

Hidrógeno Verde en la Minería: Clave para la descarbonización del Perú y su potencial de transformación

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario en Economía, Regulación y Competencia en los Servicios Públicos
Universitat de Barcelona

Fecha:

06/09/2024

Autor del Trabajo:

Pamela Juana Escobedo Chuiso

Director del Trabajo:

Prof. Dr. Jordi Teixido



Resumen

Esta investigación compara las regulaciones de Chile y Perú en torno a la adopción del hidrógeno verde como alternativa energética, centrándose en su potencial para el sector minero. Identificamos una falla de mercado en forma de externalidad positiva de red, lo que justifica la intervención estatal. Proponemos un proyecto pionero para convertir camiones mineros de alto tonelaje en vehículos duales, utilizando 60% hidrógeno verde y 40% diésel. A través de un análisis costo-beneficio, demostramos que este proyecto no solo es económicamente viable, sino que también ofrece importantes beneficios sociales, como la reducción de emisiones de CO₂. Para acelerar la demanda de hidrógeno verde en minería, sugerimos implementar asociaciones público-privadas como mecanismo de financiamiento, impulsando así la transición hacia energías más limpias y sostenibles en la región. Esta propuesta no solo aborda desafíos energéticos, sino que también promueve una minería más responsable y alineada con las metas ambientales globales.

Palabras clave: Hidrógeno Verde; Regulación; Chile; Perú; Minería; Falla de Mercado; Análisis Costo – Beneficio; Energías Limpias.

Summary

This research compares the regulations of Chile and Peru, around the adoption of green hydrogen as an energy alternative, focusing on its potential for the mining sector. We identify a market failure in the form of positive network externality, which justifies state intervention. We propose a pioneering project to convert high-tonnage mining trucks into dual vehicles, using 60% green hydrogen and 40% diesel. Through a cost-benefit analysis, we show that this project is economically viable, also offers important social benefits, such as the reduction of CO₂ emissions. To accelerate the demand for green hydrogen in mining, we suggest implementing public-private partnerships as a financing mechanism, thus promoting the transition to cleaner and more sustainable energies in the region. This proposal not only addresses energy challenges, but also promotes mining that is more responsible and aligned with global environmental goal.

Keywords: Green Hydrogen; Regulation; Chile; Peru; Mining; Market Failure; Cost-Benefit Analysis; Clean Energy.

Agradecimientos

Extiendo en estas líneas mi agradecimiento, primordialmente, a mis padres, Roger y Teresa, por siempre apoyarme en todo momento, creer en mis sueños, mis metas y ser mi soporte, sin ellos no hubiera podido estar acá. A mi hermana Francesca, por ser siempre mi fuente de motivación y apoyo. A Jean Carlo por su apoyo y compañía durante este tiempo.

Asimismo, agradezco a mi director, Prof. Jordi Teixido, que, con su guía, dedicación y expertiz, hizo posible la concretización de la presente investigación. Igualmente, extiendo mi agradecimiento al Prof. Joan-Ramón Borrell y a la Prof. María Marino por su siempre disposición para brindarme el apoyo necesario y poder lograr la concretización de este trabajo. De igual manera, agradezco al Prof. Pedro Gamio, por su disposición, sugerencias y comentarios que me ayudaron y motivaron para realizar la presente investigación. Finalmente, extiendo mi agradecimiento al Prof. Witson Peña, por su apoyo, comentarios y sugerencias que fueron de mucha ayuda para lograr culminar este trabajo. La responsabilidad de cualquier error u omisión que contenga la versión final del trabajo corresponde exclusiva a la autora del trabajo.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	CONTEXTO Y PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO VERDE EN LA MINERÍA PERUANA	8
3.	METODOLOGÍA.....	14
4.	COMPARATIVA DE LA REGULACIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE EN PERÚ Y CHILE	15
5.	PROPUESTA DE PROYECTO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.....	28
6.	CONCLUSIONES.....	36
7.	BIBLIOGRAFÍA	37

1. Introducción

En un esfuerzo por combatir el cambio climático y cumplir con sus compromisos internacionales, Perú ha ratificado el Acuerdo de París, comprometiéndose a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante, GEI) en un 30% para el año 2030. Por ello, alcanzar esta meta requiere la implementación de medidas efectivas en sectores clave de la economía, siendo uno de los más importantes: la minería.

Cabe precisar que, el sector minero consume el 9% de la energía del Perú, dentro de este sector, la minería del cobre representa un 90% de consumo energético. Asimismo, dentro de la minería del cobre los combustibles como el diésel representan un 94% del total (Jesús Claros, 2023), por lo que existe un alto potencial de mitigaciones de emisiones asociadas a esta industria. Igualmente, el sector minero es un sector que ha venido trabajando en la transición al uso de energías limpias en toda su cadena de valor y cuenta con el capital económico para poder lograr la transición neutra. No obstante, dentro del sector minero, el transporte es una subcategoría crítica, ya que el transporte minero pesado depende exclusivamente del diésel, contribuyendo significativamente a las emisiones de GEI del país.

Es posible lograr la transición energética manteniendo el crecimiento del PIB¹. Por ello, dentro de las políticas que se deben aplicar al sector minero se encuentran lo relacionado a la eficiencia energética y traslados de consumos de combustibles fósiles al uso de electricidad, es decir uso de energía que sea menos contaminante, así como electrificar el transporte utilizando el potencial de las energías renovables disponibles. En este escenario aparece el hidrógeno verde como una opción energética.

Un área de investigación para la penetración del hidrógeno verde en tecnologías convencionales es el reacondicionamiento de camiones de extracción minera de alto tonelaje (camiones CAEX), el cual sirve como un ámbito para que puedan funcionar con tecnología en base a hidrógeno verde.

¹ En la legislación peruana denominado Producto Bruto Interno (PBI)

A fin de poder implementar este tipo de tecnologías, se ha mirado hacia precedentes internacionales, como la regulación que se viene implementando en países como Chile. Cabe precisar que Chile es un país con similitudes geográficas y económicas al Perú, donde se está promoviendo la introducción del hidrógeno verde en diversas aplicaciones, especialmente como combustible en busca de reemplazar el diésel.

Siguiendo esta línea, el Gobierno Peruano ha promulgado la Ley de Fomento del Hidrógeno Verde, delegando al Ministerio de Energía y Minas la formulación de políticas y planes energéticos para el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde. Entre las estrategias planteadas se incluye el otorgamiento de beneficios fiscales para incentivar su investigación, producción, transformación, transporte, comercialización, exportación y uso.

Sin embargo, la ley vigente no especifica claramente los tipos de beneficios fiscales o las regulaciones económicas aplicables, lo cual genera incertidumbre y riesgo para los inversionistas privados, quienes enfrentan los altos costos de capital al introducir esta tecnología.

En razón a lo señalado anteriormente, consideramos que nos encontramos frente a una externalidad de red positiva, es decir, una falla de mercado, lo cual justifica que es válido la intervención del Estado a fin de poder incentivar la demanda.

En razón a lo señalado, el objetivo del presente documento es realizar un análisis comparativo de las regulaciones vigentes en Chile y Perú respecto a la introducción del hidrógeno verde, especialmente su aplicación al sector minero como combustible, a fin de poder evaluar las similitudes y los desafíos que existen. Al considerar justificada la intervención del Estado, planteamos un proyecto prototipo de innovación tecnológica, el *retrofit* de un camión CAEX Dual que utilice 60% de hidrógeno verde y 40% de diésel. La implementación de este tipo de tecnologías en los camiones CAEX incentivaría la demanda del hidrógeno verde en el sector minero como combustible, desplazando el uso de diésel de forma parcial al adaptar los motores para funcionar de manera dual junto al hidrógeno.

Para ello, en primer lugar, señalaremos el contexto del hidrógeno verde en la minería peruana. Seguidamente de ello, aplicaremos la metodología comparativa, a través de la cual se busca identificar similitudes en el consumo energético en el sector minero tales como los aspectos geográficos, en los procesos de producción de hidrógeno verde, y en las regulaciones económicas. Este enfoque permitirá evaluar la viabilidad de adaptar y aplicar las regulaciones existentes en Chile al contexto peruano, con miras a incentivar la demanda del hidrógeno verde en el Perú. Tras ello, planteamos el proyecto de innovación tecnológica, así como posibles formas de financiamiento como las asociaciones público-privadas. Para evaluar si este proyecto de innovación tecnológica incentivaría la demanda del hidrógeno verde en el sector minero, aplicaremos el método de análisis costo-beneficio (ACB). Para ello, simularemos la transformación de un camión minero CAEX, valorando los costos de esta inversión, la adquisición de hidrógeno verde como combustible, y comparándolos con los beneficios sociales.

Esperamos que los costos iniciales de transformación sean altos, pero que los beneficios sociales, especialmente en la reducción de emisiones de GEI, sean significativos. Por ello, ante esta falla de mercado, proponemos la intervención del Gobierno con un mecanismo de financiamiento mixto. Esto crearía un incentivo potente para que las empresas realicen la transformación o adquisición de nueva flota, generando una demanda sólida en este nuevo mercado de hidrógeno verde. De esta manera, teniendo una demanda sólida, se promovería la producción de hidrógeno verde a gran escala.

A largo plazo, consideramos que el costo de producción del hidrógeno verde será menor que el del diésel e incluso que el gas natural, cuyo precio es volátil debido a la dependencia del escenario internacional. Esto incentivará aún más a las compañías mineras a adoptar nuevas tecnologías y reducir su dependencia del diésel o petróleo, contribuyendo así a una transición energética sostenible.

Con este trabajo, buscamos contribuir a la literatura ya existente sobre la aplicación del hidrógeno verde en el Perú, proporcionando una base para futuras políticas públicas y estudios en el ámbito de energías renovables, así como de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, a fin de poder cumplir el objetivo planteado por el Gobierno del Perú al rectificar sus acuerdos internacionales.

2. Contexto y perspectivas del hidrógeno verde en la minería peruana

En este apartado, en primer lugar, nos referiremos al hidrógeno y sus características técnicas relevantes, así como sus diferentes tipos. Tras ello, haremos un especial énfasis en el hidrógeno verde, su producción y sus diferentes aplicaciones. Seguidamente, nos referiremos a la regulación existente del hidrógeno verde en el Perú y su aplicación al sector de la minería.

El hidrógeno, es el elemento más abundante y antiguo del universo, se encuentra naturalmente en numerosos compuestos, especialmente en el agua y los combustibles fósiles. Cada año se producen cerca de 120 millones de toneladas de hidrógeno en el mundo, de las cuales dos tercios son de hidrógeno puro y el resto está mezclado con otros gases (International Energy Agency [IEA], 2019).

El hidrógeno tiene un poder calorífico notable, superior al de otros combustibles como la gasolina y el diésel, lo que lo convierte en una alternativa atractiva por su alta eficiencia energética (Santibáñez, 2023). Puede generar temperaturas de combustión superiores a 1000°C sin emitir CO₂, destacando su potencial como combustible limpio. Ello lo podemos advertir en la *Tabla 1*.

Tabla 1

Comparación del hidrógeno con otros combustible

Combustible	LHV ³ (MJ/kg)	HHV ⁴ (MJ/kg)
Metano	50.0	55.5
Propano	45.6	50.3
Octano	47.9	15.1
Metanol	18.0	22.7
Hidrógeno	119.9	141.6

² La combustión de hidrógeno no emite CO₂. Sin embargo, si genera óxido nitroso que es un importante contaminante atmosférico.

³ Lower Heating Value, hace referencia al poder calorífico inferior que es la cantidad de energía liberada por la combustión completa de un combustible cuando el agua formada durante la combustión permanece en estado de vapor.

⁴ Higher Heating Value, hace referencia al poder calorífico superior que es cantidad total de energía liberada por la combustión completa de un combustible incluyendo el calor de condensación del vapor de agua producido durante la combustión.

Gasolina	44.5	47.3
Diésel	42.5	44.8

Nota. Adaptado de Gasoline, Diesel and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants. Gupta, R.B & Demirbas, A.2010

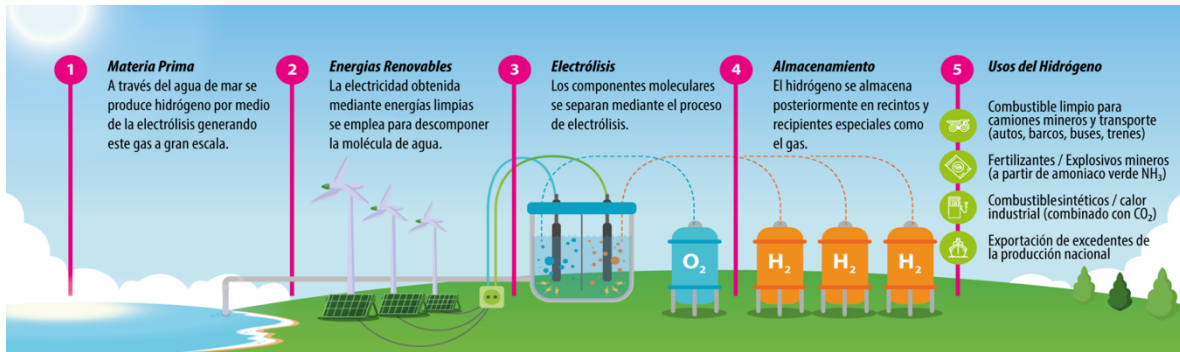
Aunque no es una fuente primaria de energía, el hidrógeno actúa como un vector energético, almacenando y liberando energía de forma controlada (Antoranz, 2021). Dependiendo de su proceso de producción y las emisiones de CO₂ asociadas, el hidrógeno se clasifica en varios tipos: (i) gris y negro, producidos a partir de gas natural y carbón sin captura de carbono (ii) azul con captura de carbono (iii) turquesa, potencialmente neutro en emisiones (iv) rosa, producido con energía nuclear y (v) verde, producido mediante electrólisis con energías renovables (Escribano, Lázaro, & Urbasos, 2022).

El Perú, debido a los recursos naturales que posee ha optado por producir hidrógeno verde por ser más atractivo y viable a largo plazo. El hidrógeno verde, obtenido por electrólisis de agua utilizando electricidad de fuentes renovables (Yergin, 2020), es clave para la transición energética. Este tipo de hidrógeno puede descarbonizar sectores como el transporte pesado, la producción de químicos y el hierro, donde es difícil reducir las emisiones de GEI, a corto plazo, gracias a su capacidad para sustituir el gas en los procesos industriales que requieren altas temperaturas y, a largo plazo, por su contribución al almacenamiento y a ampliar las opciones de movilidad sostenible (IRENA, 2019).

Cabe precisar que el proceso de producción del hidrógeno verde se da mediante la electrólisis del agua con energías renovables, entendiéndose como el procedimiento químico que se da a través de los electrolizadores, los cuales dividen las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno (IRENA, 2019). El hidrógeno producido se almacena en recintos especiales como ocurre con el gas natural y es transportado mediante contenedores o a través de gaseoductos. Dicho procedimiento lo podemos advertir en la *Figura 1*.

Figura 1

Producción del hidrógeno verde



Nota. Tomado de Análisis de viabilidad de generación de generación de hidrógeno verde en la región sur del Perú para determinar su competitividad en la matriz energética. Buendía, M; De la Cruz, J; Gallardo, J & Huamani, M. 2022. [Tesis de Maestría, Universidad ESAN Perú]

El hidrógeno verde permite diferentes aplicaciones como combustibles, como gas al ser inyectado directamente en las redes de gas, como una fuente de energía móvil en el mercado de baterías portátiles, así como parte de la obtención de diversos refinados de petróleo.

Respecto a la regulación del hidrógeno verde en el Perú, el marco regulatorio es relativamente nuevo, reflejando los esfuerzos recientes del Gobierno peruano para actualizar su Estrategia Nacional ante el Cambio Climático al 2050. Con una visión clara de alcanzar la neutralidad del carbono a mitad de siglo, Perú está explorando la integración del hidrógeno verde como una pieza clave en su transición energética.

Esta actualización normativa busca no solo impulsar el desarrollo de tecnologías sostenibles, sino también posicionar al hidrógeno verde como un componente esencial en la descarbonización de diversos sectores, alineándose con las metas globales de reducción de emisiones y promoviendo un futuro más limpio y sostenible para el país.

Cabe precisar que el Perú ha sido históricamente un país hidroeléctrico con un 85% de su energía eléctrica generada a partir de esta fuente hasta 2002. Sin embargo, con la introducción del

gaseoducto de Camisea⁵ y el uso de gas natural cambiaron esta tendencia. Recientemente, el Estado peruano ha implementado políticas para fomentar las energías renovables no convencionales con el fin de reducir las emisiones de GEI.

El Decreto Legislativo N° 1002 (2008) estableció el marco legal para promover inversiones en energías renovables, definidas como eólica, solar, térmica, biomasa y biogas. En sus inicios, estas energías representaban solo el 0,01% de la energía del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, pero con el impulso de nuevos proyectos, esta participación aumentó al 5,9% para diciembre de 2020 (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional [COES], s.f.)

Actualmente, la matriz energética del Perú se compone de 34% de gas natural, de 18,7% de diésel, de 37,8% de hidroeléctricas, 2% de solar, 3,8% de eólica y otros 3,7% (MINEM, 2024). La diversificación de la matriz energética, mediante la introducción de tecnologías RER, aumenta la confiabilidad del sistema eléctrico y reduce la dependencia de combustibles fósiles. Por ello, el Gobierno peruano en aras de reducir esa dependencia, así como cumplir con los objetivos internacionales de reducción de emisiones de GEI, ha ido implementando diferentes medidas como la introducción del hidrógeno verde en sus diferentes aplicaciones como el combustible.

El 10 de marzo de 2022, la Asociación Peruana de Hidrógeno – H2 Perú presentó al Congreso y al Poder Ejecutivo del Perú una propuesta de Hoja de Ruta para el hidrógeno verde junto con un documento con bases y recomendaciones para su estrategia. Este documento analiza estrategias de producción, oportunidades para Perú, sectores de aplicación y posibilidades de exportación del hidrógeno verde. (H2Lac).

El 4 de marzo de 2024, el ministro de Energía y Minas anunció que se encuentra en marcha la elaboración de la Hoja de Ruta Nacional del hidrógeno verde, que incluye las siguientes etapas: (i) para el 2024, creación de un marco normativo de promoción (ii) para el 2025, actualización de la Política Energética Nacional y establecimiento de estándares técnicos (iii) para el 2028, desarrollo de pilotos de repostaje para vehículos eléctricos (iv) para el 2030, lanzamiento de proyectos piloto

⁵ Principal gaseoducto exportador de gas natural en el Perú

en diversas regiones y en el transporte público y (v) para el 2040, establecimiento de la capacidad de exportación.

Con fecha 23 de marzo de 2024, se publicó la Ley N° 31992 (2024), Ley de Fomento del Hidrógeno Verde, la cual define el hidrógeno verde como un vector energético producido con tecnologías de baja emisión de gases de efecto invernadero y establece medidas para impulsar su industria. La normativa tiene como objetivo fomentar la investigación, el desarrollo, la producción, la transformación, el almacenamiento, el acondicionamiento, el transporte, la distribución, la comercialización, la exportación y el uso del hidrógeno verde como combustible y como vector energético (Francovich, 2024). Igualmente, la normativa incluye los usos del hidrógeno verde, los requisitos necesarios para su certificación y la promoción de la investigación científica.

En concordancia a lo señalado por ENGIE IMPACTT (2021) en su estudio sobre el potencial de desarrollo de hidrógeno verde en el Perú, en la exposición de motivos del proyecto de Ley N° 4374/2022-CR⁶, se señala que el Perú está en la capacidad de producir hidrógeno verde a través de energías renovables como la solar y la eólica, pues cuenta con las condiciones geográficas para ello. Ello permitiría cubrir la demanda energética nacional y tentar la posibilidad de exportar.

Cabe precisar que en el Perú ya existe una empresa denominada “Industrias Cachimayo” que produce hidrógeno a partir del proceso de electrólisis; sin embargo, la energía utilizada provenía del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Por ello, firmó un acuerdo con la empresa generadora de energía Engie Energía Perú a fin de que pueda certificar que la energía comprada a esta generadora para la operación de su planta provenga de fuentes renovables. En ese sentido, se le otorgó la Certificación REC emitida por *The International REC Standard* que certifica que “Industria Cachimayo” produce hidrógeno a partir de energías renovables. Asimismo, el Centro de Energías Renovables y Uso Racional de Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería está desarrollando un prototipo de electrolizador para la producción de hidrógeno verde a partir del agua subterránea, mediante un proceso químico impulsado por energía fotovoltaica.

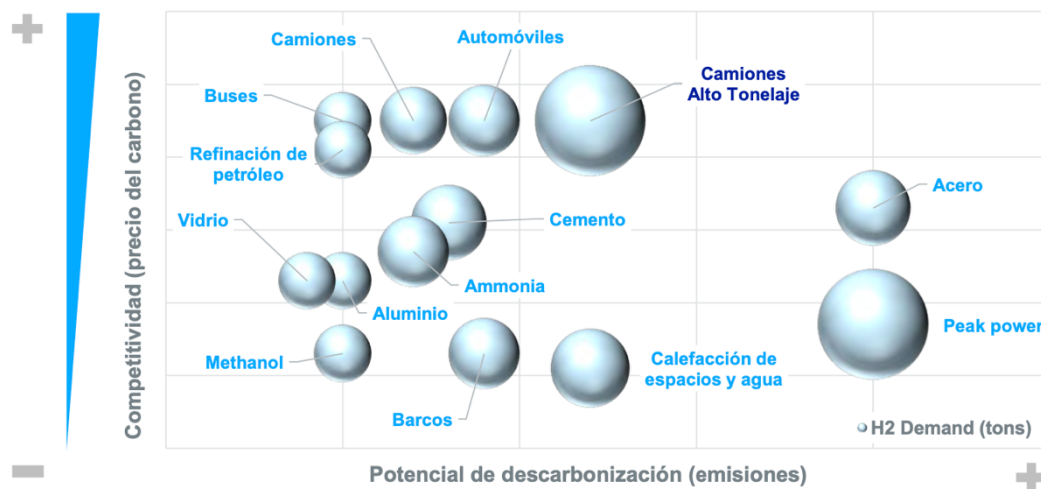
⁶ Este proyecto ley se encontraba dentro de los tres proyectos ley que buscaban impulsar la aplicación del hidrógeno verde en el Perú. Este proyecto ley proponía crear e implementar un parque de electrolizadores bajo la administración de la Universidad Nacional de Ingeniería para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan la producción y almacenamiento del hidrógeno.

De lo señalado, podemos advertir que el ecosistema de hidrógeno verde se está generando, pues existe oferta de producción de hidrógeno verde, la cual está en crecimiento ya que hay empresas que están desarrollando esta tecnología, así como proyectos piloto que buscan fomentar mecanismos más eficientes. Por otra parte, para que este ecosistema se consolide es necesario poder generar una demanda sostenible que lo permita.

Es así como, en el estudio realizado por Engie Impact (2021) sobre el potencial de hidrógeno verde en el Perú, se ha señalado las aplicaciones con mayor potencial para el hidrógeno verde, lo cual puede generar una demanda sostenible. El estudio reflejó que el hidrógeno verde tendría una competitividad más significativa en el transporte pesado, como los camiones CAEX de alto tonelaje, los cuales se utilizan en el sector minero. Ello se puede advertir en el *Figura 2*.

Figura 2

Potenciales aplicaciones hidrógeno verde Perú



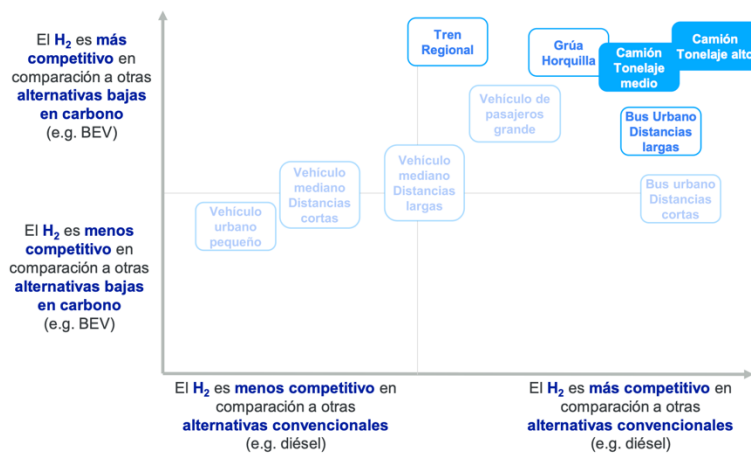
Nota. Adaptado de Asociación Peruana de Hidrógeno – H2 Perú. Estudio realizado por Engie Impact. Potencial del hidrógeno verde en el Perú. 2021. https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf

Asimismo, señaló que el hidrógeno verde jugará un rol crucial en la descarbonización de las flotas mineras y en el desplazamiento de combustibles fósiles pues, a diferencia de otros combustibles

como el diésel o el gas natural, el hidrógeno verde en este tipo de transporte (camiones de alto tonelaje) será más competitivo. Ello lo podemos advertir de la *Figura 3*.

Figura 3

Comparación de uso de hidrógeno verde con otras alternativas en camiones de tonelaje alto



Nota. BEV se refiere a Batería eléctrica para vehículo por sus siglas en inglés. Adaptado de Asociación Peruana de Hidrógeno – H2 Perú. Estudio realizado por Engie Impact. Potencial del hidrógeno verde en el Perú. 2021. https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf

De lo expuesto, podemos precisar que se está generando un mercado de hidrógeno verde. Ya existen alternativas en cuanto a la oferta. No obstante, es necesario generar una demanda sólida. Los estudios han reflejado, por ejemplo, que el hidrógeno verde podría aplicarse principalmente como combustible en camiones de alto tonelaje, que son utilizados en el sector minero, siendo este el principal sector de aplicación del hidrógeno verde. Asimismo, ha señalado que el hidrógeno verde es más competitivo en comparación a otras alternativas convencionales como el diésel o el BEV.

3. Metodología

En el presente documento, en primer lugar, utilizaremos la metodología comparativa, la cual es utilizada para analizar y comparar dos o más elementos, a fin de poder identificar similitudes y/o diferencias entre ellos. Para poder aplicar esta metodología es necesario tener objetivos claros, establecer una comparación directa entre dos o más elementos, tener en cuenta el contexto

particular, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener los datos, analizar los datos obtenidos y llegar a conclusiones basadas en la comparación (Ortega, s.f.)

En segundo lugar, aplicaremos un análisis coste-beneficio (ACB) a fin de poder evaluar si el proyecto de innovación tecnológica es óptimo en aras de incentivar la demanda en el uso de hidrógeno verde en el sector minero.

El ACB es una herramienta que sirve para ayudar a los gobiernos a comparar los beneficios y costes sociales, así como ayudar en la selección de las mejores políticas públicas o proyectos de inversión. El criterio básico es el aumento del bienestar social, para lo cual hay que medir el cambio en la utilidad o bienestar individual (De Rus, 2021).

En el presente documento, nos hemos basado en la metodología descrita en el trabajo elaborado por Ginés de Rus (2021), el cual introduce de forma sencilla los conceptos básicos del ACB.

4. Comparativa de la Regulación del Hidrógeno Verde en Perú y Chile

En este apartado, realizaremos un análisis comparativo de las regulaciones legislativas y económicas vigentes en Chile y Perú en relación con la introducción del hidrógeno verde, con el fin de identificar similitudes y diferencias que podrían guiar la adopción de regulaciones en Perú. Primero, abordaremos la relevancia del sector minero en ambas economías, su consumo energético y el potencial reemplazo por hidrógeno verde. Tras ello, examinaremos las regulaciones legislativas y económicas en cada país, y concluiremos señalando las áreas de regulación sobre el hidrógeno verde que podrían ser replicadas en Perú.

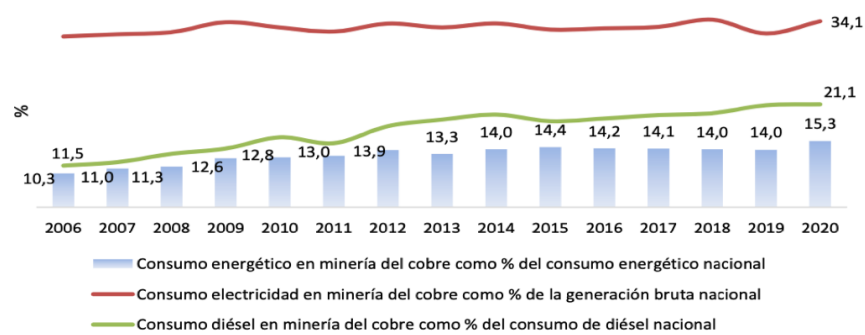
4.1 Respecto al sector minero

La economía chilena está centrada en la minería, particularmente en la extracción de cobre. Desde 1870, Chile ha sido el mayor exportador mundial de cobre, y desde 1900 ha producido alrededor de 550 millones de toneladas, de las cuales dos tercios siguen en uso productivo (Comisión Chilena del Cobre [Cochilco], 2022)

Al respecto, es interesante analizar el consumo de energía involucrado en la actividad central de la economía del país chileno. De acuerdo con la Comisión Nacional de Energía (CNE), la minería del cobre al 2020 es responsable del 15,3% del consumo energético de Chile y también se desprende que esta industria representa el 21,1% del consumo total nacional de diésel (Cochilco, 2022). Podemos advertir de la *Figura 4* el comportamiento creciente del consumo de este sector en la industria.

Figura 4

Participación del consumo sectorial de energía en el consumo nacional chileno 2006-2020



Nota.

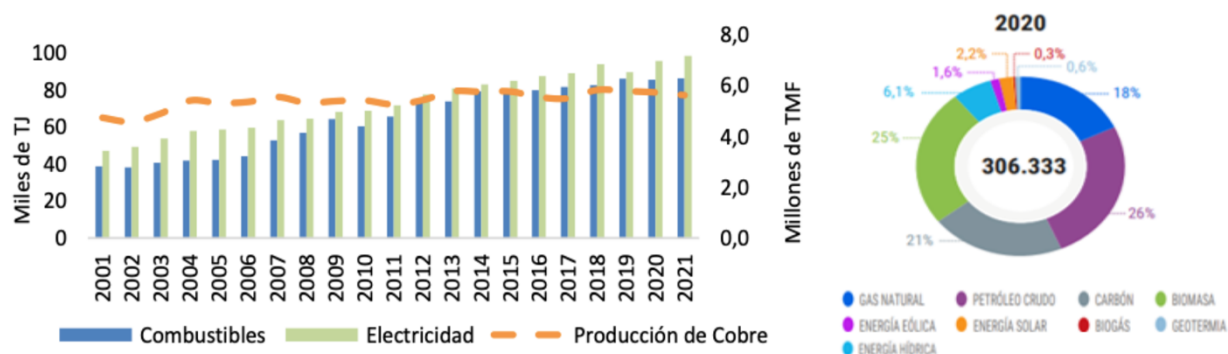
Recuperado de

Cochilco. 2021. <https://www.cochilco.cl/mercadoenergético>

Por otro lado, de la *Figura 5* podemos advertir el consumo energético de los últimos 20 años en la minería del cobre, así como la composición de la oferta de energía primaria al 2020.

Figura 5

Consumo energético y composición de la matriz energética Chile



Nota. (Lado izquierdo) Consumo energético en la minería del cobre. 2001-2021. (Lado derecho) Composición matriz energética Chile 2020. Recuperado de Cochilco (2022) y CNE (2021).

De las gráficas presentadas anteriormente, se puede advertir que el consumo energético de combustible y electricidad en la industria minera del cobre para el 2021 no puede ser abastecido exclusivamente con energía solar o eólica, ello porque la cantidad demanda (78.500 TJ) es superior a la oferta de energías limpias como la solar o eólica. El Gobierno de Chile ha señalado que además de impulsar el aumento de energías limpias es necesario introducir nuevas tecnologías como el hidrógeno verde que permita abastecer la demanda energética de la industria minera del cobre.

Asimismo, ha señalado que una de las áreas menos energointensivas y que se relaciona transversalmente al consumo de las mineras es el transporte minero, por lo cual este es un sector atractivo para poder comenzar con la aplicación del hidrógeno verde.

De acuerdo con ello Jiménez F. (2020), ha señalado que en Chile existe un mercado amplio para el uso del hidrógeno verde, así se considera que puede reemplazar al diésel en motores de combustión interna.

Por otra parte, la industria minera chilena se encuentra principalmente en las regiones de Atacama y Antofagasta perteneciente a la zona Norte Grande de Chile. Así, estas zonas se destacan por la elevada radiación solar que reciben, debido a la transparencia de la atmósfera y al alto número de días con escasa nubosidad, lo que conlleva a condiciones óptimas para la producción de energía solar (Santibañez Núñez, 2023), materia prima necesaria para poder producir el hidrógeno verde y disminuir el costo de energía para la producción de este.

Al igual que en Chile, en el Perú la economía se basa en la minería, especialmente en la extracción del cobre. De acuerdo al Anuario Minero 2022 del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM), Perú se posiciona a nivel mundial como segundo mayor productor de cobre y zinc (2022). Asimismo, la extracción del cobre aporta al 57.9% del PIB minero metálico, siendo el metal que más aporta en el sector minero.

Respecto al consumo de energía en el sector, para el 2018, con una tasa de crecimiento promedio anual de 4% en el consumo de energía nacional, el sector minero se posicionó con el 9% (Jesús Claros, 2023). Asimismo, del 2014 al 2018, el sector minero logró un crecimiento de 147% en su consumo de energía, esta tendencia se ha mantenido al 2021, lo cual refleja que es uno de los sectores más dinámicos y que contribuye al crecimiento económico del país.

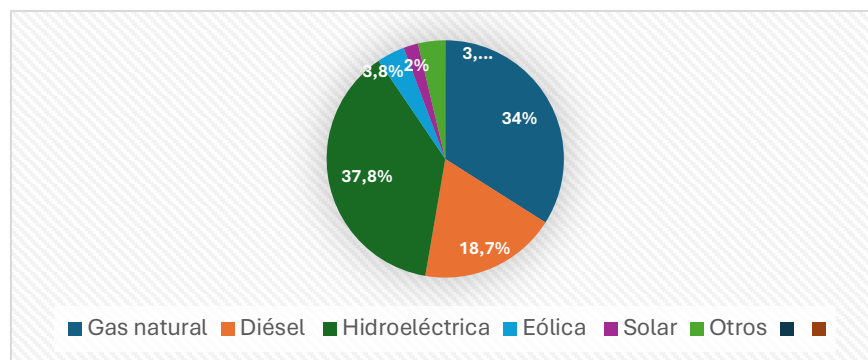
Ahora sobre las emisiones de GEI producidas, se puede señalar que al 2018 se emitieron 51,714 millones de tCO₂,⁷ de los cuales el 48% provino del transporte y 2,5% fue emitido por el sector minero (Jesús Claros, 2023).

De lo señalado anteriormente, podemos advertir que la oferta y la demanda energética en el Perú se ha mantenido en un crecimiento proporcional, es decir, a mayor crecimiento de la demanda, mayor emisión de GEI. De ello se puede desprender que no existe una estrategia nacional clara para poder realizar la transición de matriz energética a una más limpia.

Por otra parte, actualmente, la matriz energética del Perú se compone de 34% de gas natural, de 18,7% de diésel, de 37,8% de hidroeléctricas, 2% de solar, 3,8% de eólica y otros 3,7%. (MINEM, 2024). Ello lo podemos advertir en la *Figura 6*.

Figura 6

Composición matriz energética Perú



Nota. Elaboración propia. Adoptado de MINEM 2024.

⁷ Toneladas de Dióxido de Carbono

Ahora, el consumo de energía en el sector minero es de 83 138 TJ⁸ (MINEM,2024), lo cual, al igual que Chile, no puede ser abastecido exclusivamente con energía solar o eólica, porque la cantidad demanda es superior a la oferta de energía limpias como se puede desprender de la *Figura 5*, pues el porcentaje de oferta de energía solar y eólica es muy reducido.

Al igual que en el caso chileno, es necesario impulsar el aumento de energías limpias e introducir nuevas tecnologías como el hidrógeno verde que permita abastecer la demanda requerida por el sector minero.

Engie Impact (2021), en su estudio para el Perú ha señalado que el hidrógeno verde tendría un rol crucial en la descarbonización de las flotas mineras y el desplazamiento de combustibles fósiles, siendo esto su más potente aplicación. Por ello, al igual que el caso chileno, se propone realizar la transición en un área menos energointensiva como es el transporte minero, buscando reducir sus emisiones de GEI.

Por otra parte, Engie Impact (2021) señala que las regiones norte y sur son los principales potenciales de producción de hidrógeno verde gracias a sus recursos naturales. En el caso de la región sur, predomina la potencia solar; en cambio, en la región norte predomina el potencial eólico. La región sur de Perú concentra el consumo minero debido a la presencia de las principales compañías extractoras de cobre, similar a la zona Norte Grande en Chile. Esta coincidencia geográfica sugiere un alto potencial para la producción de hidrógeno verde en la región

Así, Engie Impact (2021) destaca que el Perú está bien posicionado globalmente para desarrollar hidrógeno verde a bajo costo. Se sugiere evaluar el proyecto del gasoducto sur para su producción y distribución. Los principales consumidores serían la minería y la industria manufacturera, con un alto potencial de sustituir combustibles como el diésel, especialmente en la movilidad de camiones de alto tonelaje en el sector minero.

⁸ Terajoules, es la unidad de energía equivalente a un billón de julios, el cual es lo necesario para producir un vatio de potencia durante un segundo.

4.2. Regulaciones legislativas

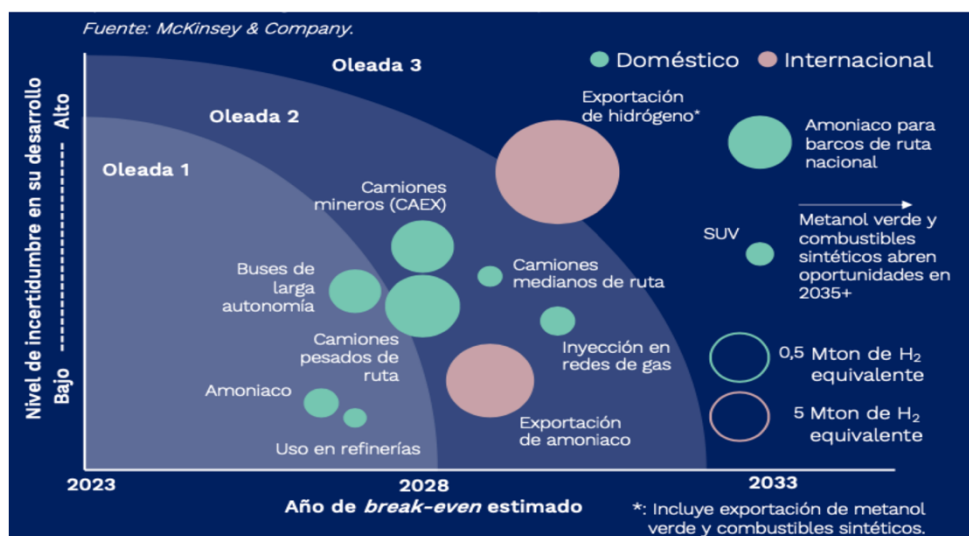
El Gobierno de Chile ha implantado una Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, el cual surge de las ventajas que ofrece el desarrollo de la industria así como la geografía del país ante la transición energética y productiva.

La Estrategia Nacional establecida consta de cinco (5) etapas se inició con: (i) una Mesa Interinstitucional, y tenía como fin principal elaborar un diagnóstico y proponer objetivos para el desarrollo del hidrógeno verde (ii) las Mesas Técnicas, tenían como fin principal identificar barreras al desarrollo del hidrógeno, proponer acciones y priorizarlas (iii) se conformó un Consejo Asesor, a fin de poder definir los lineamientos de alto nivel (iv) se realizaron talleres ciudadanos con representantes de ONGs y asociaciones ciudadanas locales, a fin de poder identificar principales preocupaciones de la ciudadanía y su percepción acerca del rol del Estado en este tema y (v) el documento elaborado, el cual se sometió a Consulta Pública con las observaciones de la comunidad. Dicho documento fue publicado el 3 de noviembre de 2020.

La materialización de la Estrategia Nacional de hidrógeno verde se realizará a través de 3 etapas definidas como “oleadas”, que están determinadas por el nivel de incertidumbre en el desarrollo tecnológico de producción, nivel de penetración en aplicaciones y competitividad en comparación con otras alternativas de descarbonización, las cuales son: (i) Primera oleada: se dará en consumos domésticos de gran escala con demanda establecida. (ii) Segunda oleada: se tiene la expectativa, para el 2025, de extender el uso del transporte con hidrógeno verde y comenzar con la exportación del mismo. Asimismo, se busca impulsar una producción competitiva para desplazar a combustibles líquidos en el transporte terrestre y combustibles gaseosos en redes de distribución, (iii) Tercera oleada: a largo plazo se espera que se abra un mercado de exportación para escalar como los sectores del transporte marítimo y aéreo. A continuación, se muestra en la *Figura 7*, el desarrollo proyectado de aplicaciones del hidrógeno verde en Chile.

Figura 7

Aplicaciones de hidrógeno verde en Chile



Nota. El gráfico considera nivel de incertidumbre, tamaño de mercado y año break-even (No considera precio del carbono). (Ministerio de Energía Gobierno de Chile , 2020)

El 13 de febrero de 2021, la Ley de Eficiencia Energética N° 21305 modificó el Decreto de Ley N° 2.224 de 1978, que creó el Ministerio de Energía y la Comisión Nacional de Energía, ampliando sus competencias para incluir el hidrógeno, sus derivados y otras fuentes y vectores energéticos.

En la legislación chilena, aunque no existe una regulación específica para el hidrógeno como vector energético, se han desarrollado proyectos piloto para su producción y uso. La Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) emite una guía legal para autorizar operaciones de proyectos de hidrógeno, abarcando su producción, transporte, almacenamiento y consumo como combustible (H2 Chile Asociación chilena de hidrógeno, 2024). Para poder avalar su seguridad y calidad pueden utilizar algunas normas internacionales como ANSI, ASME, ASTM, AWS. Tras el análisis correspondiente, se permitirá el registro de la instalación. Complementaria a esta norma, en el caso específico de proyectos en faenas mineras se utiliza la guía establecida por el SERNAGEOMIN, que es la entidad encargada de garantizar la seguridad del sector minero. Esta última guía tiene como principal enfoque el recambio de tanques de hidrógeno verde y el uso de hidrógeno verde como combustible en equipos móviles de uso tanto en minería subterránea como de rajo entre otros.

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a través de la circular DDU 470, clasificó los proyectos de generación de hidrógeno como infraestructura energética, los cuales están regulados según el artículo 2.1.29 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. De acuerdo a la ordenanza señalada las redes o trazados de cualquier componente de los proyectos que estén destinados al transporte de hidrógeno siempre serán admitidos. El Decreto 14 establece requisitos mínimos de seguridad para instalaciones de hidrógeno con fines energéticos, así como las responsabilidades de quienes participan en estas actividades. Sin embargo, el Decreto no contempla responsabilidades para vehículos que operen con hidrógeno ni para las estaciones de servicio, por lo que estos casos deben evaluarse según la guía emitida por el SEC.

Ahora, en el caso peruano, el marco regulatorio sobre el hidrógeno verde en Perú es relativamente nuevo, reflejando los esfuerzos recientes del Gobierno peruano para actualizar su Estrategia Nacional.

Al respecto, a diferencia de Chile, el Perú no cuenta aún con una Hoja de Ruta aprobada por el Gobierno. No obstante, con fecha 04 de marzo de 2024, el ministro de Energía y Minas del Perú señaló que se está elaborando la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno Verde, el cual consideraría lo siguiente: (i) 2024 se elabore un instrumento normativo de promoción del hidrógeno verde, (ii) en el 2025 se actualice la Política Energética Nacional incluyendo este elemento y se establezcan estándares y normativas técnicas para su provisión, (iii) 2028 se elaboren pilotos de repostaje de hidrógeno verde para vehículos, (iv) 2030 se lancen proyectos pilotos de 255, 68 MW en la provincia de Callao, Piura, Matarani e Ica, así como pilotos de aplicación en el transporte público; finalmente, (v) 2040 se pueda señalar la capacidad de exportación (Ministerio de Energía y Minas Perú, 2024).

Por otra parte, a diferencia de Chile, en mayo de 2024 se promulgó la Ley N° 31992, Ley de fomento del hidrógeno verde, mediante el cual se brinda un marco normativo que señala las medidas necesarias que se deben implementar a fin de impulsar el desarrollo de una industria que permita el uso del hidrógeno verde como vector energético. En dicha ley, se define al hidrógeno verde como un vector energético producido con tecnologías de baja emisión de GEI.

La normativa tiene como objetivo fomentar la investigación, el desarrollo, la producción, la transformación, el almacenamiento, el acondicionamiento, el transporte, la distribución, la comercialización, la exportación y el uso del hidrógeno verde como combustible y como vector energético (Francovich, 2024). Igualmente, la normativa incluye los usos del hidrógeno verde, los requisitos necesarios para su certificación y la promoción de la investigación científica.

Esta normativa podría establecer una estrategia nacional para promover la generación eléctrica con hidrógeno verde en Perú. Sin embargo, es crucial que el Gobierno peruano alinee su normativa con los estándares internacionales, que definen el hidrógeno verde como aquel producido exclusivamente mediante energías renovables sin emisiones de gases de efecto invernadero, como la solar o eólica, excluyendo fuentes como la biomasa y el biogás.

4.3. Regulaciones económicas.

La industria del hidrógeno verde en Chile se encuentra en una etapa temprana, y para que los proyectos de diversas escalas se concreten, es crucial que el Estado garantice un marco de certidumbre y estabilidad. Asimismo, debe incentivar la competencia, atraer inversiones privadas a través de apoyos financieros desde la política pública y de este modo, reducir costos y mitigar riesgos.

Actualmente, los proyectos de hidrógeno verde aún no alcanzan su punto de equilibrio en su rentabilidad, por lo que es importante el acompañamiento de distintos incentivos por parte del Estado.

El Plan de Acción del Hidrógeno Verde presentado por el Gobierno de Chile (2024) ha establecido los mecanismos económicos y financieros de impulso a la industria del hidrógeno verde y sus aplicaciones, en toda su cadena de valor. Así, establece los siguientes mecanismos: (i) asignar terrenos fiscales para la industria del hidrógeno verde y sus derivados (ii) potenciar instrumentos de fomento con foco en hidrógeno verde (iii) impulsar la demanda interna/nacional de hidrógeno a través de un Sistema de Comercio de Emisiones (ETS) (iv) crear un fondo para créditos tributarios imputables al impuesto de primera categoría incluyendo la dimensión “verde” (v) implementar una tasa de desarrollo para la inversión que permita reducir impuestos de primera categoría a inversiones

que incrementen productividad de las empresa (vi) incentivo tributario a la investigación y desarrollo, a través del fortalecimiento de la ley I+D (20.241) (vii) actualizar el instrumento “Crédito Verde” a intermediarios financieros bancarios y no bancarios (viii) implementar una facilidad de financiamiento de proyectos de hidrógeno verde y su cadena de valor (ix) acompañar a proyectos de producción y/o consumo de hidrógeno verde y derivados con asesorías e instrumentos de apoyo financiero (x) Acelerar la implementación de los primeros proyectos industriales de hidrógeno verde y derivados mediante rondas de financiamiento. Nos enfocaremos en algunos mecanismo que son más relevantes para el fin del presente trabajo.

Respecto, a potenciar instrumentos de fomento con foco en hidrógeno verde. Estos instrumentos son gestionados por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y permiten solucionar problemas de acceso a financiamiento para la realización de actividades asociadas a desarrollo tecnológico y/o productivo. El objetivo es enfocar instrumentos ya brindados por el CORFO para abordar desafíos de desarrollo tecnológico del hidrógeno verde en toda la cadena de valor.

En cuanto a fomentar la demanda interna de hidrógeno en sectores clave, el Gobierno de Chile propone implementar un sistema de comercio de emisiones (ETS) basado en un esquema de cap-and-trade en el sector energético. Este enfoque busca estimular la demanda de hidrógeno a nivel nacional. Como parte de esta estrategia, se desarrollará un proyecto piloto que facilitará la viabilidad de nuevas tecnologías basadas en hidrógeno, orientadas a la descarbonización de sectores con altas emisiones, abordando diversos desafíos mediante la fijación de límites a las emisiones de manera costo-efectiva. La combinación de un sistema ETS con un impuesto al carbono crea un entorno favorable para la adopción de tecnologías de descarbonización, como el hidrógeno verde, al mejorar la eficiencia en la reducción de emisiones y permitir a las empresas ajustar sus estrategias para aprovechar las nuevas oportunidades.

Se propone, además, la creación de un fondo de créditos tributarios aplicables al impuesto de primera categoría, orientado a inversiones con un alto impacto multiplicador. Este fondo incluiría proyectos relacionados con la descarbonización, como el desarrollo del hidrógeno verde. Enmarcado en la Ley de Reforma del Impuesto a la Renta, este mecanismo tiene como objetivo

incentivar a las empresas que realicen inversiones productivas centradas en nuevas tecnologías y en la descarbonización de la matriz productiva.

Relacionado con lo anterior, se propone un mecanismo que busca reducir el impuesto de primera categoría al 25% y establecer un impuesto adicional del 2% para las empresas en el régimen general de tributación. Este 2% puede ser deducido a través de inversiones que incrementen la productividad, como la adquisición de tecnología limpia. Los recursos fiscales generados se destinarán a actividades relacionadas con las estrategias de descarbonización.

Asimismo, se propone implementar un mecanismo de financiamiento respaldado por el Estado y bancos multilaterales para apoyar proyectos de hidrógeno verde en diversas etapas, tanto en su desarrollo como en la generación de demanda.

Relacionado con lo anterior, el mecanismo para acelerar la implementación de proyectos de hidrógeno verde en Chile se basa en rondas de financiamiento que ofrecen subsidios para apoyar decisiones finales de inversión y determinar los costos reales de producción. Implementado por CORFO y el Ministerio de Energía mediante acuerdos públicos-privados, este mecanismo busca fomentar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. Actualmente, Chile está en el primer ciclo de evaluación de proyectos, iniciado en 2021 y previsto para concluir en 2025, con una metodología gubernamental establecida para la evaluación de propuestas. Esta metodología consiste en (i) identificar iniciativas de proyectos que se podrían implementar de manera temprana en Chile (ii) priorizar cinco proyectos en base a estimar el capital a movilizar, tamaño del mercado y mitigación de emisiones (iii) realizar una evaluación técnica-económica y (iv) establecer el mecanismo de financiamiento.

En Perú, la Ley de Fomento de Hidrógeno Verde establece que las políticas y normativas relacionadas deben asegurar beneficios económicos y tributarios para todas las etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde, incluyendo investigación, producción, transporte y comercialización. Además, se promoverá la obtención de financiamiento internacional para estos proyectos, y el Ministerio de Producción implementará programas para apoyar la innovación y transferencia tecnológica en el uso del hidrógeno verde.

En razón a lo señalado anteriormente, a diferencia de Chile, el Perú no cuenta con regulaciones económicas específicas para poder incentivar el desarrollo de hidrógeno verde ni en la oferta ni en la demanda. No obstante, consideramos que existe algunos mecanismos económicos similares a los establecidos por el Gobierno chileno, especialmente, para fomentar la aplicación del hidrógeno verde en el sector minero.

Dentro de estos mecanismos, podemos señalar que el Perú cuenta con un marco legal establecido respecto a la implementación de las Asociaciones Público-Privadas, lo cual comprende infraestructura pública en general, servicios públicos, proyectos de investigación aplicada y proyectos de innovación tecnológica, lo que permitiría la aplicación de mecanismos como el de rondas de financiamiento implantado por el Gobierno de Chile.

4.4. Potenciales áreas de regulación sobre el hidrógeno verde que se puede replicar en el Perú

De acuerdo con lo señalado anteriormente, la minería es crucial para la economía de Chile y Perú, y es un sector clave para la aplicación del hidrógeno verde. Ambos países comparten condiciones geográficas favorables para su producción como combustible. Para fomentar la inversión y el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, es esencial crear un ecosistema atractivo que genere una demanda sólida. Basándonos en la experiencia chilena, proponemos replicar las siguientes regulaciones:

A. Aprobar una Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde o Hoja de Ruta

Ello nos permitirá establecer con mayor certeza el proceso de materialización, de acuerdo con el nivel de incertidumbre en el desarrollo tecnológico de producción, nivel de penetración en aplicaciones como combustible y competitividad en comparación con otras alternativas de descarbonización.

B. Emitir regulaciones complementarias para la ejecución de proyectos piloto

Si bien en el Perú se ha aprobado la Ley de Fomento de Hidrógeno Verde, está aún no establece un marco legal para autorizar la ejecución de proyectos piloto ni para su producción ni aplicación.

Por ello, considerando que una regulación propia podría tomar mucho tiempo de realizarlo, podemos tomar como referencia lo realizado por Chile y establecer guías de apoyo que se basen en normas internacionales, a fin de orientar la aprobación de proyectos de hidrógeno que consideren instalaciones relacionadas con la producción, acondicionamiento, transporte, distribución, almacenamiento o consumo de hidrógeno como combustible. Asimismo, para poder incentivar su producción o aplicación podemos utilizar normas ya existentes como lo referente al sector energético.

- C. Impulsar la demanda interna/ nacional de hidrógeno en sectores claves a través de un Sistema de Comercio de Emisiones así como generar un impuesto al carbono.

Esto crea un entorno favorable para la adopción de tecnologías de descarbonización, como el hidrógeno verde. Al establecer un límite máximo de emisiones, las empresas se ven incentivadas a ajustar sus estrategias para aprovechar las oportunidades que surgen. Además, gravar las emisiones de carbono encarece las fuentes de energía fósiles, lo que impulsa la transición hacia tecnologías más limpias.

- D. Respecto a los beneficios tributarios, aplicar beneficios como la amortización acelerada establecida en la Ley General de Minería.

De este modo, las compañías mineras podrán depreciar sus activos fijos, como los vehículos de transporte minero, de manera más acelerada que con la amortización lineal tradicional. Esto les permitirá obtener mayores deducciones fiscales en los primeros años de vida útil del activo, reduciendo sus obligaciones tributarias a corto plazo. Como resultado, mejorará su flujo de caja inicial, incentivando la inversión en el sector minero y facilitando una renovación más rápida de su tecnología.

E. Implementar rondas de financiamiento o subsidios, a fin de acelerar la implementación de los primeros proyectos de hidrógeno verde.

Esto permitiría al Estado asumir un papel decisivo en la creación de una demanda robusta y en la materialización de proyectos a gran escala relacionados con el hidrógeno verde. En Chile, la CORFO es la entidad responsable de impulsar y evaluar estas iniciativas. De manera similar, en Perú, la Agencia de Promoción de la Inversión Privada (PROINVERSIÓN) posee las facultades para fomentar la incorporación de inversión privada en proyectos públicos o que impacten servicios públicos a través de Asociaciones Público-Privadas (APP), tanto a partir de iniciativas públicas como privadas. Además, Perú, al igual que Chile, cuenta con un marco legal bien desarrollado para la aplicación de las APP como una modalidad de participación de la inversión privada. Mediante contratos de largo plazo, el Estado, representado por una entidad pública, y uno o más inversionistas privados comparten riesgos y recursos, desarrollando proyectos que aseguran niveles óptimos de servicio para los usuarios. La existencia de este marco facilita considerablemente la implementación de mecanismos de financiamiento para dichos proyectos.

Por ello, Perú podría adoptar la metodología utilizada en Chile para priorizar proyectos que aceleren la adopción temprana de tecnologías y la implementación de iniciativas de generación, almacenamiento, transporte, consumo y explotación de hidrógeno verde. Esta adopción temprana permitiría a Perú posicionarse como un actor clave en un mercado emergente, al tiempo que contribuiría significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en sectores estratégicos, como la minería. Siguiendo el ejemplo de Chile, Perú podría llevar a cabo convocatorias y evaluar estos proyectos para garantizar que cumplan con los objetivos establecidos, incluyendo la conversión de motores diésel a hidrógeno verde en el sector minero

5. Propuesta de proyecto de innovación tecnológica.

En este apartado, realizaremos un análisis costo-beneficio (ACB) para evaluar el proyecto de innovación tecnológica que hemos propuesto. Aunque el ACB es conocido por su flexibilidad, ya que puede adaptarse a las características específicas de cada proyecto o propuesta legislativa, en

este trabajo seguiremos los lineamientos establecidos por Ginés de Rus (2021) con el fin de asegurar un análisis más preciso.

A. Definición del objetivo del proyecto y examen de las alternativas relevantes:

El proyecto tiene como objetivo principal viabilizar la transformación de la operación convencional de los camiones mineros CAEX hacia una combustión interna dual de mezclas de 60% de hidrógeno verde y 40% de diésel. Para su financiamiento se propone replicar el mecanismo de regulación económica dado por el Gobierno de Chile de implementar rondas de financiamiento o subsidios, a fin de acelerar la implementación de los primeros proyectos de hidrógeno verde a través de Asociaciones Público – Privadas.

Dentro de las alternativas relevantes se encontraría la transformación total (100%) de los camiones CAEX, sin embargo, esta no es viable pues la tecnología no se encuentra aún disponible ni en desarrollo; por lo tanto, el riesgo tecnológico es alto.

B. Contrafactual

El contrafactual sería el de mantener el estado actual (*status quo*) que implicaría la no transformación de los camiones mineros CAEX.

C. Identificación de costes y beneficios sociales:

Costes	Beneficios
Costo de reacondicionamiento de los camiones mineros CAEX – CAPEX	Beneficio de reducción del CO ₂ Ahorro en combustible
Operación y mantenimiento – OPEX	
Gasto del uso de hidrógeno verde	

D. Medición de beneficios y costes

i. Fuentes de datos utilizados.

Los datos obtenidos respecto al uso de diésel y al valor de la operación y mantenimiento (OPEX) por kilómetro recorrido de los camiones CAEX fueron obtenidos de la base de datos de la empresa Ferreyros Cat, principal proveedor de los camiones CAEX en el Perú.

Por otra parte, se ha considerado 252 días hábiles de acuerdo al calendario 2024 , los cuales no incluyen sábado, domingo ni festivos establecidos por el Gobierno del Perú. Cabe precisar que la evaluación del proyecto se da a un horizonte de 25 años esto de acuerdo a la IEA (2019)

Los datos respecto al uso de hidrógeno verde, así como de la mitigación de CO₂ fueron obtenidos del estudio previo realizado por Buendía, M; De la Cruz, J; Gallardo, J & Huamani, M. (2022)

Se consideró el precio social del carbono (SCC) de 30 USD por tonelada de CO₂ de acuerdo a lo establecido por el Ministerio de Economía y Finanzas del Perú (2024). Asimismo, se utilizó la tasa social de descuento (WACC) de 5% también de acuerdo a lo establecido por el Ministerio de Economía y Finanzas del Perú para la evaluación de proyectos de inversión de largo plazo.

Para poder modelar el proyecto Dual 60% H₂ – 40% diésel, el set de variables se resumen a continuación:

Tabla 2: Variables uso de diésel

CAEX a base de diésel	Unidades	Valor
Tamaño de flota	#camiones	1
Consumo de diésel	lt/día/camión	3600
Consumo anual de diésel total	lt/año	907 200
Ahorro de diésel 60%	lt/año	544 320
Precio diésel	USD/lt	1,38

Tabla 3: Variable uso de hidrógeno verde (H2)

Caex a base de H2	Unidades	Valor
Tamaño de flota	#camiones	1
Precio H2	USD/kg	4,38
Consumo total de H2	kg/día/camión	1 000
Consumo anual total H2	kg/año/camión	252 000

Tabla 4: Variable OPEX

OPEX	Unidades	Valor
Tamaño de flota	#camiones	1
Recorrido	km/día	150
Valor km	USD/km	0,40
Total	USD/km	15 120,00

Tabla 5: Variable mitigación de CO₂

Mitigaciones CO ₂ - Diésel	Unidades	Valor
Tamaño de flota	#camiones	1
Emisiones	kg/lt	3,60
Emisiones anuales total	kg/lt/año	3 265 920
Beneficio proyecto 60%	kg/lt/año	1 959 552
Toneladas CO ₂ proyecto	Ton	1 959,55
SCC	USD/ton	30,00

ii. Análisis Costo Beneficio

En primer lugar, en la *Tabla 6* se presenta el flujo de caja proyectado en caso de llevar a cabo la implementación del proyecto en el sector privado. En este escenario, los ingresos contemplan únicamente el ahorro generado por la reducción en el consumo de diésel. La rentabilidad del proyecto se determinará mediante el cálculo de la diferencia entre los ingresos y los gastos asociados, descontados a su valor presente, proporcionando así una visión clara del rendimiento financiero esperado.

Tabla 6: Flujo de caja privado caso CAEX Dual 60% H₂ / 40% Diésel

Privado					
Año		0	1	10	25
Ingresos	Ahorro en Diésel	\$ 0,00	\$ 715 392,00	\$ 51 324,17	\$ 0,10
Gastos	Capex	\$ 600 000,00			
	Opex		\$ 15 120,00	\$ 18 069,80	\$ 24 319,57
	Gasto H2		\$ 630 720,00	\$ 45 249,57	\$ 0,18

En la *Tabla 7* se detalla el análisis de los beneficios sociales y los costos asociados a la implementación del proyecto con intervención estatal. Este análisis evalúa los beneficios sociales, que representan las mejoras generales para la sociedad derivadas del proyecto, más allá de las consideraciones financieras directas. Entre los beneficios sociales destacados se incluye la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), como el CO₂. La rentabilidad del proyecto se evaluará utilizando el Valor Actual Neto Social (VAN), que permitirá medir el impacto neto del proyecto desde una perspectiva social.

Tabla 7: Beneficios sociales – Gastos caso CAEX Dual 60% H₂/ 40% Diésel

Social					
Año		0	1	10	25
Beneficios	Beneficio C02	\$ 0,00	\$ 55 987,20	\$ 34 371,28	\$ 16 533,18
	Ahorro de diésel	\$ 0,00	\$ 715 392,00	\$ 51 324,17	\$ 0,10
Gastos	Capex	\$ 600 000,00			
	Opex		\$ 15 120,00	\$ 18 069,80	\$ 24 319,57
	Gastos h2		\$ 630 720,00	\$ 45 249,57	\$ 0,18

En la *Tabla 8* podemos advertir los resultados obtenidos respecto a los indicadores de rentabilidad del proyecto, los cuales son los siguientes:

Tabla 8: Rentabilidad de iniciativa CAEX Dual 60% H₂ / 40% Diésel

Resultados	VAN US\$	VAN social US\$	Mitigación de CO2 (Ton)
Largo plazo	-665 662,21	126 084,337	1 959,55

En el análisis realizado, se observa que, bajo los supuestos del presente estudio, el proyecto Dual 60/40 no resulta rentable en un escenario que contemple únicamente inversión privada, dado que el Valor Actual Neto (VAN) es negativo. No obstante, al considerar el VAN social, el resultado se vuelve positivo, gracias a la mitigación de 1,959.55 toneladas de emisiones de CO₂, las cuales se valoran en función del costo social del carbono (SCC) estimado en US\$ 30.00 por tonelada de CO₂. Este resultado sugiere que la intervención estatal, a través de la concesión de subsidios, podría ser justificada para compensar la falta de viabilidad económica desde la perspectiva privada y promover el proyecto en beneficio del interés público

E. Evaluación de posibles escenarios.

En el ACB, el SCC, se utiliza para estimar en términos monetarios el impacto de una política o proyecto sobre el cambio climático, considerando las variaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero (Rennert & Cora, 2022) Es importante destacar que el valor del SCC puede variar considerablemente en función del modelo utilizado, dado que estas variaciones se basan en investigaciones provenientes de campos diversos como la ciencia climática, la demografía y la economía. Además, el SCC incorpora información inherentemente incierta, como la proyección de daños futuros en términos de valores presentes.

Un factor crucial que afecta el valor del SCC es la tasa de descuento. Esta tasa determina el peso asignado a los impactos futuros en comparación con los impactos presentes. En general, los costos y beneficios futuros suelen tener menos importancia en el análisis que los actuales, y la tasa de descuento refleja esta diferencia en la importancia relativa. Una alta tasa de descuento implica que los efectos futuros se consideran significativamente menos relevantes en comparación con los efectos actuales. En contraste, una baja tasa de descuento sugiere que los efectos futuros tienen una importancia relativamente mayor y se consideran casi tan significativos como los efectos presentes. Por tanto, la elección de la tasa de descuento es una variable crítica en la valoración del SCC y, por ende, en el análisis de costo-beneficio.

Por ello, en la siguiente *Tabla 9* podemos advertir los efectos de las diferentes tasas de descuento en las estimaciones del SCC, considerando las mismas variables descritas en el punto D para el proyecto Dual 60/40.

Tabla 9: Análisis de escenarios para iniciativa CAEX Dual 60% Hidrógeno verde/ 40% Diésel

Social Carbon Cost	Tasa de descuento	VAN USD
50 USD/ton	3%	1 062 195,129
75 USD/ton	2,5%	3 700 753,971

En el cuadro anterior, se observa claramente el Valor Actual Neto (VAN) calculado utilizando dos tasas de descuento diferentes (3% y 2,5%), lo que refleja la variación en el valor asignado al Costo Social del Carbono (SCC). Como se ha destacado, la tasa de descuento juega un papel crucial al determinar el peso que se le da a los impactos futuros en comparación con los impactos presentes. En este contexto, el trabajo de Nordhaus (2017) subraya la importancia de emplear una tasa de descuento relativamente baja para capturar adecuadamente los efectos intergeneracionales del cambio climático. Una tasa de descuento baja permite una valoración más precisa de los daños futuros y evita subestimar los beneficios derivados de la reducción de emisiones.

Aunque la tasa de descuento y el valor asignado al SCC pueden variar en función de la política climática de cada país, consideramos que optar por una tasa de descuento más baja y, por ende, un SCC más alto, puede reflejar de manera más efectiva los efectos futuros de proyectos innovadores, como el CAEX Dual 60/40. Esta aproximación no sólo proporciona una evaluación más equitativa del impacto ambiental a largo plazo, sino que también optimiza la toma de decisiones en relación con la inversión en tecnologías que aborden el cambio climático.

F. Interpretación de resultado y criterios de decisión

El proyecto CAEX Dual 60% hidrógeno verde y 40% diésel resulta económicamente viable al considerar los beneficios sociales asociados, sugiriendo que la intervención estatal mediante subsidios podría ser necesaria para promover el proyecto. Se estima que, si la conversión de motores es exitosa, la demanda anual de hidrógeno verde alcanzaría aproximadamente 166,320,000 kg.

Según los reportes de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía del Perú, en 2023 operan alrededor de 1,100 camiones mineros de alto tonelaje en el país. Este número podría incrementarse si se extiende la conversión a camiones mineros medianos y pequeños. Esta demanda significativa facilitaría la implementación de una cadena de suministro local para el hidrógeno, que incluiría estaciones de carga, sistemas de transporte y una o varias plantas de producción cercanas a las zonas mineras.

En la implementación del proyecto, se deben evaluar los siguientes riesgos:

1. Riesgo Político: Bajo, dado el apoyo potencial que la Ley de Fomento del Hidrógeno Verde podría ofrecer a proyectos de hidrógeno verde en futuras políticas gubernamentales.
2. Riesgo Regulatorio: Alto, debido a la necesidad de cumplir con estrictos estándares de seguridad y desarrollar normativa y protocolos específicos, además de someterse a una evaluación ambiental rigurosa.
3. Riesgo Tecnológico: Medio, ya que la tecnología para el retrofit está en fase de pruebas en países como Chile. Si es exitosa, podría ser adoptada para el proyecto.

El proyecto está estrechamente relacionado con la cadena de suministro de hidrógeno. Empresas de energía, como Engie Energía Perú, podrían interesarse en proveer hidrógeno y desarrollar proyectos de generación cerca de las principales minas de cobre, reduciendo así los costos de transporte. Se prevé establecer contratos de suministro para asegurar una demanda sostenible.

Para el financiamiento, se sugiere un enfoque mixto similar al del Gobierno de Chile, mediante Asociaciones Público-Privadas (APP). Como inversionistas potenciales podrían incluir fondos filantrópicos especializados en tecnología limpia, como el Clean Technology Fund, que financia proyectos en América Latina. Con un financiamiento inicial asegurado, se podrían explorar otros fondos, como subsidios, para apoyar el proyecto.

6. Conclusiones

En el Perú, la minería representa el 9% del consumo energético nacional, y el sector del cobre, que absorbe el 90% de esa energía, ofrece un gran potencial para reducir emisiones de GEI. El diésel, que constituye el 94% del consumo energético en la minería del cobre, es una fuente significativa de emisiones, y su reducción puede tener un impacto ambiental positivo considerable.

Para lograr una transición energética efectiva sin comprometer el crecimiento del PIB, es fundamental adoptar políticas de eficiencia energética y reemplazar los combustibles fósiles con electricidad. En este contexto, el hidrógeno verde se presenta como una opción viable. El análisis comparativo indica que la minería es esencial tanto en Chile como en Perú y es clave para la aplicación del hidrógeno verde. Para atraer inversiones y desarrollar proyectos de hidrógeno verde, es crucial crear un entorno favorable que genere una demanda sólida. Implementar subsidios y replicar regulaciones económicas como las de Chile, mediante Asociaciones Público-Privadas (APP), puede acelerar el despliegue de estas tecnologías.

El reacondicionamiento de camiones mineros para funcionar con hidrógeno verde, siguiendo el ejemplo de Chile, es una estrategia prometedora para reducir el uso de diésel. El análisis costo-beneficio de este proyecto muestra su viabilidad económica al considerar los beneficios sociales, como la reducción de CO₂. Por lo tanto, se recomienda aplicar un financiamiento mixto a través de APP para promover este proyecto. Si tiene éxito, podría reducir hasta 2,939,328 toneladas de CO₂ anuales y generar una demanda de aproximadamente 166,320,000 kg de hidrógeno verde al año.

7. Bibliografía

- Antoranz, J. L. (2021). "El hidrógeno verde en la Unión Europea: una vía necesaria para la transición energética". *Revista Española de Desarrollo y Cooperación* (48), Pp. 13-33.
- Comisión Chilena del Cobre [Cochilco]. (2022). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2021*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Mercados.aspx>
- De Rus, G. (2021). *Análisis Coste-Beneficio: Evaluación de políticas públicas y proyectos de inversión*. Pp. 8-14. ISBN: 978-84-122443-3-5
- Engie Impact (2021). *Potencial del hidrógeno verde en el Perú: impulsando la transición energética del Perú. Estudio solicitado por la Asociación Peruana del Hidrógeno - H2*. Obtenido de https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf
- Escribano, G., Lázaro, L., & Urbasos, I. (2022). *El desarrollo del hidrógeno: estrategias y políticas en Europa y España*. *International Review of Economic Policy - Revista Internacional de Política Económica*, 4 (2), Pp. 84-97. <https://doi.org/10.7203/IREP.4.2.25807>
- Francovich, G. *Perú aprueba ley que promueve hidrógeno verde como combustible*. Energía Estratégica. Consultado el 25 de marzo de 2024. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/es-oficial-peru-aprobo-la-ley-que-promueve-el-hidrogeno-verde-como-combustible/>
- Gobierno de Chile. *Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030*. Consultado en abril de 2024. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf
- H2 Chile Asociación chilena de hidrógeno (2024). *Regulación y políticas públicas hidrógeno verde*. Obtenido de <https://h2chile.cl/regulacion-y-politicas-publicas/>
- H2Lac. (s.f.). *Plataforma para el desarrollo del hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe*. Obtenido de <https://h2lac.org/atlas-h2lac/peru/#:~:text=La%20matriz%20energética%20del%20Perú,27%20termoeléctrica%20y%207%20solar.>
- International Energy Agency [IEA]. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Paris. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, Licence: CC BY 4.0
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2019). *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective*. Abu Dhabi. Obtenido de [/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf](https://media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf) ISBN: 978-92-9260-151-5

- Jesús Claros, R. (2023). *Escenarios de integración de sistemas renovables de generación eléctrica en el sector minero del Perú al 2050*. Revista Minería N° 555, Pp. 24.
- Ministerio de Energía y Minas [MINEM] (2024) Ley N° 31992. *Ley de fomento del hidrógeno verde*.
- MINEM (2023) *Balance Nacional de Energía 2022*.
- Ministerio de Economía y Finanzas Perú (2024). *Parámetros de Evaluación Social*. Obtenido de Anexo N° 11: Parámetros de Evaluación social de la Directiva General del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones.
- Ministerio de Energía Gobierno de Chile (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*.
- MINEM (2024). *Anuario Minero 2023*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5804716-anuario-minero-2023>
- MINEM (2024). *Blog de noticias Hoja de Ruta de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/915164-minem-elabora-proyecto-de-hoja-de-ruta-para-la-promocion-del-hidrogeno-verde-en-el-peru>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2019). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2019*. Obtenido de <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2019/>
- Nordhaus, W. D. (2017). *Revisiting the social cost of carbon*. Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS, 114(7). Pp. 1518–1523. Obtenido de: <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2024). *Precio de referencia de combustibles*. Obtenido de <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/precios-de-referencia-banda-de-precios/precios-de-referencia-de-combustibles>
- Rennert, K., & Cora, K. (2022). *Social Costo of Carbon 101: A review of the social cost of carbon, from a basic definition to the history of its use in policy analysis*. Resources for the future. Obtenido de: <https://www.rff.org/publications/explainers/social-cost-carbon-101/>
- Santibáñez, A. (2023). *Trabajo Final de Máster Producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica para aplicaciones energéticas en la minería chilena*. Máster en Energías Renovables. Universidad de Barcelona
- Yergin, D. (2020). *The New Map*. Energy, Climate, and the Clash of Nations, Penguin.

ANEXOS

I. Análisis ámbito privado

Privado							
Año		0	1	2	3	10	25
Ingresos	Ahorro en Diésel	0,00	715392,00	648881,63	560528,35	51324,17	0,10
Gastos	Capex	600000,00					
	Opex		15120,00	15422,40	15730,85	18069,80	24319,57
	Gasto H2		630720,00	572081,63	494185,62	45249,57	0,09
	Flujo de caja neto	-600000,00	69552,00	61377,60	50611,88	-11995,20	-24319,56
	Factor de descuento		1,05	1,10	1,16	1,63	3,39

II. Análisis ámbito social

Social							
Año		0	1	2	3	10	25
Ingresos	Beneficio C02	0,00	55987,20	50782,04	48363,85	34371,28	16533,18
	Ahorro de diésel	0,00	715392,00	648881,63	560528,35	51324,17	0,10
Gastos	Capex	600000					
	Opex		15120,00	15422,4	15730,85	18069,80	24319,57
	Gastos h2		630720,00	572081,63	494185,62	45249,57	0,09

III. Escenario SCC 50 USD/ton con T.D. 3%

Social							
Año		0	1	2	3	10	25
Ingresos	Beneficio C02	0,00	95123,88	89663,38	87051,83	70781,10	45431,70
	Ahorro de diésel	0,00	729283,11	661481,28	571412,40	52320,76	0,10
Gastos	Capex	600000					
	Opex		15120,00	15422,4	15730,85	18069,80	24319,57
	Gastos h2		630720,00	572081,63	494185,62	45249,57	0,09

IV. Escenario SCC 70 USD/ton con T.D. 2,5%

Social							
Año		0	1	2	3	10	25
Ingresos	Beneficio C02	0,00	143381,85	136472,91	133144,30	112009,67	77338,82
	Ahorro de diésel	0,00	732840,59	697528,22	647724,29	193161,59	245,74
Gastos	Capex	600000					
	Opex		15120,00	15422,4	15730,85	18069,80	24319,57
	Gastos h2		630720,00	572081,63	494185,62	45249,57	0,09