

## EL HIDROGENO EN LA INDUSTRIA MINERA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE

Figueiredo, Robson Lage <sup>a</sup>, Carlos Enrique Arroyo Ortiz<sup>ab</sup>, José Margarida da Silva<sup>ab</sup>. Adilson Curi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa de pos graduación en Ingeniería de Minas, Escola de Minas  
Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. ZIP: 35400000

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería de Minas, Escola de Minas  
Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. ZIP: 35400000

[robsonlage@ufop.edu.br](mailto:robsonlage@ufop.edu.br)

[carroyo@ufop.edu.br](mailto:carroyo@ufop.edu.br)

[jms@ufop.edu.br](mailto:jms@ufop.edu.br)

[curi@ufop.edu.br](mailto:curi@ufop.edu.br)

### RESUMEN

En la industria minera, donde la operación de equipos consume una gran cantidad de energía, se utilizan ampliamente equipos impulsados por diésel debido a su versatilidad, capacidad de carga y adaptabilidad a diversas condiciones de terreno. Sin embargo, estos equipos tienen un alto consumo de diésel y emiten gases de efecto invernadero, especialmente monóxido de carbono. Este trabajo explora el potencial del hidrógeno como una alternativa más ecológica en los motores diésel utilizados en la minería, con el objetivo de reducir el impacto ambiental asociado a los combustibles derivados del petróleo. Se discute el consumo de energía de camiones diésel en la minería, así como las emisiones de gases contaminantes. Además, se abordan las tecnologías de producción de hidrógeno, sus ventajas en cantidades controladas y los desafíos en producción, almacenamiento y costos. Se destaca el "hidrógeno verde", producido sin emisiones de carbono, como una prometedora alternativa para descarbonizar las operaciones mineras, ya sean a cielo abierto o subterráneas.

**Palabras Clave:** Hidrógeno verde en minería. Energías renovables. Descarbonización en minería.

### ABSTRACT

In the mining industry, where the operation of equipment consumes a large amount of energy, diesel-powered equipment is widely used because of its versatility, load capacity and adaptability to diverse terrain conditions. However, this equipment has a high diesel consumption and emits greenhouse gases, especially carbon monoxide. This paper explores the potential of hydrogen as a greener alternative to diesel engines used in mining, with the aim of reducing the environmental impact associated with petroleum-based fuels. The energy consumption of diesel trucks in mining is discussed, as well as the emissions of polluting gases. In addition, hydrogen production technologies, its advantages in controlled quantities and the challenges in production, storage and costs are addressed. Green hydrogen", produced without carbon emissions, is highlighted as a promising alternative to decarbonize mining operations, whether open pit or subway.

**Keywords:** Green hydrogen in mining. Renewable energies. Decarbonization in mining.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria minera está presente en todo el mundo, pero solo algunos países aprovechan adecuadamente estas potencialidades y riquezas. Estos países se han convertido en líderes en métodos y tecnologías de explotación de recursos minerales. En Brasil, el sector minero ocupa una posición destacada a nivel mundial, ya que es uno de los principales exportadores de mineral de hierro, representando aproximadamente el 19% de la producción mundial.

En la extracción de mineral de hierro a cielo abierto, se utilizan varios equipos impulsados por diésel, como camiones de transporte (Giuliano et al., 2021). Estos camiones presentan desventajas importantes, como alto consumo de combustible, altos costos de mantenimiento y emisiones significativas de dióxido de carbono. (Reitz et al., 2020).

El consumo de combustible es la principal contribución a los costos de transporte en operaciones mineras, representando hasta el 32% de los costos operativos totales en las minas según el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM). Además, las emisiones de gases contaminantes de los motores diésel impactan negativamente en el medio ambiente.

Para abordar estos desafíos, se busca la utilización de alternativas energéticas renovables, como la Economía del Hidrógeno, que se refiere a la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables para su uso en celdas de combustible o motores de combustión (Golbasi & Kina, 2022). El hidrógeno se considera una opción prometedora como aditivo al diésel, ya que mejora la eficiencia y reduce las emisiones de carbono (Gunawan & Monaghan, 2022).

Este artículo se enfoca en la discusión sobre el consumo de energía en la industria minera y la eficiencia energética en el transporte de materiales extraídos. También presenta las tecnologías de producción de hidrógeno como una alternativa ecológica que puede utilizarse como complemento en motores diésel,

mejorando la eficiencia y reduciendo las emisiones. Se exploran los beneficios del hidrógeno en el proceso de descarbonización en la minería, destacando el hidrógeno verde como una alternativa altamente prometedora debido a su falta de emisiones de carbono.

## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1 Consumo Energético en la Industria Minera

La industria minera es un sector que consume cantidades significativas de energía en sus diversas actividades, incluyendo exploración, extracción, transporte y procesamiento. La comprensión y cuantificación de este consumo energético son fundamentales para gestionar eficientemente las operaciones mineras.

En Brasil, la industria minera es un gran consumidor de diésel, como se muestra en la Figura 1, que presenta el consumo de diésel en el sector minero brasileño de 2010 a 2021. Se observa un aumento constante en la demanda de diésel a lo largo de este período, lo que impacta en los costos operativos y en las emisiones de gases de efecto invernadero.

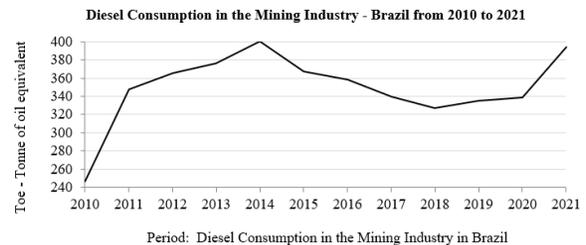


Fig. 1.. Consumo de Diésel (CEIC, 2022).

Fig. 1.. Consumo de Diésel (CEIC, 2022).

El costo del transporte en minas a cielo abierto de tamaño mediano o grande puede representar aproximadamente el 32% de los costos operativos totales. Esto se debe al uso intensivo de equipos pesados, como camiones y excavadoras, que consumen grandes cantidades de combustible debido al manejo de volúmenes significativos de minerales y material estéril.

Los precios del diésel en Brasil están vinculados a la política de Precio de Paridad de Importación (PPI), que refleja el mercado internacional. La evolución de los precios del diésel desde 2013 hasta 2022, tuvo aumentos continuos, interrupciones debido a eventos como la pandemia de COVID-19 y factores geopolíticos. ( Hunt e outros, 2022) .

A pesar de los avances tecnológicos en los motores diésel para cumplir con regulaciones de emisiones más estrictas, las emisiones de dióxido de carbono (CO2) y partículas siguen siendo altas (Mahmood et al., 2020). La Figura 2 ilustra las emisiones de CO2 derivadas de la quema de combustibles fósiles en Brasil, con un aumento hasta 2014, seguido de una disminución hasta 2020 debido a compromisos de reducción de emisiones establecidos en el Acuerdo de París en 2015. (Dimitriou et al., 2019).

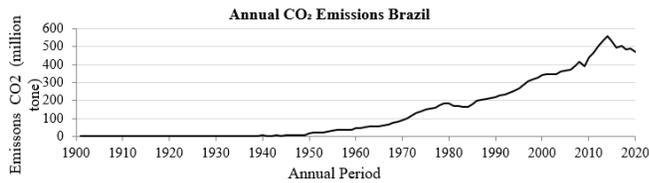


Fig. 2. CO<sub>2</sub> Emissions (Adapted Our World in Data, 2021).

Fig. 2. CO<sub>2</sub> Emissions (Adapted Our World in Data, 2021).

En resumen, el consumo de diésel y las emisiones de gases de efecto invernadero son desafíos significativos para la industria minera en Brasil, lo que motiva la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes desde el punto de vista energético. (Zhou et al., 2021)

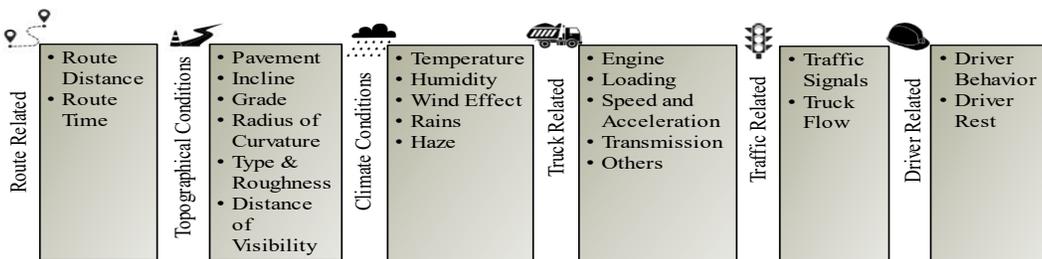


Fig. 3. Factores que afectan el consumo de combustible (Autoría propia).

## 2.2 Factores que afectan el consumo de combustible y las emisiones.

El comportamiento del consumo de combustible y las emisiones de carbono resultantes de un sistema de despacho pueden ser influenciados por varios factores. Según Runge (1998), el consumo de combustible de un camión fuera de carretera se puede estimar mediante la fórmula empírica, que se expresa en la Ec. 1:

$$F_C = P \cdot 0.3 \cdot L_F$$

Dónde:

$F_C$  es el consumo de combustible [L/h],

$P$  es la demanda de potencia [kW],

0.3 es el factor de conversión unitario [L/kW/h], y

" $L_F$ " es el factor de carga proporcionado por el fabricante.

El cálculo para determinar el consumo de combustible en las operaciones en una mina se rige por la Ecuación 1, que proporciona una aproximación, ya que varios factores pueden influir en el consumo real. Entre estos factores se incluyen las condiciones operativas del camión, el tipo de combustible y la eficiencia de los motores.

Para comprender el consumo de combustible en las operaciones, se deben considerar factores adicionales más allá de las características mecánicas de los camiones. Estos factores incluyen la ruta de transporte, las condiciones topográficas, el clima, el tipo de camión y el comportamiento de los conductores, como se ilustra en la Figura 3. (Golbasi et al., 2022).

Estos factores pueden tener un impacto significativo en el consumo y las emisiones de gases. Dependiendo de la capacidad de producción, el diseño de la mina y la manipulación de materiales, el consumo de diésel y las emisiones de dióxido de carbono y partículas pueden aumentar. Equipos pesados utilizados en las operaciones, como camiones, excavadoras y bulldozers, consumen grandes cantidades de energía y emiten gases de efecto estufa.

Por ejemplo, un camión minero aproximadamente consume 14.89 millones de litros de diésel al año y emite aproximadamente 47.8 millones de kg de gases de efecto estufa. (Gholami et al., 2022). La relación entre el movimiento de materiales, consumo de diésel y emisiones de gases. Pueden ser cuantificados por intensidad. Cuanto mayor sea esta intensidad, mayor será el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto estufa. La Figura 4 muestra la relación entre el consumo de diésel en litros por tonelada y el movimiento de materiales en una mina de hierro a cielo abierto en el norte de Brasil.

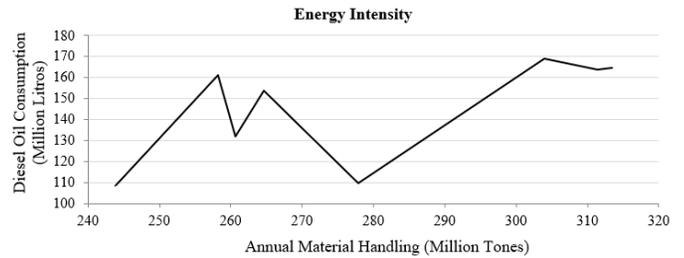


Fig. 4. Energy Intensity (Adapted ANM, 2022).

Fig. 4. Energy Intensity (Adapted ANM, 2022).

### 2.3 Métodos de producción de hidrógeno

En la literatura, la generación de hidrógeno se clasifica en diferentes colores según las fuentes primarias de energía utilizadas en el proceso. Estos colores incluyen verde, gris, azul, marrón, amarillo, morado y turquesa. Los principales métodos de producción de hidrógeno se resumen en la Figura 5: (Ajanovic et al., 2022)

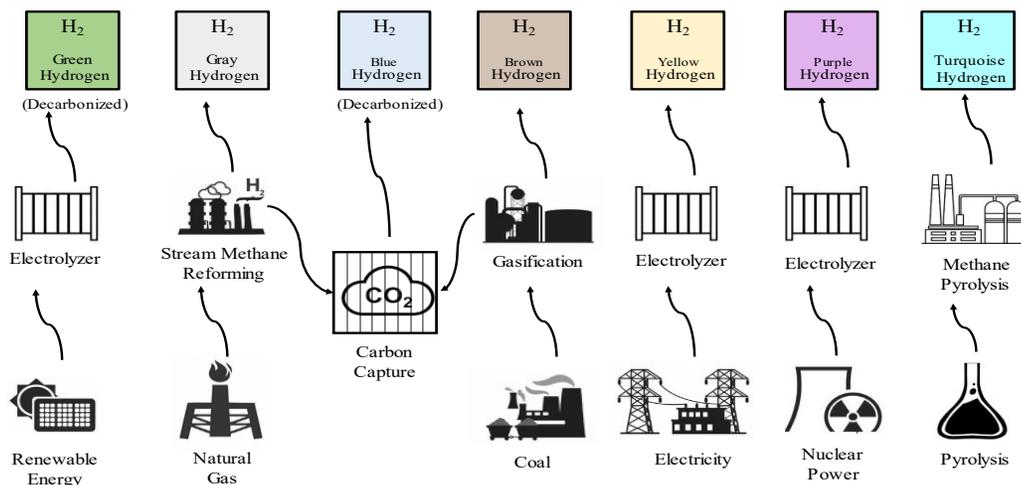
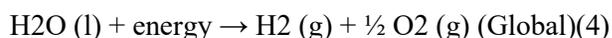
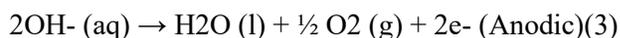
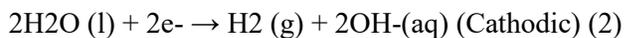


Fig. 5. Métodos de Producción de Hidrógeno (Autoría propia).

- Hidrógeno Verde: Se produce mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovable, lo que lo convierte en una fuente de energía limpia y renovable sin emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Hidrógeno Gris: Se obtiene mediante la reforma de vapor de metano sin captura de CO<sub>2</sub>.
- Hidrógeno Azul: Producido a partir de fuentes fósiles, pero con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el proceso (SMR).

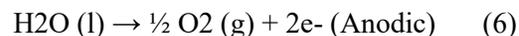
- Hidrógeno Marrón: Se obtiene mediante la gasificación del carbón.
- Hidrógeno Amarillo: Generado mediante la electrólisis del agua utilizando electricidad de diversas fuentes de energía.
- Hidrógeno Morado: Producido mediante energía nuclear.
- Hidrógeno Turquesa: Se obtiene mediante la pirólisis del metano.

El hidrógeno verde se produce a través de la electrólisis del agua utilizando electricidad de fuentes de energía renovable, como la energía eólica, solar o hidroeléctrica. Este proceso se considera una fuente de *Figueiredo Robson, Carlos Arroyo, José Margarida da Silva, Adilson Curi* de efecto invernadero ni contaminantes. Las principales tecnologías de electrólisis incluyen la alcalina (ALK), la membrana de intercambio de protones (PEM) y la celda electrolítica de óxido sólido (SOEC). (Khatib et al., 2019), (Subramanian & Thangavel, 2020)

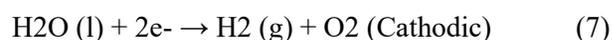


La membrana de intercambio de protones (PEM) es utilizada en electrolizadores debido a su capacidad para mantener el sistema compacto, soportar alta presión, tener alta densidad de potencia, operar a bajas temperaturas y permitir una fácil escalabilidad (Khatib et al., 2019). Esta membrana, que generalmente está hecha de materiales altamente porosos como Nafion o Fumapem, es porosa, lo que facilita el flujo de corriente y el transporte de agua y gas. En los electrolizadores, la membrana cubre los electrodos y actúa como un conductor de protones, lo que reduce el cruce de gases y evita cortocircuitos (Santos et al., 2021).

Cuando se aplica un potencial eléctrico, se desencadenan las reacciones en el cátodo y el ánodo, como se describe en las ecuaciones 5 y 6.



Las celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC) constan de un electrolito denso conductor de iones y dos electrodos porosos. Cuando se aplica un potencial eléctrico, las moléculas de agua se disocian para formar gas de hidrógeno. El hidrógeno se difunde hacia la superficie donde se recoge en el cátodo. Los iones de oxígeno son transportados a través del electrolito hacia el ánodo, donde se recogen. Las reacciones químicas en el SOEC se pueden expresar mediante las ecuaciones 7 y 8 (Zhang et al., 2022)



El hidrógeno se categoriza en la literatura en varios colores según su fuente primaria de energía y el proceso de producción. Los colores incluyen verde, gris, azul, marrón, amarillo, morado y turquesa. Cada color representa una forma diferente de producir hidrógeno y tiene implicaciones significativas en términos de emisiones de carbono y sostenibilidad. El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua con energía renovable y es considerado una fuente de energía limpia y renovable. El hidrógeno gris proviene de combustibles fósiles sin captura de carbono (Singh et al., 2022), mientras que el azul se produce a partir de fuentes fósiles con captura y almacenamiento de carbono (AlHumaidan, 2023). El amarillo se genera mediante electrólisis con electricidad de la red eléctrica, que a menudo proviene de combustibles fósiles (Noussan et al., 2021). El hidrógeno morado utiliza energía nuclear para su producción y es una tecnología experimental (A. Ajanovic et al., 2022). Finalmente, el hidrógeno turquesa se obtiene mediante la pirólisis del metano. Estas diferencias en la producción de hidrógeno tienen un impacto significativo en las emisiones de carbono y la sostenibilidad de la fuente de energía utilizada

## 2.4 Hidrógeno como combustible

El hidrógeno es un combustible versátil con diversas aplicaciones en transporte, generación de energía e industria. Al quemarse o combinarse con

oxígeno en una célula de combustible, produce energía y emite solo vapor de agua, lo que lo convierte en una fuente de energía limpia y renovable. Aunque presenta desafíos en su producción, almacenamiento, transporte y suministro, el hidrógeno puede utilizarse como aditivo en combustibles fósiles en cantidades controladas para mejorar la eficiencia de la combustión. (Kenanoğlu et al., 2020).

El hidrógeno se considera un complemento en motores diésel de encendido por compresión debido a sus propiedades únicas, como su amplio rango de inflamabilidad y alta velocidad de ignición en comparación con el diésel. Esto permite que los motores funcionen con mezclas más delgadas, reduciendo la inyección de diésel. Aunque el hidrógeno tiene una alta energía específica, su densidad volumétrica es menor. Sin embargo, su combustión produce principalmente agua, sin emisiones de carbono.

La investigación ha demostrado que la adición de pequeñas cantidades de hidrógeno a motores diésel puede mejorar la eficiencia de la combustión, reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. En resumen, el hidrógeno tiene el potencial de ser un combustible limpio y eficiente en motores diésel, contribuyendo a la reducción de emisiones y al mejoramiento del rendimiento en diversas aplicaciones. (Bakar et al., 2022).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Perspectivas y desafíos para la producción de hidrógeno

El artículo examina los métodos de producción de hidrógeno, destacando sus diversos impactos ambientales. Muestra que el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, como el gas natural, emite CO<sub>2</sub> como subproducto, mientras que el hidrógeno generado a partir del carbón libera grandes cantidades de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Por otro lado, el hidrógeno "verde", producido mediante electrólisis con energía renovable, se considera una fuente de energía limpia y libre de emisiones de carbono.

Los costos de generación de hidrógeno varían según el método utilizado. La Figura 6 muestra una estimación de los costos para las tecnologías de producción de hidrógeno. Los hidrógenos "Gris" y "Marrón" tienen costos más bajos ya que son métodos principales a gran escala. El hidrógeno "Azul" es más costoso debido a los gastos de captura y almacenamiento de carbono, mientras que el "Verde" tiene un costo ligeramente mayor debido al precio de los electrolizadores.

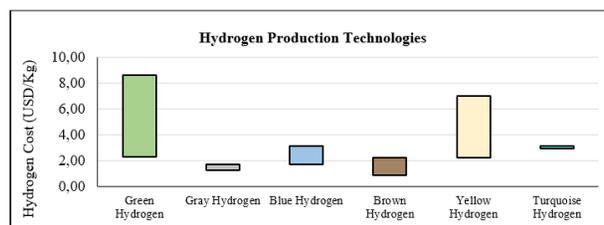


Fig. 6. Hydrogen production technologies (Own authorship).

El almacenamiento de hidrógeno es un desafío debido a su baja densidad volumétrica, lo que requiere almacenamiento a alta presión o en estado líquido, que puede ser costoso y energéticamente intensivo. Sin embargo, se están desarrollando tecnologías para abordar estos desafíos.

La integración de la producción de hidrógeno en la red eléctrica implica la alimentación de la producción de hidrógeno con electricidad de fuentes renovables, como energía eólica o solar, lo que puede ayudar a reducir las emisiones de carbono.

La infraestructura para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno aún no está completamente desarrollada y representa un desafío importante que requiere inversiones significativas. Estos factores deben considerarse al evaluar el potencial del hidrógeno como fuente de energía limpia y renovable.

#### 3.2 Adición controlada de hidrógeno a motores diésel

La adición controlada de hidrógeno a motores diésel, también conocida como combustión asistida por hidrógeno, es una tecnología que implica agregar pequeñas cantidades de hidrógeno a la mezcla de aire y

combustible en un motor diésel. La mezcla de hidrógeno y aire puede encenderse fácilmente en motores de encendido por compresión debido a que la energía mínima de encendido es inferior a la del diésel. Los principales beneficios de agregar hidrógeno a la combustión asistida son:

- **Combustión:** la adición asistida de hidrógeno a un motor diésel reduce la heterogeneidad de la pulverización de combustible dentro de la cámara de combustión debido a su alta difusividad, lo que permite que la mezcla sea más homogénea, y el subproducto de su combustión completa es agua, libre de carbono.
- **Emisiones:** el enriquecimiento con hidrógeno reduce significativamente las emisiones contaminantes de los motores diésel, incluyendo dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas.
- **Eficiencia:** mejora la eficiencia térmica, la potencia efectiva, la presión media efectiva y el consumo específico de energía, dependiendo de las condiciones de operación del motor cuando se agrega hidrógeno.
- **Rendimiento:** la combustión asistida por hidrógeno también mejora el rendimiento de los motores diésel, aumentando la potencia, el par motor y reduciendo el ruido del motor.
- **Adaptabilidad:** en la configuración de adición asistida de hidrógeno en motores convencionales, no se requieren cambios importantes, lo que lo convierte en un candidato viable para convertirlo en un motor de combustible dual sin grandes costos. El hidrógeno se introduce como combustible adicional a través del colector de admisión de aire o se inyecta directamente en los cilindros del motor.
- **Flexibilidad:** el hidrógeno se puede producir a partir de diversas fuentes, incluidas fuentes renovables como la energía eólica y solar, lo que lo convierte en una opción de combustible flexible y potencialmente sostenible.

Por otro lado, presenta algunas desventajas principales:

- **Costo:** el costo de producción de hidrógeno es relativamente alto.
- **Seguridad:** el hidrógeno es altamente inflamable y requiere un manejo y almacenamiento seguros.
- **Escalabilidad:** la tecnología de combustión asistida por hidrógeno todavía es relativamente nueva y su capacidad de adaptación es limitada para motores más grandes o aplicaciones industriales.
- **Disponibilidad:** la infraestructura para la producción y suministro de hidrógeno aún no está completamente desarrollada, lo que podría limitar su disponibilidad como opción de combustible.

En general, la adición controlada de hidrógeno a motores diésel tiene el potencial de proporcionar una serie de beneficios en términos de eficiencia, reducción de emisiones y rendimiento. Sin embargo, el costo, las preocupaciones de seguridad, la escalabilidad y la disponibilidad del hidrógeno como fuente de combustible son factores que deben tenerse en cuenta antes de adoptar esta tecnología.

### 3.3 Descarbonización en la minería

En el camino hacia una futura energía limpia, las empresas mineras se enfrentan al desafío de descarbonizar sus operaciones para cumplir con regulaciones ambientales más estrictas y acuerdos internacionales de reducción de emisiones. La "Economía del Hidrógeno" emerge como una solución prometedora al utilizar el hidrógeno en lugar de combustibles fósiles para reducir las emisiones de carbono. Esto implica la transición hacia fuentes de energía renovable y la sustitución de combustibles derivados del petróleo.

La minería debe transformar su matriz energética, adoptando electricidad limpia y energías renovables para lograr la neutralidad de carbono. Esto implica una serie de pasos, incluyendo la inversión en tecnologías limpias, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la mejora de la

sostenibilidad y el cumplimiento de regulaciones ambientales.

La economía del hidrógeno tiene el potencial de cambiar la forma en que la industria minera utiliza la energía, reduciendo significativamente las emisiones de carbono al emplear hidrógeno verde producido a partir de fuentes renovables y sin emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque podría ayudar a la minería a alcanzar sus objetivos de descarbonización y contribuir a un futuro más sostenible.

#### 4. CONCLUSIONES

La minería es una de las industrias más intensivas y sus operaciones dependen de combustibles fósiles. Sus operaciones, especialmente la carga y el transporte de mineral, así como los desechos de roca o los residuos, utilizan equipos pesados para mover estos materiales. Las industrias mineras están buscando nuevas tecnologías para cumplir con las regulaciones ambientales, especialmente las relacionadas con las emisiones de gases contaminantes.

La dependencia del petróleo diésel es preocupante, ya que la combustión de motores diésel produce una gran cantidad de contaminantes, principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se analiza el uso de hidrógeno en cantidades controladas en motores diésel, especialmente en camiones que se utilizan en la carga y el transporte de materiales en minas, con el objetivo de reducir el consumo y las emisiones de carbono.

La "Economía del Hidrógeno" se presenta como una tecnología prometedora; sin embargo, es necesario avanzar en los siguientes puntos:

- Difundir la tecnología de la "Economía del Hidrógeno" para aumentar la capacidad de producción y reducir los costos.
- Viabilizar la generación, el almacenamiento, la producción, la integración con la red eléctrica, el suministro y la seguridad del hidrógeno a lo largo de toda la cadena productiva.

- Proporcionar incentivos para el desarrollo de investigaciones y proyectos de tecnología de la "Economía del Hidrógeno" para las industrias.
- Destacar en la tecnología de la "Economía del Hidrógeno" el aumento de la eficiencia térmica, la reducción del consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), que contribuyen al proceso de descarbonización.

Se destacan las evidencias del potencial del "hidrógeno verde" o "hidrógeno limpio", producido a partir del agua utilizando fuentes de energía renovable y sin carbono, aplicadas en proporción controlada con combustibles fósiles, como una alternativa emergente en el proceso de descarbonización para las industrias mineras.

Se presume que el hidrógeno contribuirá a la transición del sistema energético desempeñando un papel fundamental en el proceso de descarbonización de las empresas mineras, ya que no todas las operaciones mineras pueden electrificarse a corto plazo. El hidrógeno verde se ha difundido como una realidad para descarbonizar las operaciones mineras; sin embargo, se deben superar barreras en la producción, el almacenamiento, la infraestructura, la integración con la red eléctrica, el suministro y la seguridad.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AlHumaidan, F. S., Halabi, M. A., Rana, M. S., & Vinoba, M. 2023. Blue hydrogen: Current status and future technologies. *Energy Conversion and Management*, 283, 116840.
- Ajanovic, A, M. Sayer, M.; Haas, R. 2022. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), 24136-24154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.
- Bakar, R. A., Widudo, K. Kadirgama, D. Ramasamy, Talal Yusaf, M. K. Kamarulzaman, Sivaraos, Navid Aslfattahi, L. Samylingam, and Sadam H. Alwayzy. 2022. "Experimental Analysis on the Performance, Combustion/Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Using Hydrogen in Dual Fuel Mode."

- International Journal of Hydrogen Energy. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.04.129.
- CEIC Data. Brazil Energy: Consumption: Industry: Mining: Diesel. Available: <<https://www.ceicdata.com/en/brazil/energy-consumption-by-sector-industry-mining/energy-consumption-industry-mining-diesel>>. (Accessed: September 22, 2022)
  - Dimitriou, Pavlos, Taku Tsujimura, and Yasumasa Suzuki. 2019. "Low-Load Hydrogen-Diesel Dual-Fuel Engine Operation – A Combustion Efficiency Improvement Approach." *International Journal of Hydrogen Energy* 44(31):17048–60. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.203.
  - George, Jan Frederick, Viktor Paul Müller, Jenny Winkler, and Mario Ragwitz. 2022. "Is Blue Hydrogen a Bridging Technology? - The Limits of a CO2 Price and the Role of State-Induced Price Components for Green Hydrogen Production in Germany." *Energy Policy* 167(December 2021):113072. doi: 10.1016/j.enpol.2022.113072.
  - Gholami, Aboozar, Seyed Ali Jazayeri, and Qadir Esmaili. 2022. "A Detail Performance and CO2 Emission Analysis of a Very Large Crude Carrier Propulsion System with the Main Engine Running on Dual Fuel Mode Using Hydrogen/Diesel versus Natural Gas/Diesel and Conventional Diesel Engines." *Process Safety and Environmental Protection* 163(May):621–35. doi: 10.1016/j.psep.2022.05.069.
  - Gholami, Aboozar, Seyed Ali Jazayeri, and Qadir Esmaili. 2022. "A Detail Performance and CO2 Emission Analysis of a Very Large Crude Carrier Propulsion System with the Main Engine Running on Dual Fuel Mode Using Hydrogen/Diesel versus Natural Gas/Diesel and Conventional Diesel Engines." *Process Safety and Environmental Protection* 163(May):621–35. doi: 10.1016/j.psep.2022.05.069.
  - Giuliano, Genevieve, Maged Dessouky, Sue Dexter, Jiawen Fang, Shichun Hu, and Marshall Miller. 2021. "Heavy-Duty Trucks: The Challenge of Getting to Zero." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 93. doi: 10.1016/j.trd.2021.102742.
  - Golbasi, Onur, and Elif Kina. 2022. "Haul Truck Fuel Consumption Modeling under Random Operating Conditions: A Case Study." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 102. doi: 10.1016/j.trd.2021.103135.
  - Gunawan, Tubagus Aryandi, and Rory F. D. Monaghan. 2022. "Techno-Econo-Environmental Comparisons of Zero- and Low-Emission Heavy-Duty Trucks." *Applied Energy* 308. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118327.
  - Hunt, Julian David, Andreas Nascimento, Nazem Nascimento, Lara Werncke Vieira, and Oldrich Joel Romero. 2022. "Possible Pathways for Oil and Gas Companies in a Sustainable Future: From the Perspective of a Hydrogen Economy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 160(November 2021):112291. doi: 10.1016/j.rser.2022.112291.
  - Kenanoğlu, Raif, and Ertuğrul Baltacıoğlu. 2021. "An Experimental Investigation on Hydroxy (HHO) Enriched Ammonia as Alternative Fuel in Gas Turbine." *International Journal of Hydrogen Energy* 46(57):29638–48. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.189.
  - Khatib, F. N., Tabbi Wilberforce, Oluwatosin Ijaodola, Emmanuel Ogungbemi, Zaki El-Hassan, A. Durrant, J. Thompson, and A. G. Olabi. 2019. "Material Degradation of Components in Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Electrolytic Cell and Mitigation Mechanisms: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111(May):1–14. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.007.
  - Mahmood, Abdulrahman, Haqi Qatta, Saadi Al-Nuzal, and Talib Abed. 2020. "Characteristics of Exhaust Emissions for a Diesel Engine Fuelled by Corn Oil Biodiesel and Blended with Diesel Fuel." *Engineering and Technology Journal* 38(3A):457–64. doi: 10.30684/etj.v38i3a.446.
  - Noussan, Michel, Pier Paolo Raimondi, Rossana Scita, and Manfred Hafner. 2021. "The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—a Technological and Geopolitical Perspective." *Sustainability (Switzerland)* 13(1):1–26. doi: 10.3390/su13010298.
  - Reitz, R. D., H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler, S. Kokjohn, Y. Moriyoshi, A. K. Agarwal, D. Arcoumanis, D. Assanis, C. Bae, K. Boulouchos, M. Canakci, S. Curran, I. Denbratt, M. Gavaises, M. Guenther, C. Hasse, Z. Huang, T. Ishiyama, B. Johansson, T. V. Johnson, G. Kalghatgi, M. Koike, S. C. Kong, A. Leipertz, P. Miles, R. Novella, A. Onorati, M. Richter, S. Shuai, D. Siebers, W. Su, M. Trujillo, N. Uchida, B. M. Vaglieco, R. M. Wagner, and H. Zhao. 2020. "IJER Editorial: The Future of the Internal Combustion Engine." *International Journal of Engine Research* 21(1):3–10.

- Runge, I. C. 1998. Mining economics and strategy. SME - Society for Mining Metallurgy & Exploration; ISBN: 0873351657.
- Santos, Ana L., Maria João Cebola, and Diogo M. F. Santos. 2021. "Towards the Hydrogen Economy—A Review of the Parameters That Influence the Efficiency of Alkaline Water Electrolyzers." *Energies* 14(11). doi: 10.3390/en14113193.
- Singh, Varun, Lukas C. Buelens, Hilde Poelman, Mark Saeys, Guy B. Marin, and Vladimir V. Galvita. 2022. "Intensifying Blue Hydrogen Production by in Situ CO<sub>2</sub> utilisation." *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 61(April):102014. doi: 10.1016/j.jcou.2022.102014.
- Subramanian, Balaji, and Venugopal Thangavel. 2020a. "Analysis of Onsite HHO Gas Generation System." *International Journal of Hydrogen Energy* 45(28):14218–31. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.159.
- Subramanian, Balaji, and Venugopal Thangavel. 2020b. "Experimental Investigations on Performance, Emission and Combustion Characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO Gas in a Dual Fuel CI Engine." *International Journal of Hydrogen Energy* 45(46):25479–92. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.280.
- Zhang, Qiangqiang, Zheshao Chang, Mingkai Fu, Fuliang Nie, Ting Ren, and Xin Li. 2022. "Thermal Performance Analysis of an Integrated Solar Reactor Using Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC) for Hydrogen Production." *Energy Conversion and Management* 264(March):115762. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115762.
- Zhou, Sheng, Qing Tong, Xunzhang Pan, Min Cao, Hailin Wang, Ji Gao, and Xunmin Ou. 2021. "Research on Low-Carbon Energy Transformation of China Necessary to Achieve the Paris Agreement Goals: A Global Perspective." *Energy Economics* 95:105137. doi: 10.1016/j.eneco.2021.105137.

Artículo recibido en: 18.09.2023

Artículo aceptado: 23.10.2023

## APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS PASIVOS EN LA REMEDIACIÓN DE EFLUENTES DE LABORES MINERAS ABANDONADAS UBICADAS A ELEVADAS ALTITUDES

Oswaldo Aduvire <sup>1,2\*</sup>

1. *Profesor de la Sección Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).*
2. *Dr. Ing. de Minas. Consultor Principal del Área de Geoambiente. SRK Consulting Peru S.A.*

[eaduvire@pucp.pe](mailto:eaduvire@pucp.pe)  
[oaduvire@srk.com.pe](mailto:oaduvire@srk.com.pe)  
**RESUMEN**

En áreas de laboreo minero antiguo se encuentran emplazadas una serie de estructuras e instalaciones mineras en abandono, también conocidas como pasivos ambientales mineros (PAM), que en la actualidad constituyen fuentes de contaminación, principalmente por la movilización de carga metálica en sus drenajes ácidos producidos por la oxidación de sulfuros. Los mismos que impactan negativamente sobre el suelo, agua y flora circundante.

Los drenajes que se generan en estas instalaciones mineras abandonadas pueden generar una serie de alteraciones al medioambiente y principalmente en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Esta problemática se agudiza más cuando estas instalaciones se encuentran ubicadas a cotas superiores a los 4000 metros de altitud, más aún si son zonas de recarga en la parte alta de las cuencas hidrográficas.

Para revertir esta problemática se hace imprescindible desarrollar metodologías que permitan remediar estos drenajes mediante técnicas de bajo consumo de reactivos y de energía como los sistemas de tratamiento pasivos.

En la actualidad Perú cuenta con legislación de cierre de pasivos ambientales mineros y con un inventario de más de 8000 PAM conformados por Bocaminas, Depósitos de Relaves, Depósitos de Desmonte de Mina, Restos de Instalaciones de Procesamiento y otros, que han sido generados por las antiguas explotaciones mineras cuya remediación en la actualidad está a cargo del estado.

En este trabajo se presenta una metodología para realizar una adecuada caracterización de estos drenajes, que permita elegir el sistema de tratamiento pasivo más apropiado para remediar los drenajes ácidos de dos Bocaminas del laboreo subterráneo que se encuentran abandonadas y que están ubicadas en la Sierra Central del País.