.



Medida 53: Dotar al Viceministerio de Minas y Energía con las competencias y los recursos necesarios para coordinar e implementar la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.

Fortalecer al Viceministerio de Minas y Energía mediante la asignación de competencias y recursos que se identifiquen como necesarios, con objeto de que le permitan liderar la implementación de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay, con una coordinación ágil y eficiente entre actores públicos, privados y académicos. Este fortalecimiento institucional busca no solo optimizar la capacidad operativa del Viceministerio, sino también asegurar que las políticas y proyectos asociados se alineen con los objetivos nacionales.

De forma complementaria, se establece la necesidad de evaluar las necesidades de reforzar los recursos técnicos, financieros y humanos de otras instituciones públicas nacionales, para garantizar una implementación robusta y coordinada de la Estrategia a nivel nacional.

Medida 54: Desarrollar un plan de gobernanza interinstitucional para la ejecución efectiva de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.

Definir e implementar una estructura de gobernanza integrada y coordinada, que asigne roles y responsabilidades específicas a cada ministerio, en sinergia con actores clave del sector público y privado, para una gestión estratégica y eficaz de la política del hidrógeno verde.

Esta medida propone impulsar la creación de comités interministeriales especializados y grupos de trabajo colaborativos, que actúen como catalizadores para la sincronización de políticas, promoviendo la interacción continua entre la academia, el sector empresarial y el Gobierno. A través de esta estructura de gobernanza robusta, se facilitará el diálogo y la cooperación, asegurando que las iniciativas vinculadas al hidrógeno verde se implementen de manera coherente y eficiente, optimizando los recursos y maximizando los beneficios de la transición energética del país.

Medida 55: Implementar un sistema de monitoreo continuo y revisión periódica para el desarrollo de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.

Implementar un sistema integral de monitoreo y evaluación para la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay, bajo la coordinación del Viceministerio de Minas y Energía, con el objetivo de asegurar una gobernanza dinámica y adaptable.

Este sistema contempla la definición de indicadores clave de desempeño en colaboración con actores técnicos y ministeriales, permitiendo un análisis detallado y continuo del progreso. A través de evaluaciones y revisiones periódicas, se garantizará la capacidad de respuesta y ajuste de las políticas estratégicas, optimizando la alineación de los proyectos en curso con los objetivos nacionales.

5. PERSPECTIVA 2030-2050

La Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay busca producir hidrógeno verde y promover su uso en el país, especialmente en sectores como la industria y la movilidad. Se despliega en varias fases temporales, con metas que van desde lo inmediato hasta el largo plazo, abarcando diferentes áreas de acción para asegurar una transición efectiva hacia la economía del hidrógeno verde.

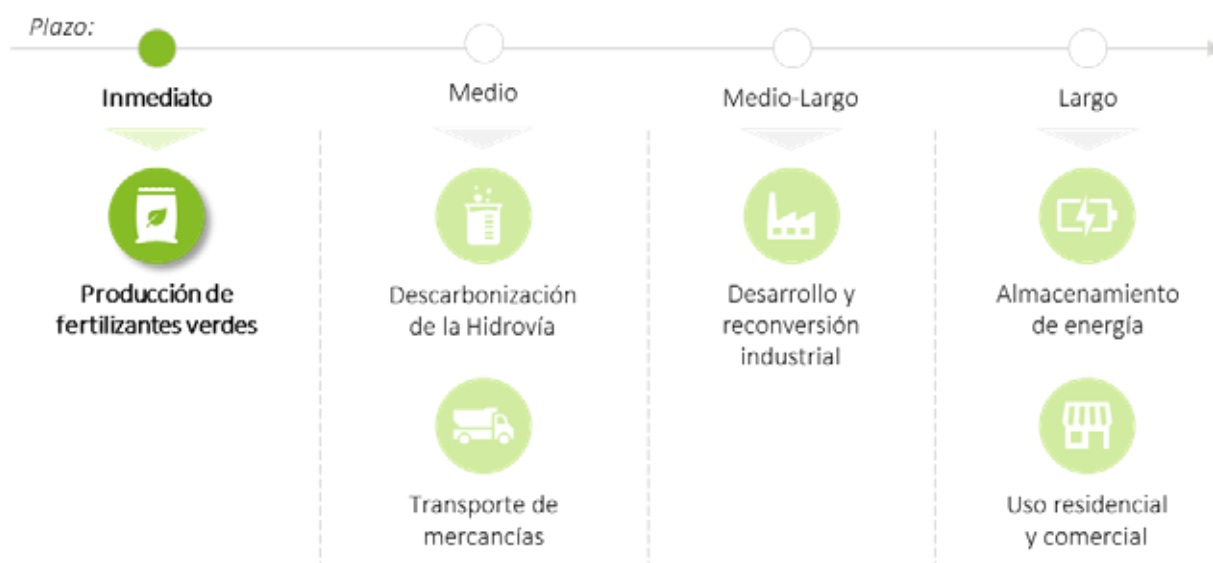


Ilustración 39 - Oportunidades de uso del hidrógeno verde en Paraguay¹²⁵

¹²⁵ Análisis propio.

- En el corto plazo, Paraguay puede aprovechar el mercado internacional de fertilizantes y su integración en el Mercosur para desarrollar una economía basada en el hidrógeno verde. Al producir amoníaco y fertilizantes verdes, Paraguay se alinearán con la tendencia hacia la agricultura sostenible, posicionándose como un proveedor clave en la región y otros mercados, y desarrollando una cadena de valor integrada desde la producción de hidrógeno verde hasta su aplicación agrícola.
- A medio plazo, esta Estrategia se enfoca en descarbonizar la Hidrovía Paraguay-Paraná y el transporte de carga pesada. La Hidrovía, crucial para la región, puede beneficiarse de combustibles limpios derivados del hidrógeno verde, como el e-metanol, reduciendo costos y emisiones. El e-metanol también tendría demanda en la creciente industria del biodiésel. Además, el hidrógeno verde es ideal para descarbonizar camiones y autobuses, proporcionando una solución eficiente para vehículos de larga distancia.
- En el medio-largo plazo, se promoverá el desarrollo de nuevas industrias y la reconversión de las existentes para utilizar hidrógeno verde, lo que permitirá descarbonizar sectores como el acero, hierro y cemento, sustituyendo al carbón y reduciendo emisiones de CO₂. Así, Paraguay fortalecerá su industria y mejorará su posición en mercados internacionales.
- Finalmente, en el largo plazo, el hidrógeno verde se utilizará para el almacenamiento de energía y en el ámbito residencial y comercial, sustituyendo a otros combustibles como el GLP. Esto implicará desarrollar una infraestructura de distribución que lleve hidrógeno a hogares y comercios, contribuyendo a una economía más sostenible y resiliente y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y la huella de carbono en todos los sectores de la sociedad.

La adopción de hidrógeno verde en diferentes sectores estratégicos permitiría el posicionamiento de Paraguay como uno de los países líderes en materia de sostenibilidad y productos sostenibles dentro del Mercosur y en el mercado global.

A continuación, se detallan las metas específicas establecidas para el año 2030, que describen los objetivos concretos que Paraguay se ha propuesto alcanzar para consolidar esta transición hacia una economía basada en el hidrógeno verde.

5.1 Metas 2030

Hasta el año 2030, con el objeto de que Paraguay se posicione en los mercados internacionales en aquellos ámbitos donde su potencial es mayor, concretamente en la industria de fertilizantes verdes y el transporte, se establecen unos objetivos concretos en términos de producción, utilización y desarrollo de capacidades, que combinan desarrollo industrial, atracción de inversiones privadas y fortalecimiento de capacidades locales.

La fijación de estos objetivos concretos y mecanismos adecuados para su evaluación permite dar seguimiento al impacto real y la efectividad de las líneas de acción y medidas definidas en esta Estrategia. Su evaluación periódica facilita, a su vez, la aplicación de nuevas medidas que permita acelerar la transición y alcanzar los propósitos establecidos.



Ilustración 40 – Metas de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2030.

• Producción de hidrógeno verde

Para 2030, se proyecta alcanzar una capacidad instalada de 1 GW de electrolizadores, lo que permitirá producir aproximadamente 90 mil toneladas de hidrógeno verde al año, dependiendo de la eficiencia, de las horas de funcionamiento y del tipo de electrolizadores utilizados.

Se plantea un desarrollo gradual, con una capacidad prevista en el año 2028 de aproximadamente 100 – 300 MW. Este desarrollo gradual permite minimizar los riesgos asociados de integración con el sistema eléctrico paraguayo.

Los electrolizadores estarán ubicados estratégicamente cerca de instalaciones industriales para la producción de derivados del hidrógeno, como por ejemplo, amoníaco o e-metanol, además de industrias que produzcan fertilizantes verdes.

• Uso de hidrógeno verde en la industria

Dado que el uso final más inmediato del hidrógeno verde se pretende que sea la industria de los fertilizantes verdes, se proyecta un crecimiento significativo en este sector.

Se prevé que para 2030 se alcance una producción de 900 kton de fertilizantes verdes anuales.

Este objetivo se podrá lograr con aproximadamente 0.5 GW de potencia instalada en electrolizadores, lo que permitirá satisfacer la creciente demanda de fertilizantes sostenibles

Asimismo, para el año 2030, se proyecta que, al menos, el 80-100 % del hidrógeno consumido en las industrias nacionales sea hidrógeno verde.

En los últimos 10 años, el consumo de hidrógeno en Paraguay ha sido de aproximadamente 260 kg anuales, siendo 160 kg en el 2023.¹²⁶ Con la instalación de 1 GW de capacidad en electrolizadores, se espera poder cubrir el 80-100 % de esta demanda, eliminando así la necesidad de importar hidrógeno gris y reduciendo la dependencia energética del país.

Además, se proyecta que el 80-100 % del amoníaco consumido por las industrias paraguayas sea amoníaco verde, incluyendo el utilizado para producir los fertilizantes verdes.

En la última década, Paraguay ha importado una media anual de 60 toneladas de amoníaco, alcanzando aproximadamente 170 toneladas en 2023.¹²⁷ Para 2030, se proyecta que el 80-100 % del amoníaco consumido por las industrias paraguayas, incluidas las que producen fertilizantes verdes, sea amoníaco verde. Este cambio permitirá sustituir el amoníaco gris importado, promoviendo una mayor sostenibilidad y autosuficiencia en la industria nacional.

• Transporte

La Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay pretende contribuir de forma estratégica a un transporte y movilidad más sostenible, de forma coordinada con la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, la cual establece objetivos ambiciosos para el 2030, incluyendo electrificar el 10-20% de la flota vehicular de las instituciones públicas y de la flota de transporte público, así como un mínimo de 300 puntos de carga públicos.¹²⁸

Para contribuir a estos objetivos, se prevén los siguientes hitos específicos relacionados con el hidrógeno verde:

- **Proyecto piloto de barcas en la Hidrovía Paraguay-Paraná:** Se desarrollará 1 proyecto piloto de barcas de e-metanol navegando por la Hidrovía Paraguay-Paraná, con el objeto de

¹²⁶ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024).

¹²⁷ Para producir 900 kton de fertilizantes verdes, se estima que se necesitan aproximadamente 250 kton de amoníaco.

¹²⁸ (Paraguay G. d., Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, 2021).

contribuir al desarrollo de las capacidades tecnológicas a nivel nacional, evaluar técnica y económicamente su factibilidad, y contribuir al desarrollo futuro de un proyecto que permita modernizar y descarbonizar la Hidrovía, de forma coordinada con el resto de los países por los que transcurre la Hidrovía.

- **Vehículos pesados:** Las pilas de combustible de hidrógeno permiten descarbonizar de forma más efectiva el transporte pesado por carretera. Paraguay cuenta con una importante flota de vehículos pesados para el transporte nacional e internacional. Se espera contar con un parque de al menos 100 vehículos pesados de pila de combustible de hidrógeno (FCEV, por sus siglas en inglés) para el transporte de mercancías en 2030.
- **Flota de autobuses:** 2 proyectos piloto de autobuses públicos de pila de combustible de hidrógeno operarán en 2030, distribuidos por todo el territorio nacional como paso previo al desarrollo de proyectos a escala. Uno de los proyectos será para media y larga distancia, conectando ciudades del país, y el otro será para flotas urbanas, priorizando ciudades con más de 200,000 habitantes, como Asunción, Ciudad del Este, Encarnación, Luque, San Lorenzo y Capiatá.
- **Red de hidrogeneras:** Se establecerá una red de 5-10 hidrogeneras para el repostaje de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno, ubicadas estratégicamente por las principales rutas de transporte de mercancías del país, con objeto de dar respuesta a la nueva demanda.
- **Otros objetivos 2030**

Los objetivos anteriores facilitarán el despliegue de 1,000 millones de USD para proyectos a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno renovable, incluyendo la producción de hidrógeno, generación renovable adicional, transporte y usos finales del hidrógeno, derivados y otros productos verdes.

5.2 Visión 2050

En el horizonte comprendido entre los años 2030 y 2050 se prevé un desarrollo a gran escala de las tecnologías renovables y basadas en hidrógeno verde a nivel global, con un posicionamiento competitivo de Paraguay.

Paraguay en este periodo, apoyado en la competitividad de sus productos verdes como los fertilizantes verdes, habrá afrontado una transformación económica y social, apoyado en la reconversión de su industria, con nuevos productos posicionados en mercados internacionales, con un importante retorno económico a nivel nacional y la creación de nuevos empleos de calidad.

Para ello, esta Estrategia a través de sus líneas de acción y medidas permitirá:



Ilustración 41 – Objetivos de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2050¹²⁹

- 1. Garantizar la adicionalidad de renovables:** A partir de 2030, garantizar que el nuevo hidrógeno verde sea producido exclusivamente con nuevas fuentes de energía renovable, especialmente a gran escala, que entren en funcionamiento en un plazo próximo.
- 2. Sistema eléctrico moderno y resiliente:** Fortalecimiento de un sistema eléctrico con estándares internacionales de calidad, que permita la integración masiva de nueva generación renovable a gran escala y la integración de grandes proyectos con base en el hidrógeno verde.
- 3. Desarrollo de hubs y corredores de hidrógeno:** Ampliar el desarrollo de hubs de hidrógeno a nivel nacional y establecer corredores que conecten los mercados nacionales e internacionales, que fomenten la conectividad y el tránsito transfronterizo.
- 4. Reconversión industrial:** Promover la transformación y modernización industrial nacional, con nuevos procesos más eficientes, implementación de nuevas tecnologías y la fabricación de productos verdes con alta demanda internacional, como acero verde, el cemento verde o los plásticos verdes.
- 5. Nuevos empleos en un mercado laboral de más calidad:** Crear empleos de alta calidad mediante la incorporación de nuevas capacidades que den respuesta a las nuevas necesidades industriales y logísticas. Los nuevos programas de formación y capacitación, permitirán la incorporación y reconversión de la fuerza laboral nacional, a la nueva demanda laboral que se generará en torno al mercado del hidrógeno verde.
- 6. Modernización de infraestructuras:** Modernizar las infraestructuras portuarias y carreteras, creando nuevos centros logísticos estratégicos para el comercio nacional e internacional.
- 7. Hidrovía modernizada y descarbonizada:** Modernizar y descarbonizar la Hidrovía para absorber un mayor volumen de tránsitos de manera más eficiente y sostenible en respuesta a los mercados internacionales.

¹²⁹ Análisis propio.

8. **Movilidad y transporte sostenible:** Desarrollar una movilidad y transporte más sostenible, donde el hidrógeno, a través de combustibles sintéticos (e-fueles) y pilas de hidrógeno, permita descarbonizar áreas donde la electromovilidad no llegue.
9. **Mayor integración regional:** Fomentar la integración regional en los mercados y con los países vecinos, promoviendo el desarrollo de infraestructuras y nuevos acuerdos comerciales que permitan tránsitos menos burocráticos y más rápidos de productos verdes.



6. PROYECTOS PILOTO

Posibles aplicaciones con mayor inmediatez e impacto en Paraguay

El hidrógeno tiene el potencial de convertirse en un vector energético clave a nivel global. En la actualidad, el hidrógeno gris ya tiene un mercado establecido, aunque su uso se limita principalmente a aplicaciones industriales y su escala es aún reducida en comparación con las expectativas de crecimiento a largo plazo. Sin embargo, lo que aún no está completamente desarrollado es el uso del hidrógeno renovable, como el hidrógeno verde, como alternativa viable a otros combustibles fósiles en sectores como la industria, el transporte o la energía.

El reto principal para la adopción masiva del hidrógeno verde radica en la falta de infraestructura global para su producción y distribución a gran escala.

En este contexto, el desarrollo de proyectos para la producción de derivados del hidrógeno, como el amoníaco y el e-metanol, se presenta como una posible solución estratégica.

Estos compuestos permiten almacenar grandes cantidades de hidrógeno y ofrecen aplicaciones directas en sectores como la industria química y el transporte, lo cual facilita su adopción mientras las tecnologías para el uso directo del hidrógeno continúan evolucionando.

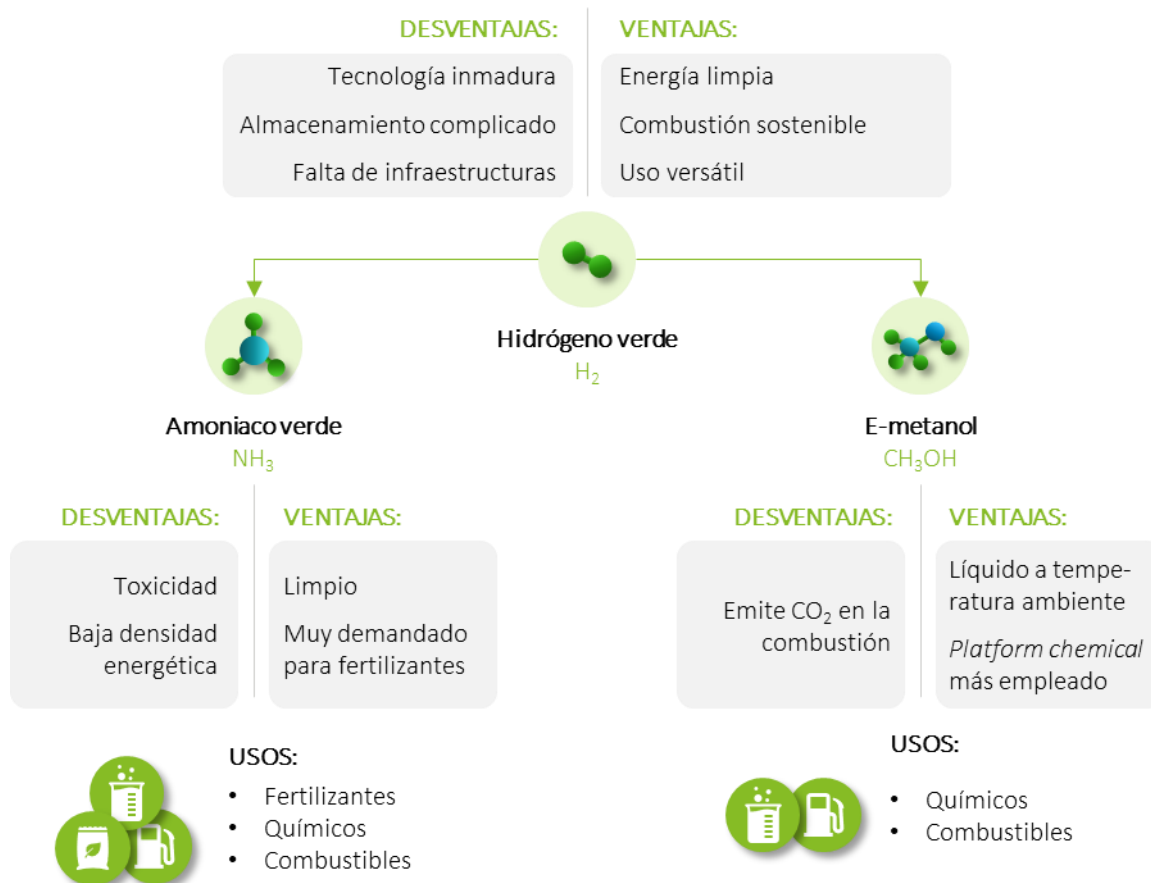


Ilustración 42 - Ventajas y desventajas del hidrógeno, amoníaco y e-metanol¹³⁰

A. Producción de amoníaco verde para producir Fertilizantes verdes

Paraguay se encuentra ante una oportunidad estratégica para posicionarse en el mercado internacional de fertilizantes a través del desarrollo del amoníaco verde.

Tradicionalmente, el amoníaco, producido por el proceso *Haber-Bosch* con gas natural, emite significativas cantidades de CO_2 . Sin embargo, al utilizar hidrógeno verde, derivado de fuentes renovables, en un proceso adaptado conocido como *Green Haber-Bosch*, es posible reducir drásticamente estas emisiones. Este enfoque está alineado con las tendencias globales hacia la descarbonización, lo que posiciona al amoníaco verde como una solución atractiva para sectores industriales contaminantes, entre los que destaca el sector agrícola.

En Paraguay, la producción agrícola, especialmente la de soja, maíz y trigo, depende en gran medida de fertilizantes nitrogenados, cuya base para la producción es el amoníaco. Con una producción de aproximadamente 10.2 millones de toneladas de soja en 2021¹³¹ y una creciente demanda de

¹³⁰ Análisis propio.

¹³¹ (Paraguay B. C., Banco Central del Paraguay, 2024). Análisis propio.

fertilizantes en países vecinos como Brasil, Argentina y Bolivia, Paraguay tiene la capacidad de convertirse en un proveedor de fertilizantes sostenibles dentro del Mercosur. Este posicionamiento se ve reforzado por la capacidad del país para generar hidrógeno verde de manera eficiente y a bajo costo gracias a sus recursos hidroeléctricos y la infraestructura eléctrica existente, que permite un suministro constante de electricidad renovable.

Producción en Paraguay

Amoníaco verde



Amoníaco verde
NH₃

SITUACIÓN:

Paraguay es uno de los mayores productores de soja a nivel mundial

Déficit en la balanza comercial en cuanto a importaciones / exportaciones de fertilizantes

La producción de amoníaco es contaminante al requerir gas natural

Disponibilidad de energía hidroeléctrica

OPORTUNIDAD:

Producción de sus propios fertilizantes nitrogenados y nitrogenados complejos

Posicionamiento en mercados internacionales de fertilizantes verdes, en el Mercosur y Brasil

Descarbonización de un sector tradicionalmente contaminante

Ventaja competitiva para producir amoníaco renovable a menor precio ininterrumpidamente

Ilustración 43 - Oportunidad de Paraguay en la producción de amoníaco verde¹³²

La tendencia hacia una agricultura más sostenible en el Mercosur y otros mercados internacionales favorece la demanda de fertilizantes verdes.

Paraguay puede aprovechar su proximidad a estos mercados agrícolas clave para establecer una cadena de valor integrada, desde la producción de hidrógeno verde hasta la fabricación de fertilizantes sostenibles, lo que contribuye a diversificar su economía y a fortalecer su industria química.

Además de la producción de fertilizantes, el amoníaco verde también tendría el potencial de servir como combustible alternativo, especialmente en el sector marítimo y fluvial, debido a su alta densidad energética y facilidad de almacenamiento, lo que abre nuevas oportunidades comerciales en los mercados emergentes de combustibles sostenibles. No obstante, el uso de amoníaco presenta desafíos significativos debido a su toxicidad y la necesidad de manejarlo con precauciones adicionales para evitar riesgos a la salud y el medio ambiente. Por este motivo, numerosas empresas y proyectos en el sector están comenzando a priorizar el uso del e-metanol como combustible alternativo. El e-metanol, aunque menos denso energéticamente que el amoníaco, es

¹³² Análisis propio.

menos tóxico y presenta un manejo más seguro, lo cual facilita su adopción para flotas comerciales y contribuye a la transición hacia combustibles sostenibles en el transporte marítimo y fluvial.

Además, el desarrollo del amoníaco verde en Paraguay permitiría no solo satisfacer la demanda interna de fertilizantes, sino también explorar su exportación en el mediano y largo plazo. Aunque el amoníaco tiene el potencial de actuar como portador de hidrógeno, facilitando su almacenamiento y transporte a larga distancia, actualmente enfrenta limitaciones logísticas en la Hidrovía Paraguay-Paraná, ya que los buques de gran calado necesarios para su transporte tienen dificultades para circular por esta vía. Esto restringe las opciones de exportación a corto plazo y enfoca la prioridad inmediata en la producción de fertilizantes verdes, los cuales pueden transportarse con mayor facilidad y menor costo hacia los mercados regionales.

Sin embargo, a futuro, con inversiones en infraestructura, como el aumento del calado de la Hidrovía y la adaptación de puertos, el amoníaco verde podría consolidarse como una opción competitiva para el transporte de hidrógeno y fertilizantes hacia mercados internacionales, maximizando el valor añadido del hidrógeno verde producido a partir de fuentes renovables.

• **Identificación de proyectos clave:**

En el contexto de la economía paraguaya, el uso directo del amoníaco presenta un valor limitado, dado que no existen grandes consumidores locales fuera del sector agrícola. Sin embargo, su potencial como insumo esencial en la producción de fertilizantes nitrogenados sostenibles le otorga un valor agregado significativo. Aunque también se considera su uso como combustible en la descarbonización del transporte marítimo, este enfoque es secundario frente a la oportunidad que representa en la producción de fertilizantes.

La producción de fertilizantes nitrogenados sostenibles en Paraguay ofrece una ventaja estratégica al mejorar la productividad agrícola, especialmente en cultivos clave como la soja, reducir la dependencia de importaciones y contribuir a la descarbonización de una industria históricamente emisora. Esta iniciativa refuerza el papel de Paraguay como un proveedor de soluciones agrícolas sostenibles en la región, alineándose con las tendencias de descarbonización global.

El desarrollo de una planta de producción de hidrógeno verde de 100 MW en Paraguay aprovecharía la abundante hidroelectricidad del país, permitiendo producir hidrógeno verde de forma competitiva y eficiente.

Este proyecto contribuiría al posicionamiento de Paraguay en el mercado regional de fertilizantes sostenibles, respondiendo a la demanda de productos verdes y generando nuevas oportunidades industriales a partir de sus recursos renovables. Con esta capacidad instalada, Paraguay podría consolidarse como un proveedor de fertilizantes verdes y otros derivados de hidrógeno en el Mercosur, contribuyendo a la sostenibilidad del sector agrícola regional y fortaleciendo su rol en la cadena de valor de energías limpias. El dimensionamiento de 100 MW es óptimo para el contexto paraguayo, ya que permite una inversión inicial controlada mientras se beneficia de las economías de escala necesarias para hacer el proyecto viable en el corto y largo plazo.

Paraguay cuenta con una oportunidad estratégica para desarrollar una industria de fertilizantes verdes, aprovechando su capacidad de producir amoníaco verde a partir del hidrógeno verde producido.

Este proyecto permitiría satisfacer parte de la demanda interna de fertilizantes nitrogenados en sectores agrícolas clave, como la producción de soja, maíz y trigo, y fortalecer el suministro hacia mercados regionales en el Mercosur.

Además, con la infraestructura de la Hidrovía Paraguay-Paraná, el país podría transportar estos fertilizantes de manera eficiente y competitiva, minimizando los costos logísticos y contribuyendo a la sostenibilidad del sector agrícola regional. Esta iniciativa no solo responde a la creciente demanda de soluciones agrícolas sostenibles, sino que también posiciona a Paraguay como un proveedor clave de fertilizantes verdes en Mercosur, generando oportunidades de empleo y crecimiento económico en el sector.

Para la planta de 100 MW de fertilizantes verdes que utilizará hidrógeno renovable, las áreas cercanas a las represas de Itaipú y Yacyretá destacan como las ubicaciones más viables.



Ilustración 44 - Características de los proyectos clave para la producción de fertilizantes verdes¹³³

¹³³ Análisis propio.

Estas zonas ofrecen acceso directo a una fuente abundante y confiable de energía hidroeléctrica, fundamental para alimentar los electrolizadores que producirán hidrógeno. Además, la infraestructura eléctrica ya existente en estas áreas facilita la integración de nuevas instalaciones industriales sin necesidad de grandes inversiones adicionales en redes de distribución. La proximidad a los principales centros agrícolas de Paraguay, como el Chaco y las regiones orientales, también reduce los costos logísticos asociados a la distribución de fertilizantes dentro del país. Las ubicaciones estratégicas para la producción de fertilizantes verdes en Paraguay aprovechan la infraestructura logística existente, especialmente por su cercanía a centros agrícolas y su conexión con redes de transporte fluviales y carreteras. Esta conectividad asegura que los insumos y los fertilizantes sostenibles puedan distribuirse eficientemente tanto en el mercado interno como en los países vecinos, promoviendo la autosuficiencia agrícola del país y apoyando una agricultura más sostenible en la región.

Una ventaja adicional de las ubicaciones seleccionadas para la producción de fertilizantes verdes en Paraguay es el potencial para establecer clústeres industriales en torno a la energía renovable y tecnologías de producción sostenible, atrayendo inversiones en tecnología verde e innovación. Estos clústeres permitirían el desarrollo de una cadena de valor sostenible, integrando la producción de hidrógeno verde y su conversión en fertilizantes.

Con acceso a agua, energía limpia, y una red de transporte eficiente que incluye la Hidrovía Paraguay-Paraná, Paraguay se posiciona para garantizar no solo el funcionamiento de estas plantas de fertilizantes, sino también para fortalecer su rol como proveedor de insumos agrícolas sostenibles en la región, promoviendo una industria nacional más competitiva.

L. Producción de e-metanol para la descarbonización de la Hidrovía

Paraguay se encuentra en una posición privilegiada para aprovechar la producción de e-metanol, un compuesto clave en la industria global y con un creciente rol en la sostenibilidad. Como un *"platform chemical"* esencial, el metanol es utilizado en la fabricación de pesticidas, plásticos y desinfectantes, productos que sustentan tanto la industria agrícola como la manufacturera en Paraguay. La proximidad de Paraguay a importantes mercados de consumo de metanol, como Brasil y Argentina, es una ventaja estratégica; Brasil, en particular, se destaca como uno de los mayores consumidores de metanol a nivel mundial gracias a su robusta industria química y energética.

La proximidad de Paraguay a los mercados regionales le brinda una posición estratégica para atender la demanda de metanol, con un enfoque en la producción sostenible de e-metanol.

La producción de e-metanol, que se obtiene a partir de hidrógeno verde combinado con CO₂ capturado, representa un camino viable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Paraguay, con su abundante acceso a energía hidroeléctrica, tiene una ventaja competitiva para desarrollar una industria de e-metanol. Esta ventaja es particularmente relevante dado el interés

creciente en el uso del metanol como combustible sintético en el sector naval, donde su menor toxicidad y facilidad de manejo lo posicionan como una alternativa más segura y económica en comparación con el amoníaco.

El e-metanol no solo ayuda a reducir las emisiones de SO_x, NO_x, partículas sólidas y CO₂, sino que también se perfila como un componente relevante en los esfuerzos globales por descarbonizar el transporte marítimo, responsable de aproximadamente el 2% de las emisiones globales de CO₂.¹³⁴

La Hidrovía Paraguay-Paraná, uno de los corredores fluviales más importantes de la región, representa un activo estratégico para el desarrollo económico regional y se encuentra en un proceso de transición hacia prácticas más sostenibles. Este corredor es fundamental para el transporte de bienes y productos agrícolas, y la incorporación de combustibles más limpios, como el e-metanol, podría transformar la sostenibilidad de la Hidrovía. Ante los esfuerzos de descarbonización, tanto Paraguay como otros países que comparten este sistema fluvial tienen una oportunidad significativa para impulsar la producción de hidrógeno verde y sus derivados, los cuales pueden ser empleados como combustibles más limpios para la flota que transita este corredor.

La sustitución del gas natural licuado (GNL) por combustibles limpios como el e-metanol no solo reduciría las emisiones contaminantes, sino que también podría resultar en menores costos operativos, beneficiando tanto al medio ambiente como a las economías de los países costeros. Dado que el transporte fluvial es aproximadamente 20 veces más barato que el terrestre, la transición hacia combustibles más limpios en la Hidrovía Paraguay-Paraná es tanto económicamente viable como ambientalmente favorable.¹³⁵

Los países de la región están avanzando en la coordinación de políticas y estrategias conjuntas para promover esta transición, lo cual podría acelerar la adopción de combustibles sostenibles y fortalecer el papel de la Hidrovía como un modelo de corredor fluvial descarbonizado en América Latina.¹³⁶

¹³⁴ ((OMI), s.f.)

¹³⁵ (Romero, 2020).

¹³⁶ La descarbonización de la Hidrovía Paraguay-Paraná requiere de una colaboración estrecha entre todos los países miembros de este corredor fluvial. Aunque Paraguay se encuentra en una posición favorable para impulsar proyectos de producción y abastecimiento de e-metanol, el éxito de la iniciativa depende de un plan conjunto y de la coordinación entre las naciones participantes. Paraguay, junto con los otros países miembros, podría desempeñar un papel de liderazgo en la promoción de combustibles sostenibles y en el desarrollo de un marco común para transformar la Hidrovía en un modelo de transporte fluvial limpio y eficiente.

Producción en Paraguay

E-metanol



E-metanol
 CH_3OH

SITUACIÓN:

Proximidad a industrias claves en Brasil

Pertenencia a la Hidrovía

Producción actual contaminante

Disponibilidad de energía hidroeléctrica

OPORTUNIDAD:

Potencial suministro a una demanda creciente

Potencial para impulsar la descarbonización del transporte marítimo mediante e-metanol

Potencial de descarbonización de la industria

Ventaja competitiva para producir e-metanol a menor precio ininterrumpidamente

Ilustración 45 - Oportunidad de Paraguay en la producción de e-metanol¹³⁷

La producción de e-metanol en Paraguay tiene el potencial de posicionar al país como un centro de abastecimiento sostenible en la Hidrovía Paraguay-Paraná, contribuyendo directamente a la descarbonización de este corredor fluvial. Al ofrecer e-metanol como combustible en puntos de recarga a lo largo de la Hidrovía, Paraguay podría atraer a embarcaciones de países vecinos que actualmente solo cruzan el territorio paraguayo sin detenerse. En su esfuerzo por reducir las emisiones de sus flotas, estas embarcaciones encontrarían en el e-metanol una alternativa sostenible y eficiente para sus necesidades de reabastecimiento¹³⁸, lo cual incentivaría que los buques que transitan por la Hidrovía elijan repostar en Paraguay en lugar de hacerlo en sus propios puertos.

Este modelo de suministro, que funciona como una exportación indirecta mediante el “bunkering” de combustible sostenible, permite a Paraguay capturar la demanda regional de combustibles descarbonizados sin necesidad de transportar el e-metanol fuera del país. A efectos de consumo, esto equivaldría a una exportación, ya que los buques extranjeros abastecen sus necesidades energéticas en territorio paraguayo, aportando ingresos al país y consolidando su papel como proveedor de combustibles verdes en la región. Así, Paraguay se beneficiaría de su acceso estratégico a la Hidrovía Paraguay-Paraná, al tiempo que contribuye a los objetivos de descarbonización del transporte fluvial en América Latina, transformando el corredor en un modelo de sostenibilidad y eficiencia.

¹³⁷ Análisis propio.

¹³⁸ La necesidad de descarbonizar el transporte fluvial responde tanto a compromisos corporativos en criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) como a obligaciones internacionales en mercados regulados de carbono. Además, el Reglamento de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM) de la Unión Europea y la creciente implementación de obligaciones de reducción de emisiones en varios mercados fortalecen la demanda de soluciones sostenibles. Estos factores impulsan a las empresas privadas a buscar combustibles bajos en carbono, como el e-metanol, para cumplir con sus objetivos de sostenibilidad y reducir su huella de carbono.

Además, el desarrollo del e-metanol en Paraguay permite aprovechar el hidrógeno verde y el CO₂ capturado para producir un combustible sostenible que, en el corto plazo, está enfocado principalmente en el abastecimiento directo para el transporte fluvial en la Hidrovía Paraguay-Paraná. Si bien el e-metanol también tiene el potencial de ser utilizado como portador de hidrógeno en múltiples industrias y podría exportarse en el mediano y largo plazo, actualmente las limitaciones de transporte en la Hidrovía dificultan su exportación hacia mercados internacionales. Por ello, la prioridad actual se centra en la producción y consumo local de e-metanol, facilitando la descarbonización de las embarcaciones que transitan por Paraguay y optimizando el uso de la infraestructura fluvial existente.

En un futuro, con inversiones en infraestructura para mejorar el calado de la Hidrovía y adaptar los puertos a las necesidades logísticas de transporte de e-metanol, este compuesto podría consolidarse como una opción viable para la exportación y el almacenamiento de hidrógeno en forma líquida. Esto permitiría a Paraguay ampliar su papel como proveedor de combustibles sostenibles en la región, maximizando el valor añadido del hidrógeno verde producido localmente. Sin embargo, en el contexto actual, el enfoque inmediato permanece en la producción y consumo in situ, fortaleciendo la sostenibilidad del transporte fluvial y apoyando la transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente en la región.

- **Identificación de proyectos clave:**

Paraguay puede obtener beneficios directos de la producción de metanol renovable, aprovechando su ubicación estratégica dentro de la Hidrovía para impulsar la descarbonización del transporte fluvial. Esto le permitiría posicionarse como pionero en la adopción de soluciones de transporte marítimo renovable, promoviendo un modelo más sostenible en la región.

La producción de metanol renovable puede facilitar un tránsito sostenible por la Hidrovía, generando a su vez nuevas oportunidades comerciales con países del Mercosur.

El establecimiento de estaciones de producción y abastecimiento de e-metanol en puntos estratégicos de la Hidrovía Paraguay-Paraná representa una solución innovadora para descarbonizar el transporte fluvial.

Especificación proyectos clave

Producción de e-metanol



Ilustración 46 - Características de los proyectos clave para la producción de e-metanol¹³⁹

Estas instalaciones permitirían convertir hidrógeno verde en e-metanol directamente en el punto de recarga, facilitando el reabastecimiento inmediato de combustible sostenible para las embarcaciones fluviales. Esta iniciativa posiciona a Paraguay como un referente en el uso de combustibles renovables en la Hidrovía, impulsando la transición hacia un sistema de transporte fluvial más limpio y eficiente, al tiempo que fomenta el desarrollo de infraestructura verde y crea empleos en sectores tecnológicos y energéticos.

Una planta de 100 MW ofrece una oportunidad estratégica para asegurar la inversión y demostrar el potencial de la tecnología renovable, combinando eficiencia operativa y competitividad en la producción de hidrógeno gracias a su ubicación y acceso a las rutas de transporte de la Hidrovía.

Para la planta de 100 MW de metanol renovable, Ciudad del Este y el área industrial de Asunción resultan óptimas debido a su proximidad a fuentes de CO_2 capturado de industrias como

¹³⁹ Análisis propio.

cementeras y siderúrgicas, además de contar con producción de hidrógeno verde. Esta combinación permite un aprovechamiento eficiente del CO₂ en la síntesis de e-metanol, reduciendo emisiones y facilitando la logística del proyecto. A diferencia de estas ubicaciones, otras posibles zonas como Yacyretá, aunque aptas para la producción de hidrógeno, no cuentan con un acceso inmediato a CO₂ industrial en las cantidades necesarias, lo cual limita su viabilidad para este tipo de proyecto integrado.

Además, la proximidad a la Hidrovía Paraguay-Paraná ofrece una ventaja clave, ya que permite que el e-metanol producido se utilice directamente a lo largo de la Hidrovía para abastecer embarcaciones fluviales, apoyando así la descarbonización del transporte y promoviendo una alternativa limpia para el comercio regional sin necesidad de transportarlo fuera del país. Las ubicaciones para la producción y abastecimiento de e-metanol en Paraguay se benefician de la infraestructura logística actual, con un acceso directo a la Hidrovía Paraguay-Paraná, lo que facilita el suministro directo de este combustible sostenible para embarcaciones en tránsito. Esta proximidad a la Hidrovía minimiza la necesidad de transporte adicional, permitiendo que el e-metanol se consuma en el propio corredor fluvial, impulsando así la descarbonización y eficiencia del transporte fluvial en la región.

Las ubicaciones estratégicas para el abastecimiento de e-metanol a lo largo de la Hidrovía Paraguay-Paraná ofrecen una ventaja clave para desarrollar clústeres industriales vinculados a combustibles sostenibles, atrayendo inversiones en tecnología verde para el transporte fluvial. La sinergia entre estos proyectos fomentaría una cadena de valor basada en la producción de hidrógeno y su conversión en e-metanol para su consumo directo en la Hidrovía, contribuyendo a la descarbonización del corredor logístico fluvial.

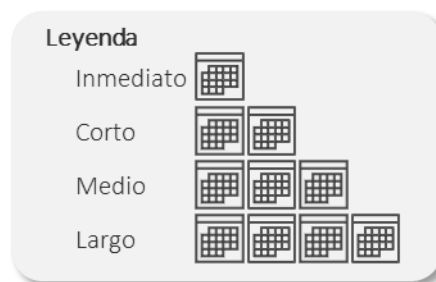
Con acceso a recursos hídricos, energía renovable y conexiones con centros industriales, Paraguay se encuentra en una posición óptima para crear un ecosistema de transporte fluvial sostenible, impulsando la eficiencia logística y promoviendo el crecimiento de industrias más limpias en el país.



7. ANEXOS

Anexo I: Resumen de las medidas de la Estrategia

Con el objeto de ofrecer una visión esquematizada de las medidas mencionadas a lo largo del Capítulo 4, y presentarlas con un orden de prelación dentro de un horizonte temporal, a continuación se presenta un resumen de dichas medidas junto al plazo (de acuerdo a la leyenda presentada a continuación) estimado para su desarrollo¹⁴⁰.



PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO COMO ACTIVIDAD INDUSTRIAL		
LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Integración de la producción de hidrógeno verde en el tejido industrial nacional	Medida 1: Actualizar el Clasificador de Actividades Económicas del Paraguay (CNAEP) para definir y clasificar la producción de hidrógeno verde como una actividad industrial.	
	Medida 2: Evaluar la implementación de un mecanismo de excepcionalidad transitorio en el régimen de incentivos fiscales para proyectos piloto de hidrógeno verde específicos.	
Estrategia de selección y priorización de iniciativas de producción de hidrógeno verde para garantizar un crecimiento ordenado	Medida 3: Establecer un marco de requisitos de documentación y garantías ajustado a la capacidad de producción de los proyectos de hidrógeno verde.	
	Medida 4: Implementar un mecanismo integral de evaluación multidimensional para priorizar estratégicamente proyectos de hidrógeno verde que maximicen los beneficios para Paraguay.	
GENERACIÓN RENOVABLE Y ACCESO A LA RED ELÉCTRICA		

¹⁴⁰ El plazo inmediato corresponde hasta finales del 2025, el corto hasta 2026, el medio plazo hasta 2030, y el largo plazo más allá de 2030.

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Maximización del potencial de las energías renovables en la producción de hidrógeno verde	Medida 5: Definir y establecer un marco que garantice una integración eficiente de la hidroeléctrica en proyectos de hidrógeno verde sin comprometer el abastecimiento energético.	
	Medida 6: Desarrollar un plan energético nacional integral que coordine el desarrollo de las energías renovables, la producción de hidrógeno verde y la optimización de la red eléctrica de Paraguay.	

GENERACIÓN RENOVABLE Y ACCESO A LA RED ELÉCTRICA

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Planificación del acceso y conexión a la red eléctrica de las plantas de producción de hidrógeno verde	Medida 7: Marco normativo asociado con los derechos de acceso y conexión a la red eléctrica nacional, garantizando un equilibrio entre la demanda eléctrica y la capacidad contratada para proyectos de hidrógeno verde, garantizando que la documentación, garantías y tasas de conexión sean proporcionales a la potencia requerida.	
	Medida 8: Desarrollar un marco normativo que regule los derechos de acceso y conexión a la red eléctrica nacional para proyectos de generación renovable adicional, garantizando que la documentación, garantías y tasas de conexión sean proporcionales a la capacidad de generación proyectada.	
	Medida 9: Desarrollar una regulación que promueva la adicionalidad eléctrica para proyectos de hidrógeno verde conectados a la red.	
Fomento de una red eléctrica adaptativa para el apoyo a la industria del hidrógeno verde	Medida 10: Evaluar el diseño de un esquema de tarifas eléctricas industriales diferenciadas que optimice los costos eléctricos para la producción de hidrógeno verde, basado en la localización y la infraestructura de red disponible.	
	Medida 11: Analizar la viabilidad de tasas específicas para el consumo eléctrico en la producción de hidrógeno verde con objeto de garantizar su aportación al régimen retributivo como actividad industrial.	

	Medida 12: Evaluar la implementación de un marco regulatorio de correlación temporal obligatoria entre la generación de energía renovable y el consumo de plantas de hidrógeno verde para optimizar la eficiencia del sistema energético.	
	Medida 13: Evaluar la implementación de un marco regulatorio para integrar progresivamente sistemas de almacenamiento de hidrógeno.	

USO DE AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Reforma y alineación de las normativas existentes para una gestión sostenible del agua utilizada en la producción de hidrógeno verde	Medida 14: Evaluar una posible adaptación de la Política Nacional de Recursos Hídricos para integrar criterios específicos para la producción de hidrógeno verde.	
	Medida 15: Evaluar el diseño de un sistema tarifario progresivo que fomente la eficiencia hídrica en la producción industrial de hidrógeno verde.	
	Medida 16: Analizar la idoneidad en la implementación de una tasa asociada al consumo de agua en proyectos de hidrógeno verde para financiar un fondo destinado a la sostenibilidad hídrica (Fondo del Agua).	

USO DE AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Impulso a la innovación tecnológica y configuración de normativas específicas para el almacenamiento eficiente de hidrógeno, maximizando su valor energético	Medida 17: Analizar la necesidad de robustecer la normativa actual con objeto de garantizar la sostenibilidad y preservación de los recursos hídricos en la producción de hidrógeno verde..	
	Medida 18: Establecer mecanismos de restricción en el uso del agua para la producción de hidrógeno en situaciones de escasez hídrica.	

Medida 19: Fortalecer los protocolos para la gestión del recurso hídrico empleado para la producción de hidrógeno, garantizando un uso sostenible, equitativo y responsable de estos a nivel nacional y en consonancia con los acuerdos internacionales.



INFRAESTRUCTURA, LOGÍSTICA Y SEGURIDAD

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Planificación y desarrollo integral del transporte de hidrógeno, sus derivados y otros productos verdes	Medida 20: Desarrollar e implementar un plan estratégico de infraestructura logística dedicado al transporte y almacenamiento de hidrógeno, contemplando tanto redes nacionales como la exportación internacional.	
	Medida 21: Promover un plan multilateral para optimizar la Hidrovía Paraguay-Paraná que garantice su capacidad logística ante el crecimiento esperado del tráfico de productos verdes.	
	Medida 22: Evaluar el diseño de un plan de incentivos orientados a modernizar las infraestructuras logísticas y facilitar el transporte de productos verdes en la Hidrovía Paraguay-Paraná.	
Impulso a la innovación tecnológica y configuración de normativas específicas para el almacenamiento eficiente de hidrógeno, maximizando su valor energético	Medida 23: Desarrollar un análisis integral de las posibles tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, como la utilización de cavernas geológicas.	

USOS FINALES Y APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Fomento de políticas de estímulo económico y apoyo financiero para integrar el hidrógeno en la infraestructura nacional	Medida 24: Promover la adopción de políticas que fomenten el uso de hidrógeno en determinadas actividades clave de la economía paraguaya, tales como la industria de fertilizantes o el transporte fluvial.	
	Medida 25: Definir un plan estratégico de hubs de hidrógeno para impulsar la industria de fertilizantes y productos verdes en Paraguay.	

Medida 26: Evaluar el establecimiento de un plan transitorio para la descarbonización de la industria paraguaya que combine incentivos y obligaciones financiado por el Fondo de Sostenibilidad.



USOS FINALES Y APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Implementación de mecanismos para la transición del transporte hacia una economía baja en carbono	Medida 27: Evaluar las necesidades asociadas para el desarrollo de un plan estratégico que planifique la expansión de una red nacional de hidrogeneras apoyada por un marco normativo que regule su construcción, operación y mantenimiento.	
	Medida 28: Evaluar la idoneidad de establecer un marco de incentivos fiscales y financiamiento para impulsar el uso del hidrógeno verde en el transporte pesado de mercancías y en las flotas de transporte público de las ciudades o zonas de alta demanda.	
	Medida 29: Definir un plan de transición energética para la descarbonización del transporte fluvial en la Hidrovía Paraguay-Paraná.	

ELEMENTOS TRANSVERSALES

A. DISEÑO REGULATORIO INCENTIVADOR, ESTANDARIZACIÓN Y ARMONIZACIÓN

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Diseño regulatorio incentivador	Medida 30: Evaluar un desarrollo legislativo integral que promueva proyectos de hidrógeno verde con incentivos fiscales estratégicos.	
	Medida 31: Evaluar la implementación de mecanismos de regulación flexible, como Sandbox Regulatorios para el hidrógeno verde.	
	Medida 32: Diseñar e implementar un Fondo de Sostenibilidad para impulsar proyectos estratégicos de hidrógeno verde en Paraguay.	
	Medida 33: Diseñar e implementar un Fondo del Agua para financiar proyectos de conservación, infraestructura y uso eficiente del recurso hídrico.	

ELEMENTOS TRANSVERSALES

A. DISEÑO REGULATORIO INCENTIVADOR, ESTANDARIZACIÓN Y ARMONIZACIÓN

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Establecimiento de sistemas de garantías de origen (GdO) y esquemas de certificación del hidrógeno y sus derivados, para garantizar su reconocimiento a nivel global	Medida 34: Desarrollar e implementar un sistema estructurado de certificación que categorice el hidrógeno, sus derivados y otros productos según su origen y sostenibilidad.	
	Medida 35: Diseñar un sistema de garantías de origen (GdO) para verificar la trazabilidad de la electricidad renovable empleada en la producción de hidrógeno verde, derivados y otros productos.	
	Medida 36: Designar un ente regulador encargado de la supervisión del sistema de certificación y de garantías de origen (GdO).	
Normas de seguridad y otros estándares asociados con la producción, almacenamiento, transporte y usos finales del hidrógeno en Paraguay	Medida 37: Implementar un sistema de normalización técnica alineado con estándares internacionales para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde y derivados.	
	Medida 38: Desarrollar un marco normativo que garantice la seguridad en todas las fases de la cadena de valor del hidrógeno y sus derivados.	
	Medida 39: Desarrollar un sistema de certificación que garantice la capacitación de operarios en la manipulación segura del hidrógeno o derivados.	
	Medida 40: Implementar un esquema de certificación que clasifique la calidad del hidrógeno en función de su pureza y adecuación a diferentes usos.	

ELEMENTOS TRANSVERSALES

B. DESARROLLO DE CAPACIDADES E INNOVACIÓN

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Iniciativas de formación y políticas de empleo dirigidas a impulsar el	Medida 41: Establecer un plan educativo integral que incluya el hidrógeno desde la enseñanza escolar hasta la creación de carreras técnicas y profesionales.	

desarrollo de nuevas capacidades y una fuerza laboral cualificada en la industria emergente del hidrógeno verde Refuerzo del compromiso con la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) para avanzar en las tecnologías del hidrógeno verde	Medida 42: Diseñar un sistema integral de formación técnica y reconversión para integrar a trabajadores de otras industrias en el sector del hidrógeno y energías renovables, alineado con las demandas del sector.	
	Medida 43: Fomentar la integración de mano de obra y empresas nacionales en la cadena de valor del hidrógeno verde, fomentando el uso de recursos locales para el crecimiento económico.	
	Medida 44: Fomentar el desarrollo de un Centro Tecnológico de Hidrógeno en Paraguay para coordinar la investigación, desarrollo y observación de tendencias globales, impulsando la innovación y la colaboración internacional.	
	Medida 45: Fortalecer la inserción de Paraguay en la comunidad global del hidrógeno, promoviendo alianzas estratégicas y el desarrollo de capacidades nacionales en el ámbito del hidrógeno verde.	
	Medida 46: Promover alianzas estratégicas entre Gobierno, industria y academia para impulsar la innovación en la producción de hidrógeno verde y derivados.	
	Medida 47: Promover proyectos piloto para la producción de fertilizantes verdes y la descarbonización de flotas en la Hidrovía Paraguay-Paraná.	

ELEMENTOS TRANSVERSALES

C. FOMENTO DE ALIANZAS INTERNACIONALES

LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Fomentar alianzas internacionales para fortalecer la cooperación, el comercio y la transferencia tecnológica en hidrógeno verde y productos derivados	Medida 48: Impulsar la validación de los certificados de hidrógeno verde y las garantías de origen renovables, para su aceptación en los mercados globales a través de colaboración internacional.	
	Medida 49: Promover tratados de cooperación internacional para la modernización de infraestructuras aduaneras y logísticas, facilitando el comercio seguro y eficiente de hidrógeno verde y derivados.	

	Medida 50: Fomentar la adopción de acuerdos estratégicos con mercados internacionales para favorecer la transferencia tecnológica, la financiación y el fortalecimiento de capacidades en la producción y comercialización de fertilizantes verdes.	
ELEMENTOS TRANSVERSALES		
D. DIFUSIÓN Y SENSIBILIZACIÓN		
LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Impulso de programas nacionales para la sensibilización y participación ciudadana en la transición hacia el hidrógeno verde	Medida 51: Impulsar la creación de un “Clúster del hidrógeno verde” como catalizador de innovación y cooperación, promoviendo la creación de asociaciones y el fortalecimiento de los actores nacionales.	
	Medida 52: Definir un plan de socialización de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.	
ELEMENTOS TRANSVERSALES		
E. GOBERNANZA		
LÍNEA DE ACCIÓN	MEDIDA	PLAZO
Consolidación de una estructura de gobernanza que integre el hidrógeno verde en las directrices políticas y económicas nacionales	Medida 53: Dotar al Viceministerio de Minas y Energía con las competencias y los recursos necesarios para coordinar e implementar la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.	
	Medida 54: Desarrollar un plan de gobernanza interinstitucional para la ejecución efectiva de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.	
	Medida 55: Implementar un sistema de monitoreo continuo y revisión periódica para el desarrollo de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay.	

Anexo II: Costos nivelados del hidrógeno (LCOH)

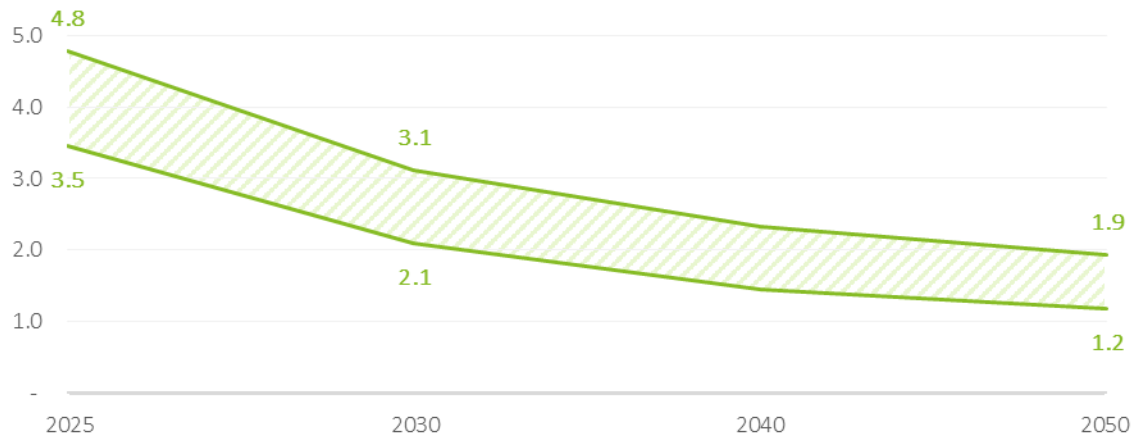
En el presente anexo se detallan de manera gráfica los escenarios proyectados del Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) en Paraguay, desglosando los costos asociados a la integración de diferentes fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, así como las tarifas de electricidad hidroeléctrica. Los gráficos ilustran cómo cada escenario impacta en la competitividad del hidrógeno verde a lo largo del tiempo, destacando los rangos de costos estimados para cada tecnología y las condiciones bajo las cuales se alcanzan los niveles más competitivos de LCOH.

Detalles del cálculo del LCOH

Renovable solar



LCOH estimado en Paraguay - solar
(USD/kg H₂)



Datos de cálculo		2025	2030	2050
CAPEX	USD/kW	750 - 840		
Ef. electrolizador	%	66 – 67 %		
Ef. equipos auxiliares	%	51.0 - 52.0 %		
OPEX	(% CAPEX anual)	1.5 %		
Costo electricidad	max	37	23	12
	min	26	17	10
Costo agua	(USD/kg H ₂)	0.015		
WACC	%	4.5 %		
Vida útil	año	15		
Seguro	(% CAPEX anual)	0.5 %		

Ilustración 47 - Detalle del cálculo del LCOH renovable solar¹⁴¹.

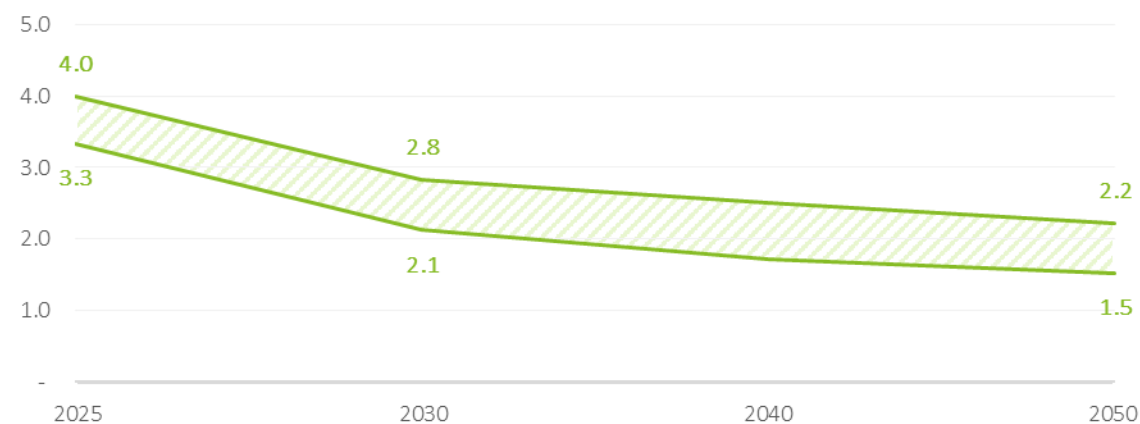
¹⁴¹ Análisis propio.

Detalles del cálculo del LCOH

Renovable eólico

LCOH estimado en Paraguay - eólico

(USD/kg H₂)



Datos de cálculo		2025	2030	2050
CAPEX (USD/kW)		750 - 840	540 - 680	405 - 595
Ef. electrolizador (%)		66 - 67 %	66 - 70 %	67 - 75 %
Ef. equipos auxiliares (%)		51.0 - 52.0 %	51.5 - 54.0 %	52.5 - 57.0 %
OPEX (% CAPEX anual)		1.5 %		
Costo electricidad (USD/MWh)	max	29	20	16
	min	25	17	14
Costo agua (USD/kg H ₂)		0.015		
WACC (%)		4.5 %		
Vida útil (año)		15		
Seguro (% CAPEX anual)		0.5 %		

Ilustración 48 - Detalle del cálculo del LCOH renovable eólico¹⁴².

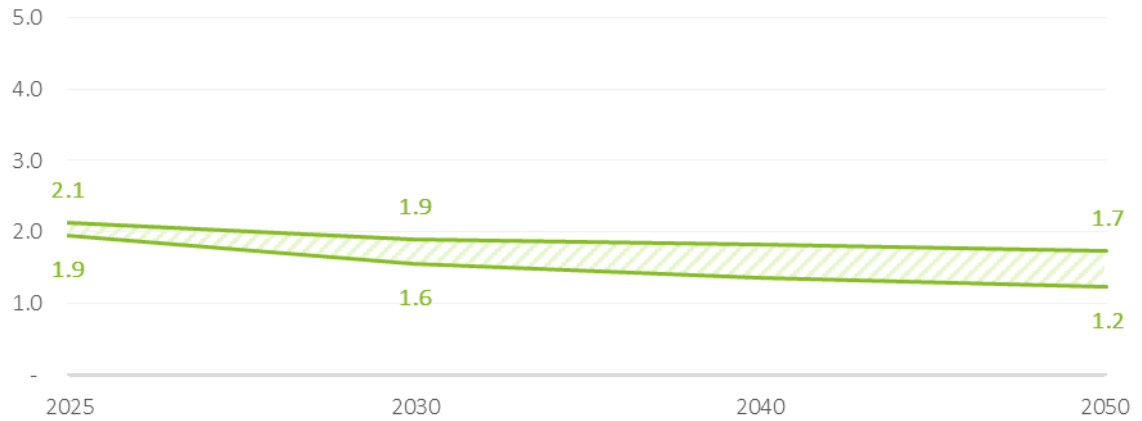
¹⁴² Análisis propio.

Detalles del cálculo del LCOH

Red eléctrica nacional



LCOH estimado en Paraguay - tarifas
(USD/kg H₂)



Datos de cálculo	2025	2030	2050
CAPEX USD/kW	750 - 840	540 - 680	405 - 595
Ef. electrolizador %	66 – 67 %	66 – 70 %	67 – 75 %
Ef. equipos auxiliares %	51.0 - 52.0 %	51.5 - 54.0 %	52.5 - 57.0 %
OPEX (% CAPEX anual)	1.5 %		
Costo electricidad (USD/MWh)	10	10	10
Costo agua (USD/kg H ₂)	0.015		
WACC %	4.5 %		
Vida útil año	15		
Seguro (% CAPEX anual)	0.5 %		

Ilustración 49 - Detalle del cálculo del LCOH de la red eléctrica¹⁴³.

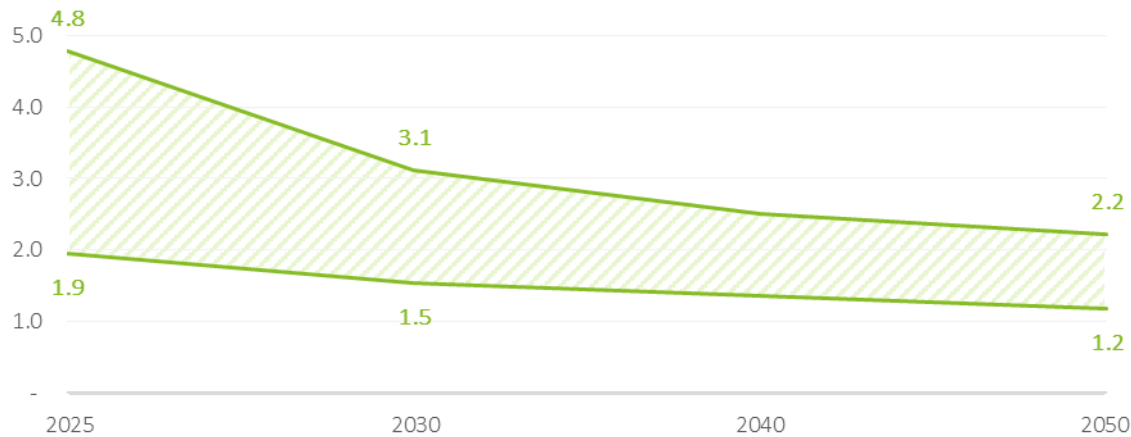
¹⁴³ En la representación de los escenarios tarifarios del LCOH únicamente se ha considerado la tarifa marginal, ya que se espera que, a partir de 2030, los costos de instalación de parques solares y eólicos adicionales sean significativamente inferiores a las tarifas industriales vigentes. Este enfoque busca reflejar un escenario competitivo de hidrógeno verde en Paraguay, alineado con las proyecciones de mercado y la tendencia hacia una mayor incorporación de energías renovables, excluyendo las tarifas industriales y las incrementales que, a largo plazo, no representan la opción más rentable para la producción de hidrógeno verde. Análisis propio.

Detalles del cálculo del LCOH



General

LCOH estimado en Paraguay - general
(USD/kg H₂)



Datos de cálculo		2025	2030	2050
CAPEX	USD/kW	750 - 840		
Ef. electrolizador	%	66 – 67 %		
Ef. equipos auxiliares	%	51.0 - 52.0 %		
OPEX	(% CAPEX anual)	1.5 %		
Costo electricidad	max	37	23	16
	min	10	10	10
Costo agua	(USD/kg H ₂)	0.015		
WACC	%	4.5 %		
Vida útil	año	15		
Seguro	(% CAPEX anual)	0.5 %		

Ilustración 50 - Detalle del cálculo del LCOH general¹⁴⁴.

¹⁴⁴ Análisis propio.

Índice de ilustraciones

Ilustración I- Principales fortalezas y desafíos de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay	8
Ilustración II- Mapa ilustrativo de ubicaciones óptimas para hubs o corredores de hidrógeno verde	9
Ilustración III - Oportunidades de uso del hidrógeno verde en Paraguay identificadas en la Estrategia.	10
Ilustración IV - Esquema ilustrativo de los objetivos de la Estrategia.	10
Ilustración V - Agrupación de medidas y líneas de acción en los pilares de la Estrategia.....	11
Ilustración VI - Metas de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2030.....	12
Ilustración 1 - Principales recursos eléctricos renovables en Paraguay	17
Ilustración 2 – Cadena de valor ilustrativa del hidrógeno verde.....	22
Ilustración 3 – Estimación de los costos de capital (CAPEX) para varios tipos de electrolizadores..	24
Ilustración 4 - Estimación de las eficiencias para varios tipos de electrolizadores ²⁵	24
Ilustración 5 – Principales alternativas para el transporte de hidrógeno.....	26
Ilustración 6 – Impacto de la distancia para el transporte directo de hidrógeno gaseoso en 2030 y 2050	27
Ilustración 7 - Impacto de la distancia para el transporte de portadores de hidrógeno en 2030 y 2050 Paraguay, como país mediterráneo sin salida al mar de forma directa, enfrenta importantes retos logísticos frente a la alternativa de un posible transporte marítimo.....	29
Ilustración 8 – Impacto de la distancia para el transporte de derivados de hidrógeno en 2030 y 2050	31
Ilustración 9 - Importaciones de hidrógeno en Paraguay en la última década y su costo nivelado	34
Ilustración 10 - Contribución al PIB de la industria química y de la industria metalúrgica.....	35
Ilustración 11- Importaciones de amoniaco en Paraguay en la última década y su costo nivelado	37
Ilustración 12 – Energía consumida por combustible en el sector transporte carretera, fluvial y aéreo	38
Ilustración 13 - Balance energético nacional del sector transporte carretera para el año 2022	40
Ilustración 14 - Balance energético nacional del sector transporte fluvial para el año 2022	41
Ilustración 15 – Balance energético nacional del sector transporte aéreo para el año 2022.....	42
Ilustración 16 – Potencial reducción de emisiones GEI del sector transporte	43
Ilustración 17 - Distribución de los derivados del petróleo por sectores en Paraguay	45
Ilustración 18 - Vehículos del parque automovilístico en Paraguay por tipología.....	46
Ilustración 19 – Cantidad de fertilizantes importados en Paraguay históricos y proyección a 2025	48
Ilustración 20 – Balance de fertilizantes importados en Paraguay en 2023.....	49
Ilustración 21 – Balance comercial de cultivos en Paraguay	50
Ilustración 22 – Demanda de fertilizantes global, histórica y proyectada a 2050 y sus precios históricos.....	51
Ilustración 23 - Mapa ilustrativo del potencial del recurso hídrico en Paraguay.....	56
Ilustración 24 - Principales recursos eléctricos en Paraguay ⁷⁴	57
Ilustración 25 – Mapa ilustrativo del potencial del recurso eléctrico renovable de Paraguay.....	58
Ilustración 26 - Principales infraestructuras de transporte de hidrógeno en Paraguay ^{80 81 82 83}	60
Ilustración 27 - Mapa ilustrativo de ubicaciones óptimas para hubs o corredores de hidrógeno verde	62
Ilustración 28 – Potencial producción de fertilizantes verdes y demanda de hidrogeno asociada .	65
Ilustración 29 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para la industria química	66

Ilustración 30 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para transporte carretera.....	68
Ilustración 31 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para el transporte fluvial.....	69
Ilustración 32 - Potencial demanda de hidrógeno verde y energía eléctrica asociada para transporte aéreo ⁹⁰	70
Ilustración 33- Costos nivelados del hidrógeno verde estimados para Paraguay.....	75
Ilustración 34 - Esquema ilustrativo de la oportunidad de Paraguay en el diseño de la Estrategia	77
Ilustración 35 - Esquema ilustrativo de los objetivos de la Estrategia.....	81
Ilustración 36 - Demanda de potencia (MW) histórica y proyectada de Paraguay.	88
Ilustración 37 - Esquema ilustrativo del desarrollo del plan estratégico de infraestructura logística.....	98
Ilustración 38 - Balance energético total de Paraguay.	101
Ilustración 39 - Oportunidades de uso del hidrógeno verde en Paraguay.....	118
Ilustración 40 - Metas de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2030.	120
Ilustración 41 - Objetivos de la Estrategia de Hidrógeno Verde en Paraguay para 2050	123
Ilustración 42 - Ventajas y desventajas del hidrógeno, amoníaco y e-metanol	127
Ilustración 43 - Oportunidad de Paraguay en la producción de amoníaco verde.....	128
Ilustración 44 - Características de los proyectos clave para la producción de fertilizantes verdes	130
Ilustración 45 - Oportunidad de Paraguay en la producción de e-metanol	133
Ilustración 46 - Características de los proyectos clave para la producción de e-metanol	135
Ilustración 47 - Detalle del cálculo del LCOH renovable solar.....	146
Ilustración 48 - Detalle del cálculo del LCOH renovable eólico.	147
Ilustración 49 - Detalle del cálculo del LCOH de la red eléctrica.....	148
Ilustración 50 - Detalle del cálculo del LCOH general.....	149

Acrónimos

AEL	Electrolizador Alcalino (en inglés, Alkaline Electrolyzer)
AEM	Electrolizador de Membrana de Intercambio Aniónico (en inglés, Anion Exchange Membrane Electrolyzer)
ALC	América Latina y el Caribe
ANDE	Administración Nacional de Electricidad
BAU	Business As Usual
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAPEX	Gastos de capital (en inglés, Capital Expenditures)
CCUS	Captura, uso y almacenamiento de carbono (en inglés, Carbon Capture, Utilization, and Storage)
CNAEP	Clasificador Nacional de Actividades Económicas del Paraguay
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CTN	Comité Técnico de Normalización
DAP	Fosfato diamónico
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
ERSSAN	Ente Regulador de Servicios Sanitarios
FC	Pilas de combustible de hidrógeno (en inglés, Hydrogen Fuel Cells)
FCEV	Vehículos eléctricos de pila de combustible (en inglés, Fuel Cell Electric Vehicles)
GdO	Garantías de Origen
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GNL	Gas Natural Licuado
GW	Giga Watios
GWh	Giga Watio hora
IEA	Agencia Internacional de la Energía (en inglés, International Energy Agency)
INTN	Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables (en inglés, International Renewable Energy Agency)
ISO	Organización Internacional de Normalización (en inglés, International Organization for Standardization)
KCl	Cloruro de Potasio
KOH	Hidróxido de potasio
LCOH	Costo nivelado del hidrógeno (en inglés, Levelized Cost of Hydrogen)
LOHC	Portadores de hidrógeno líquidos orgánicos (en inglés, Liquid Organic Hydrogen Carriers)
MADES	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MCH	Metilciclohexano (en inglés, Methylcyclohexane)
MERCOSUR	Mercado Común del Sur
MOPC	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
MW	Mega Watios
NaOH	Hidróxido de sodio
NDC	Contribuciones Nacionalmente Determinadas (en inglés, Nationally Determined Contributions)
NEC	12-H N-etilcarbazol (en inglés, 12-H N-ethylcarbazole)
NPK	Nitrógeno, fósforo y potasio

OPEX	Costos operativos (en inglés, Operational Expenditures)
PEM	Electrolizador de Membrana de Intercambio de Protones (en inglés, Proton Exchange Membrane Electrolyzer)
PIB	Producto Interior Bruto
PTI	Parque Tecnológico Itaipú Paraguay
ReLAC	Renovables en Latinoamérica y El Caribe
SAF	Combustibles sostenibles para la aviación (en inglés, Sustainable Aviation Fuels)
SMR	Reformado de Vapor (en inglés, Steam Methane Reforming)
SOEC	Electrolizador de Óxido Sólido (en inglés, Solid Oxide Electrolyzer)
TCP	Programa de Colaboración Tecnológica (en inglés, Technology Collaboration Programme)
USD	Dólares estadounidenses (en inglés, United States Dollars)
VMME	Viceministerio de Minas y Energía

Referencias

- (CADAM), C. d. (2023). Obtenido de SECTOR AUTOMOTOR PARAGUAYO Particularidades y Desafíos. 2023: <https://www.movilidadelectrica.org.py/taller/cadam.pdf>
- (OMI), O. m. (s.f.). Organización marítima internacional (OMI). Obtenido de Gases de efecto invernadero: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/GHG-Emissions.aspx>
- Analytic, I. (2024). Global Geen Fertilizer Market Research Report.
- ANDE. (2009). Memoria y balance 2009, producción. Obtenido de https://www.ande.gov.py/documentos_contables/163/memoria_y_balance_2009_3.pdf
- ANDE. (2011). Compilación Estadística 1990-2010. Asunción: ANDE.
- ANDE. (2021). Plan Maestro de Generación 2021-2040.
- ANDE. (2021). Plan Maestro de Transmisión 2021-2030.
- ANDE. (2022). Tasas de conexión. Manual de cálculo. Asunción.
- ANDE. (2023). Compilación Estadística 2002-2022. Asunción: ANDE.
- ASAMAR. (s.f.). Obtenido de <http://www.asamar.org.py/es/en-la-hidrovia-operan-3-445-embarcaciones-de-bandera-paraguaya-la-mayor-flota-fluvial-de-sudamerica-n421>
- CertifHy. (2021). What is CertifHy? Obtenido de CertifHy: https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2021/10/CertifHy_folder__leaflets.pdf
- Christiaan Gischler - Eric Daza. (2023). CertHiLAC: Sistema de certificación de hidrógeno limpio para América Latina y el Caribe. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://blogs.iadb.org/energia/es/certhilac-sistema-de-certificacion-de-hidrogeno-limpio-para-america-latina-y-el-caribe/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (Junio de 2014). La Inversión Extranjera Directa en América Latina, 2013. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/803aeed0-12ff-4606-91a2-32aca77ebd9f/content>
- Comisión Europea. (2016). Principio de Precaución. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:I32042>
- Comisión Europea. (2023). Reglamento Delegado (UE) 2023/1184. Bruselas: Diario Oficial de la Unión Europea.
- Comisión Europea. (2023). Reglamento Delegado (UE) 2023/1185. Bruselas: Diario Oficial de la Unión Europea.
- Consejo de la Unión Europea. (30 de Marzo de 2023). Council and Parliament reach provisional deal on renewable energy directive. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/30/council-and-parliament-reach-provisional-deal-on-renewable-energy-directive/>
- Crespo, A. (2000). Informe Nacional sobre la gestión del agua en Paraguay.
- Deloitte. (2021). Creating a viable hydrogen economy. A Future of Energy point of view.
- Deloitte. (2023). Green Hydrogen: Energizing the path to net zero.
- Dende. (2022). Obtenido de <https://dende.org.py/transporte-fluvial-y-logistica/>
- Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos (DGEEC). (2009). Clasificación Nacional de Actividades Económicas del Paraguay (CNAEP). Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos (DGEEC).

- Dirección Nacional de Aeronáutica Civil. (2019). Anuario Climatológico. Obtenido de <https://www.meteorologia.gov.py/wp-content/uploads/2021/05/Anuario-2019.pdf>
- Energía, B. D. (Abril 2022). Breve reseña del sector de energía en Paraguay. Lucatonio, Fabio; José; G Aiello Roberto.
- Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ERSSAN). (s.f.). Portada. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://erssan.gov.py/index.php/noticias-1>
- et, M. C. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. Chem Soc Rec, 51, 4583-4762.
- Europea, C. (2023). Web oficial de la Unión Europea. Obtenido de Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono.
- European Commission. (2021). EU Green Deal (carbon border adjustment mechanism). Obtenido de https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12228-EU-Green-Deal-carbon-border-adjustment-mechanism_en
- Expansión. (2022). Paraguay - Generación de electricidad. Recuperado el 27 de Febrero de 2024, de <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-generacion/paraguay>
- FCAS - AECID. (2021). El fondo del agua en Paraguay. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://memoriafcas2021.aecid.es/paraguay-ampliado/>
- FCAS - AECID. (2024). ¿Qué es el Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento? Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.aecid.es/fr/web/aecid-fcas/que-es-el-fondo%20%20>
- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020). The National Hydrogen Strategy. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.
- Fernando Larroza, S. F. (2005). CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA DEL SISTEMA ACUÍFERO YRENDA (SAY) EN PARAGUAY: RECURSO COMPARTIDO CON ARGENTINA Y BOLIVIA.
- France Hydrogène. (2021). A road-map for an ambitious Hydrogen strategy.
- France Hydrogène. (2022). A road-map for an ambitious hydrogen strategy by 2030. Part 2.
- Gobierno de Chile. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Chile.
- Gobierno de la República Oriental del Uruguay. (2022). Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/noticias/comunicado%20Acu%C3%ADfero%20Guaran%C3%AD.pdf>
- Gobierno Nacional de Paraguay. (2014). Ley N° 3239 / DE LOS RECURSOS HIDRICOS DEL PARAGUAY. Obtenido de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2724/de-los-recursos-hidricos-del-paraguay>
- Gobierno Nacional del Paraguay. (2013). Ley N° 1614 / General del marco regulatorio y tarifario del servicio público de provisión de agua potable y alcantarillado sanitario para la republica del Paraguay. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/1694/ley-n-1614-general-del-marco-regulatorio-y-tarifario-del-servicio-publico-de-provision-de-agua-potable-y-alcantarillado-sanitario-para-la-republica-del-paraguay>
- Gobierno Nacional del Paraguay. (2019). Ley N° 6438 / Aprueba el acuerdo de transporte fluvial por la Hidrovía Paraguay - Paraná. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/9224/ley-n-6438-aprueba-el-acuerdo-de-transporte-fluvial-por-la-hidrovia-paraguay-parana-puerto-de-caceres-puerto-de-nueva-palmira-octavo-protocolo-adicional#:~:text=Ley%20N%C2%BA%206438%20%2F%20APRUEBA%20EL,NUEVA%20>

- Gobierno Nacional del Paraguay. (2021). Ley N° 6037 / Aprueba el acuerdo sobre el acuífero Guaraní. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/9691/ley-n-6037-aprueba-el-acuerdo-sobre-el-acuifero-guarani>
- H2 Perú. (2021). Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú. Impulsando la transición energética del Perú. Perú.
- HUB de Energía. (s.f.). Renovables en Latinoamérica y el Caribe (RELAC). Recuperado el Febrero de 2024, de <https://hubenergia.org/es/relac>
- Hydrogen Technology Collaboration Programme (Hydrogen TCP). (2020). About the Hydrogen TCP. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.ieahydrogen.org/history-of-the-tcp/>
- Hydrogen, I. C. (2023). Collaborative Framework on Green Hydrogen (CFGH). Obtenido de <https://www.irena.org/Events/2023/Apr/Collaborative-Framework-on-Green-Hydrogen-CFGH>
- IEA. (2019). The Future of Hydrogen.
- Instituto Nacional de Estadística. (2023). Paraguay. Proyecciones de población nacional, áreas urbana y rural, por sexo y edad.
- International Organization for Standardization (ISO). (s.f.). ISO/TC 197. Hydrogen technologies. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.iso.org/committee/54560.html>
- IRENA. (2022). GLOBAL HYDROGEN TRADE TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL. PART II TECHNOLOGY REVIEW OF HYDROGEN CARRIERS.
- Itaipú. (2023). Obtenido de <https://www.itaipu.gov.py/es>
- La Nación. (2022). Corredor Bioceánico es una vía segura para ingresar al Pacífico. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.lanacion.com.py/negocios/2022/08/15/corredor-bioceanico-es-una-via-segura-para-ingresar-al-pacifico/>
- MADES - DNCC. (2021). Actualización de la NDC de la República del Paraguay al 2030. Asunción: MADES - DNCC.
- MADES. (2020). Política Nacional de Recursos Hídricos del Paraguay. Asunción.
- MIEM. (2022). Hoja de Ruta del Hidrógeno verde en Uruguay. Uruguay: MIEM.
- MINAE. (2022). Estrategia Nacional H2 Verde. Costa Rica.
- Ministério de Minas e Energia. (2021). Programa Nacional do Hidrogênio.
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía, G. d. (2023). Hoja de ruta del hidrógeno verde en Ecuador. Ecuador.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Atlas de Cuencas Hidrográficas del Paraguay 2022. Obtenido de <https://www.mades.gov.py/atlas/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. Madrid.
- MOPC. (s.f.). Corredor Vial Bioceánico. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.mopc.gov.py/index.php/obras-emblematicas/corredor-vial-bioceanico>
- Paraguay, B. C. (2022). Banco Central del Paraguay. Obtenido de <https://www.bcp.gov.py/serie-historica-del-pib-base-2014-i643>
- Paraguay, B. C. (2024). Banco Central del Paraguay. Obtenido de <https://www.bcp.gov.py/serie-detallada-de-comercio-exterior-i381>
- Paraguay, G. d. (2021). Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. Asunción.

- Paraguay, G. d. (2024). Anteproyecto de Ley que implementa el régimen jurídico de la producción, uso, almacenamiento, comercialización, distribución, transporte y exportación de hidrógeno. Asunción.
- Paraguay, I. (2022). Instituto Nacional de Estadística Paraguay. Obtenido de https://www.ine.gov.py/assets/documento/60/2.5.1_CEA2022.xlsx
- PTI-PY / Itaipu. (2014). Atlas del potencial energético solar y eólico del Paraguay.
- República de Paraguay. (1973). Tratado de Itaipú. Asunción.
- Research and Markets. (2022). Brazil Fertilizer Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027). Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.researchandmarkets.com/reports/5318397/brazil-fertilizer-market-growth-trends-covid>
- Romero, A. (2020). La descarbonización en la Hidrovía un aporte significativo al cuidado del medio ambiente. Recuperado el Febrero de 2024, de <https://www.globalports.com.ar/la-descarbonizacion-en-la-hidrovía-un-aporte-significativo-al-cuidado-del-medio-ambiente/>
- Safety, I. A. (2009). International Association for Hydrogen Safety. Obtenido de International Association for Hydrogen Safety: <https://hysafe.info/>
- Secretaría de Asuntos Estratégicos. (2023). Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno (ENH). Argentina.
- Secretaría General de las Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París.
- VMME. (2019). Prospectiva de la demanda de potencia y energía eléctrica 2050. Asunción: VMME.
- VMME. (2021). Hacia la ruta del hidrógeno verde en Paraguay. Asunción.
- VMME. (2023). Balance Preliminar de Energía Eléctrica. Paraguay.
- WWF (World Wide Fun for Nature). (2023). COP28: Un momento crucial para la acción climática. Recuperado el Febrero de 2024, de https://www.wwf.panda.org/es/campanas_ambientales/cop_28/
- Yacyretá. (2023). Obtenido de <https://www.eby.gov.py/datos-tecnicos/#:~:text=Yacyreta%20es%20una%20presa%20multiprop%C3%B3sito,potencia%20instalada%20de%203200%20Mw.>