



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: [www.jeap.ufrpe.br/](http://www.jeap.ufrpe.br/)

10.24221/jeap.8.4.2023.5544.240-251



## Importância do hidrogênio na indústria de mineração como fonte de energia renovável

### Importance of hydrogen in the mining industry as a renewable energy source

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

<sup>a</sup> Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Campus Morro do Cruzeiro, s/n, Ouro Preto, Minas Gerais, Bauxita, Brasil. CEP: 35400000. E-mail: [robsonlage@ufop.edu.br](mailto:robsonlage@ufop.edu.br).

<sup>b</sup> UFOP, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas. E-mail: [jms@ufop.edu.br](mailto:jms@ufop.edu.br), [carroyo@ufop.edu.br](mailto:carroyo@ufop.edu.br).

#### ARTICLE INFO

Recebido 21 Fev 2023

Aceito 30 Ago 2023

Publicado 19 Out 2023

#### ABSTRACT

In mining, the system of operation relies on equipment that consumes large amounts of energy. In mine operations, diesel-powered equipment is widely used due to its flexibility, loading capacity, and adaptability to various terrain conditions. However, presents high diesel oil consumption and a high emission rate of greenhouse gases. This paper offers a view of the effect of hydrogen on diesel engines in the search for renewable energy alternatives that are in tune with the reduction of the environmental impact arising from the use of petroleum-derived fuels. It is followed by a discussion of energy consumption in mining. Introduces hydrogen production technologies, the advantages of using them in controlled quantities, and the challenges in production, storage, and supply costs. Highlight the “green hydrogen”, carbon-free, an emerging alternative in the decarbonization of mines.

**Keywords:** Decarbonising, hydrogen, energy, diesel oil, mining.

#### RESUMO

Na mineração, o sistema de operação depende de equipamentos que consomem grandes quantidades de energia. Nas operações mineiras, os equipamentos a diesel são amplamente empregados devido à sua flexibilidade, capacidade de carga e adaptabilidade a várias condições de terreno. Entretanto, apresentam alto consumo de óleo diesel e alta taxa de emissão de gases de efeito estufa. Este artigo oferece uma visão do efeito do hidrogênio sobre os motores diesel na busca de alternativas de energia renovável que estejam em sintonia com a redução do impacto ambiental decorrente do uso de combustíveis derivados do petróleo. É seguido por uma discussão do consumo de energia na mineração. Apresenta as tecnologias de produção do hidrogênio, as vantagens em utilizá-los em quantidades controladas e os desafios de produção, armazenamento e custos de fornecimento. Destaca-se o hidrogênio verde, livre de carbono, uma alternativa emergente na descarbonização das minas.

**Palavras-Chave:** Descarbonização, hidrogênio, energia, óleo diesel, mineração.



#### Introdução

A mineração está presente em todo o mundo, mas apenas alguns países desfrutam adequadamente destes potenciais e riquezas. Esses países se tornaram líderes em métodos e tecnologias de exploração de recursos minerais (Yellishetty et al., 2021).

A indústria de mineração é um dos setores mais significativos da economia global. No Brasil, o setor mineral possui uma posição de destaque no cenário mundial, pois é um dos principais

exportadores e beneficiadores de minério de ferro. O minério de ferro é a principal *commodity* mineral do país, que prima por possuir reservas representativas desse minério correspondendo a, aproximadamente, 19% da produção mundial (ANM, 2022).

Na extração do minério de ferro a céu aberto, diversos equipamentos estão presentes que são movidos a diesel. Destaque para os caminhões de transporte, que possuem torque em baixa velocidade e alta densidade de potência. As

principais desvantagens são o grande consumo de combustível, a alta taxa de emissão de dióxido de carbono e os altos custos de manutenção (Reitz et al., 2020). Um dos desafios associados aos motores à base de combustíveis fósseis são as emissões de gases, incluindo-se monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos, material particulado e óxidos nítricos, que têm um impacto direto no meio ambiente (Golbasi & Kina, 2022).

O consumo intensivo de óleo diesel motiva a busca por alternativas energéticas renováveis que estejam em sintonia com a redução do impacto ambiental decorrente da utilização de combustíveis derivados do petróleo. Dentre as possibilidades de utilização de energias renováveis destaca-se 'economia de hidrogênio' (Gunawan, et al., 2021).

O hidrogênio é considerado o melhor candidato a aditivo a ser misturado ao diesel para satisfazer às características exigidas pelo motor (Al-Dawody et al., 2023). A adição de hidrogênio aos combustíveis convencionais derivados do petróleo tem sido recomendada como um método para melhorar o desempenho, bem como reduzir as emissões (Benbellil et al., 2022).

Da mesma forma, estudos examinaram o desempenho de motores de ignição por compressão utilizando o hidrogênio de forma controlada com o diesel (Bakar et al., 2022). Avaliaram a adição de hidrogênio ao diesel, em motor de ignição por compressão, como um método de aumento de desempenho nos motores. Isso porque aumenta a eficiência térmica de freio e diminui a duração da combustão, devido à alta velocidade do hidrogênio em termos de propagação da chama em relação ao diesel (Subramanian et al., 2020).

Esse artigo apresenta uma discussão do consumo de energia na mineração e a intensidade energética na movimentação de materiais extraídos. Apresenta as tecnologias de produção do hidrogênio. Um combustível livre de carbono pode ser utilizado como combustível secundário em motores a diesel, proporciona um aumento na eficiência térmica de freio e produzido uma quantidade expressiva de energia na combustão, liberando vapor d'água. Seguem-se os efeitos do uso do hidrogênio no processo de descarbonização na mineração, destacando o hidrogênio verde, livre de emissão de carbono.

## Material e Métodos

### Consumo de energia na mineração

A indústria de mineração consome grandes quantidades de energia por meio de atividades de mineração primária, incluindo exploração, extração, transporte e processamento. Ao compreender e contabilizar as quantidades de energia consumidas por diferentes atividades de

mineração, pode-se gerenciar a operação de mineração em termos de consumo de energia (Giuliano et al., 2021).

No Brasil, a industrial mineral consome grandes quantidades de óleo diesel. A Figura 1 apresenta o consumo de diesel da indústria de mineração no Brasil entre o período de 2010 a 2021 (ANM, 2022). Nota-se um aumento na demanda por óleo diesel no período de 2010 a 2014 (Figura 1). A partir de 2014 a 2018 houve uma redução do consumo, retornando a curva ascendente a partir de 2018. Tal variação no consumo de óleo diesel está diretamente relacionada às oscilações nos preços internacionais do minério de ferro, o que tem um impacto direto, tanto nos custos operacionais, quanto nas emissões de gases de efeito estufa.

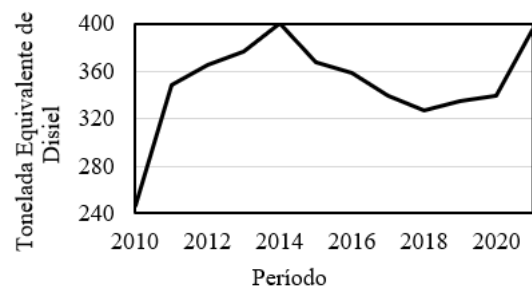


Figura 1. Consumo de diesel na indústria da mineração no Brasil. Fonte: ANM (2022).

### Fatores que afetam consumo de combustível e emissões de gases

O comportamento do consumo de combustível e das emissões de carbono resultantes de um sistema de despacho pode ser afetado por vários fatores. Segundo Runge (1998), o consumo de combustível de um caminhão fora de estrada pode ser estimado pela fórmula, obtendo assim a Equação 1.

$$F_C = P \cdot 0,3 \cdot L_F \quad \text{Eq.(1)}$$

onde  $F_C$  é o consumo de combustível [ $L h^{-1}$ ],  $P$  é a demanda de potência [ $kW$ ],  $0,3$  é o fator de conversão da unidade [ $L kW^{-1} h^{-2}$ ] e  $L_F$  é o fator de carga fornecido pelo fabricante.

Para Soofastaei et al. (2016), a emissão de  $CO_2$  dos combustíveis diesel pode ser calculada pela quantidade de combustível consumida, por meio da Equação 2.

$$\text{Emissões de } CO_2 = F_C \cdot E_F \quad \text{Eq.(2)}$$

onde  $F_C$  é o consumo de combustível diesel [ $L h^{-1}$ ] e  $E_F$  é o fator de emissão de  $CO_2$ .

Segundo Velandy (2011), o  $E_F$  para motores a diesel de caminhões pesados é de  $2,7 \text{ kg } CO_2 \text{-e } L^{-1}$ .

Para entender o consumo de combustível nas operações de transporte de uma mina, não se deve limitar às características mecânicas dos caminhões de transporte (Mirzaei-Nasirabad et al., 2023). É necessário avaliar a influência de outros fatores no processo de produção: como rota, condições topográficas, principalmente o aumento da profundidade das cavas das minas e elevação das pilhas de resíduos, condições climáticas, tipos de caminhões empregados nas operações, tráfego e perfil de trabalho do motorista que afetam o consumo de óleo diesel e a emissão de gás do escapamento (Golbasi & Kina, 2022). Dependendo da capacidade de produção, desenho da cava e movimentação de materiais, o consumo de diesel aumenta, assim como as emissões de dióxido de carbono e de material particulado (Bao et al., 2023).

A movimentação dos materiais extraídos (como o minério de ferro) e o consumo de diesel estão estreitamente correlacionados. O processo envolve frequentemente a utilização de equipamento e maquinário pesada, tais como caminhões de transporte, escavadeiras, e bulldozers, que requerem grandes quantidades de energia para funcionar.

Segundo Bajany et al. (2019), o custo de transporte pode ser de aproximadamente 35% do custo total de operação em minas de médio ou grande porte. Ainda de acordo com Bajany et al. (2019), caminhões e escavadeiras são comumente empregados nas minas para carregamento, transporte de minério e estéril, devido à sua flexibilidade e capacidade de transportar material. Mais modernamente, também como alternativa para o transporte de rejeito.

A flexibilidade operacional e a grande capacidade dos caminhões os tornaram populares nas minas. Por outro lado, 40% da energia consumida em uma mina é proveniente do diesel e, apesar da recente melhoria na eficiência dos caminhões, ainda são os maiores consumidores na lavra (Vilaça et al., 2022).

Além de emitirem grandes volumes de gases do efeito estufa, esses equipamentos têm sido

um desafio para a indústria de mineração devido aos danos associados ao meio ambiente, o que representa um desafio na eficiência energética de combustíveis fósseis. Por exemplo, o fora de estrada (*Off-Highway*) consome em média uma taxa anual de  $14,89 \times 10^6$  L de diesel e, portanto, emite cerca de  $47,8 \times 10^6$  kg de gases de efeito estufa por ano (Purhamadani et al., 2021).

#### *Métodos de produção do hidrogênio*

Na literatura a geração de hidrogênio diferencia-se por várias formas de fontes de energia primária, que pode ser distinguida por cores diferentes. Dependendo do método de produção do hidrogênio são classificados nas cores verde, cinza, azul, marrom, amarelo, roxo e turquesa, ilustrado na Figura 2 (Ajanovic et al., 2022).

A Figura 2 resume o esquema de cores as principais formas da produção do hidrogênio: (i) hidrogênio verde - obtido por eletrólise de água utilizando fontes renováveis da sua geração; (ii) hidrogênio cinza - obtido por reforma de metano a vapor, sem captura do  $\text{CO}_2$ , (iii) hidrogênio azul - obtido a partir de fontes fósseis, mas captura e armazena o  $\text{CO}_2$ , (iv) hidrogênio marrom - obtido pela gaseificação do carvão, e (v) hidrogênio amarelo - obtido por eletrólise da água empregando eletricidade gerada a partir de diferentes fontes de energia, (vi) hidrogênio roxo - obtido pela energia nuclear e (vii) hidrogênio turquesa - obtido a partir da pirólise do metano.

A cor verde representa o hidrogênio obtido a partir da eletrólise por meio de eletricidade provenientes de fontes de energia renováveis, tais como energia eólica, solar ou hidrelétrica (Alhabradi et al., 2022). Também é conhecido como “hidrogênio renovável”, “hidrogênio limpo” ou “hidrogênio livre de carbono” (Hoelzen et al., 2022).

As principais tecnologia de eletrólise são: alcalina, membrana de eletrólito de polímero e célula de eletrólise de óxido sólido.

Na eletrólise alcalina o hidrogênio é produzido utilizando eletrolisadores que são compostos pelos eletrodos e eletrólito.

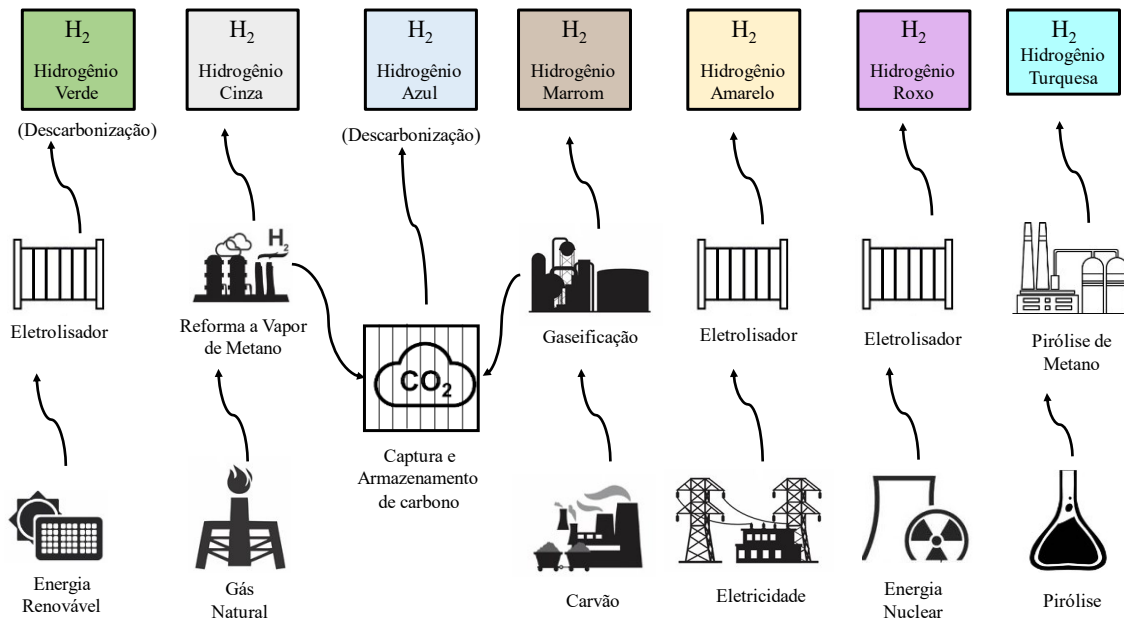
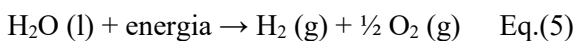
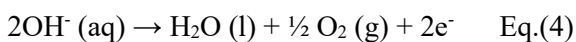
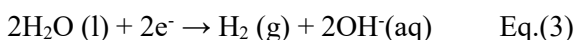


Figura 2. Principais métodos de produção do hidrogênio. Fonte: Figueiredo et al. (2023).

Os eletrodos são feitos de metais inertes como aço inoxidável, platina, irídio (Nejadian et al., 2023). Os eletrólitos líquidos possuem boa condutividade iônica, quando aplicada uma corrente elétrica contínua, os elétrons fluem na solução eletrolítica do terminal negativo, cátodo, da fonte de energia, onde são atraídos pelos íons de hidrogênio existentes na água, produzido o hidrogênio -  $H_2$  (Equação 3). Para manter o equilíbrio no eletrolisador, os íons hidróxidos resultantes da reação catódica se movem em direção à superfície do ânodo, onde perdem elétron, que retornam ao terminal positivo da fonte de energia, formando oxigênio -  $O_2$  (Equação 4). A reação global da eletrólise da água é obtida pela aplicação da Equação 5 (Subramanian et al., 2020).



A membrana de eletrólito de polímero é utilizado nos eletrolisadores pois mantém o sistema compacto, suportar alta pressão, alta densidade de potência, baixa temperatura de operação e fácil ampliação. A membrana é porosa que permite o fluxo de corrente o que acarreta uma maior fluidez no transporte de água e gás. Comumente, a membrana é composta de *Nafion* ou *Fumapem*, que são materiais porosos (Grandi et al., 2023).

As células de eletrólise de óxido sólido (SOEC) são compostas de um eletrólito condutor iônico denso e dois eletrodos porosos. Quando

aplicado o potencial elétrico as moléculas de água se dissociam para formar o gás hidrogênio (Jolaoso et al., 2023).

A cor cinza representa o hidrogênio produzido pela reforma vapor do gás natural metano fóssil ou gaseificação do carvão, sem captura de carbono ou pelo subproduto de processos químicos (Singh et al., 2022). Caso for produzido por subproduto de processos químicos pode ser classificado na cor branca. Também pode ser descrito na literatura como classificado na cor marrom para o processo de gaseificação do carvão (Masoudi et al., 2021).

O hidrogênio cinza é utilizado, principalmente, na produção de amônia e, atualmente, é produzido em maiores quantidades devido a demanda de fertilizantes. A desvantagem é a emissão de  $CO_2$  gerada durante a produção do hidrogênio cinza, principalmente no processo de gaseificação do carvão (George et al., 2022).

A cor azul representa o hidrogênio, obtido a partir de fontes fósseis, utilizando a reação de reforma do metano a vapor, a partir de gás natural ou biomassa, em um reator, pela adição de um solvente sólido em alta temperatura, mas com captura e armazenamento de carbono, ou seja, com a produção de hidrogênio de baixo carbono (George et al., 2022).

Amarelo representa o hidrogênio obtido a partir da eletrólise, com entradas de eletricidade da rede, e é chamada de hidrogênio amarelo (Noussan et al., 2021).

Roxo representa o hidrogênio obtido a partir da eletrólise, por meio de uma corrente atômica, ou seja, produção de hidrogênio roxo é a partir de energia nuclear. A literatura também faz

referência ao hidrogênio roxo, proveniente de eletricidade renovável. Neste caso, a cor "roxo" indica que este tipo de produção de hidrogênio combina, tanto o hidrogênio verde (produzido usando eletricidade renovável), quanto o hidrogênio azul (produzido usando combustíveis fósseis, com tecnologias de captura e armazenamento de carbono) (Ajanovic et al., 2022).

A cor turquesa representa o hidrogênio, obtido a partir da pirólise do metano. A pirólise do metano é um processo que utiliza calor para dividir o metano (o principal componente do gás natural) em hidrogênio e carbono sólido. O carbono produzido pode ser capturado e armazenado, para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> (Pruvost et al., 2022).

Este artigo trata de uma investigação de caráter qualitativo e foi baseada em pesquisa bibliográfica sistemática. Os objetivos pesquisados da revisão sistemática tiveram o intuito de discutir e apresentar aspectos relativos ao consumo de energia na mineração e os desafios na matriz energética quanto a utilização de fontes renováveis.

Apresenta-se o hidrogênio, que pode desempenhar um papel importante na indústria de mineração, como uma fonte de energia limpa. Existem diversas tecnologias para produzir hidrogênio, apresentamos aqui as principais, assim como suas vantagens e os desafios que o hidrogênio proporcionado ao ser utilizado como um combustível limpo em motores a diesel. Evidencia-se o potencial do hidrogênio no processo de descarbonização na indústria mineral, destacando o hidrogênio verde, livre de carbono.

Considerando a produção de hidrogênio, são abordadas as seguintes questões: (1) Quais são as perspectivas e os desafios para a produção de hidrogênio? (2) Quais são os efeitos da adição controlada de hidrogênio aos motores à diesel?

(3) Qual a tecnologia de produção de hidrogênio mais favorável para descarbonizar as operações minerais?

## Resultados e Discussão

### *Perspectivas e desafios para a produção de hidrogênio*

O artigo apresenta os principais métodos de produção de hidrogênio, e cada um tem diferentes impactos ambientais. O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis, como gás natural, por meio do processo de reforma a vapor, emite CO<sub>2</sub> como subproduto. O hidrogênio produzido a partir de carvão libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera. No entanto, é importante destacar que a produção de hidrogênio também pode ser realizada por meio de fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidrelétrica, utilizando eletrólise para separar a água em hidrogênio e oxigênio. Quando o hidrogênio é produzido dessa forma, é considerado uma fonte de energia limpa e renovável, sem emissões de CO<sub>2</sub>.

A Tabela 1 apresenta o nível de maturidade tecnológica (NMT) relacionado com as emissões de CO<sub>2</sub> para os diferentes tipos de geração de hidrogênio.

Tabela 1. Tecnologias associadas ao nível de maturidade tecnológica (NMT). Fonte: Hermesmann (2022).

Cor associada	Material principal	Nível de Maturidade Tecnológica (NMT)	Emissão de CO <sub>2</sub> relacionada ao processo
Verde	Água	Comercial (NMT 6-9)	Livre - Carbono
Cinza	Gás Natural	Comercial (NMT 9)	Alto - CO <sub>2</sub>
Azul	Gás Natural	Escala Industrial (NMT 8 -9)	Livre - CO <sub>2</sub>
Marrom	Gás Natural	Escala Industrial (NMT 8 -9)	Alto-CO <sub>2</sub>
Amarelo	Água	Comercial (NMT 6-9)	Livre - Carbono
Roxo	Água	Desenvolvimento Tecnológico (NMT 4-5)	Livre - Carbono
Turquesa	Pirólise	Modelo (NMT 6-7)	Sólido - Carbono

O nível de maturidade tecnológica (NMT) é uma medida para identificar o potencial futuro de qualquer tecnologia existente ou emergente. Ela compreende determinadas dimensões que abrangem o nível geral de maturidade dessa tecnologia específica. Entre os muitos critérios, os aspectos mais importantes são a qualidade da tecnologia desenvolvida, sua aceitação no mercado, a legalização, a facilidade e adaptação do

usuário final. O NMT é baseado em uma escala de 1 a 9, sendo 1, o princípio básico observado, e 9 a tecnologia consolidada (Kota et al., 2022).

É importante ressaltar, na Tabela 1, as produções de hidrogênio verde, azul e amarelo por não emitirem CO<sub>2</sub> na atmosfera e possuir o nível de maturidade tecnológica comercial, ou seja, estarem em um estágio comercialmente maduro de desenvolvimento tecnológico.

Especificamente, o hidrogênio verde merece destaque, por ser produzido por meio da eletrólise da água, através da eletricidade de fontes de energia renováveis, conhecido como “eletrólise renovável”, dessa forma, é considerado uma fonte de energia limpa e renovável, sem emissões de CO<sub>2</sub>.

A Tabela 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens na comparação dos

principais métodos de geração de hidrogênio. Podem ser observadas as principais vantagens: eficiência energética, tecnologias de baixo custo, alta pureza H<sub>2</sub>, livre de carbono e utilização de fontes de energia renovável. Em contrapartida, destacam-se as principais desvantagens: baixa durabilidade, alta temperatura, emissão de CO<sub>2</sub> e alto custo de energia e produção.

Tabela 2. Comparação dos métodos de geração de hidrogênio. Fonte: Subramanian (2022).

Método	Vantagens	Desvantagens
Alcalina	Eficiência energética (70~80%) Tecnologia de baixo custo Comercializado	Densidade de corrente limitada Solução eletrolítica corrosiva Cruzamento de gás
Membrana de Eletrólito Polimérico	Eficiência energética (80~90%) Densidade de corrente alta Alta pureza H <sub>2</sub> (99,99%)	Baixa durabilidade Componentes caros Pouco comercializado
Célula de Eletrólise de Óxido Sólido	Eficiência energética (90~100%) Densidade de corrente alta Alta pureza H <sub>2</sub> (99,99%)	Baixa durabilidade Em fase de laboratório Não comercializado
Reforma a Vapor de Gás Natural	Eficiência energética (90%) Tecnologia de baixo custo Comercializado	Alta temperatura Formação de coque Emissão de CO <sub>2</sub>
Reforma do Metano a Vapor - sem captura de carbono	Eficiência energética (75~80%) Produção de baixo custo Alta escala de produção	Baixa eficiência energética Sem capturas de carbono Emissão de CO <sub>2</sub>
Reforma do Metano a Vapor - com captura e armazenamento de carbono	Alta pureza H <sub>2</sub> (99,99%) Sem emissão de CO <sub>2</sub> Carbono livre.	Alto custo para transportar O <sub>2</sub> Alto custo com energia Alto custo de produção
Eletrólise	Fonte de energia renovável Tecnologia amplamente difundida Alta pureza H <sub>2</sub> (99,99%) Comercializado	Alto custo para eletricidade Alto custo para energia renovável Alto custo do eletrolisador
Pirólise	Alta taxa de produção de hidrogênio Baixa poluição	Alto custo do reator Reação complexa que requer alta temperatura Taxa de produção de hidrogênio depende do catalisador

O custo de geração do hidrogênio varia de acordo com o método e da fonte de energia utilizado no processo de produção.

A Figura 3 apresenta a estimativa de custo para as tecnologias de produção de hidrogênio. Nota-se que os custos finais de obtenção do hidrogênio podem ser distintos.

Os hidrogênios “cinza” e “marrom” apresentam o menor custo, pois são, atualmente, os principais métodos utilizados para a obtenção do hidrogênio com produção na faixa GW (Figura 3). Destaca-se, também, o preço de venda do hidrogênio “Turquesa”, entre 2,92-3,50 US\$ kg<sup>-1</sup>.

O custo do hidrogênio “azul” é maior, em comparação com o “cinza”, devido aos custos adicionais para a captura e o armazenamento de carbono.

O hidrogênio “verde” tem um custo um pouco maior que os demais, devido ao custo do eletrolisador na faixa de 4,075 USD kW<sup>-1</sup>. Destaca-se que ainda é uma tecnologia pouco difundida, no entanto, há avanços significativos de novos eletrolisadores, bem como geração de eletricidade renovável.

O hidrogênio “roxo” não é citado na Figura 3, pois ainda não é produzido em escala comercial,

mas pesquisas apontam estudos para sua fabricação e comercialização.

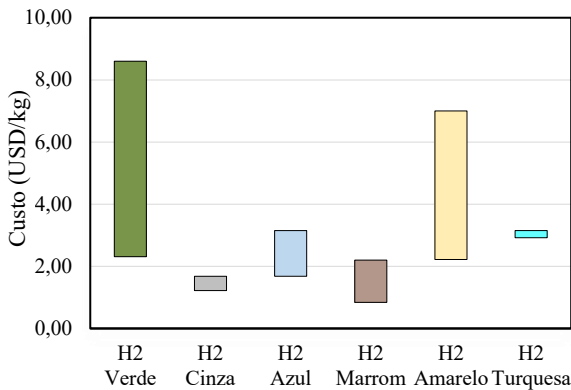


Figura 3. Estimativas de custo de produção de hidrogênio por método. Fonte: Adaptado de Ajanovic et al. (2022).

Pesquisas apontam, como desafio, a adequação à operação dinâmica para a geração do hidrogênio, seu armazenamento, sua produção e sua integração com a rede elétrica, infraestrutura e custo.

O armazenamento de hidrogênio acarreta outro grande desafio. Isto implica em desenvolver sistemas compactos, confiáveis, econômicos e seguros, pois o hidrogênio é um gás altamente inflamável e requer medidas especiais de segurança para ser armazenado.

A produção de hidrogênio requer uma quantidade significativa de energia, e alguns métodos de produção de hidrogênio, o consumo é relativamente alto. Por exemplo, a alcalina, em comparação com outros métodos de produção de hidrogênio, tem a vantagem de ser um processo limpo e ecologicamente correto, pois não produz emissões de gases de efeito estufa ou outros poluentes. No entanto, o custo da energia elétrica necessária para o processo é um fator significativo na determinação do custo total da produção de hidrogênio.

A integração da produção de hidrogênio à rede elétrica refere-se à incorporação dos sistemas de produção de hidrogênio à rede elétrica existente, permitindo que a produção de hidrogênio seja alimentada por eletricidade produzida a partir de fontes renováveis de energia, como energia eólica, solar, hidrelétrica, entre outras.

A infraestrutura de produção, armazenamento e transporte de hidrogênio ainda não está totalmente desenvolvida, e isto representa um desafio significativo. O desenvolvimento da infraestrutura necessita de altos investimentos, e isto cria uma barreira para a adoção mais ampla do hidrogênio como combustível.

O custo de produção de hidrogênio é, atualmente, maior do que o dos combustíveis fósseis convencionais, e este é um grande desafio para a produção de hidrogênio. Isto se deve, em parte, ao alto custo da eletricidade necessária para a eletrólise da água ou aos altos custos de captação e armazenamento de carbono para a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis.

#### *Efeito da adição controlada de hidrogênio a motores diesel*

A adição controlada de hidrogênio a motores diesel é uma tecnologia em desenvolvimento que tem o potencial de reduzir significativamente as emissões de gases poluentes dos motores a diesel.

A utilização de hidrogênio como combustível é desafiadora, pelas dificuldades de produção, armazenamento, transporte e abastecimento (Foorginezhad et al., 2021). No entanto, apresenta como alternativa viável a utilização do hidrogênio como aditivo em combustíveis fósseis. Em quantidades controladas, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível secundário, com o diesel, para auxiliar no processo de combustão (Kenanoğlu; et al., 2021).

O hidrogênio é indicado como combustível adicional em motores de ignição por compressão movidos a diesel, devido às suas características e propriedades, possui uma ampla faixa de inflamabilidade, de 4 -75%, em comparação com o óleo diesel, e uma maior velocidade de ignição, o que permite que os motores funcionem com misturas mais pobres, ou seja, com menos injeção de diesel. A mistura de hidrogênio-ar pode ser facilmente inflamada em motores de ignição por compressão, pois a energia de ignição mínima é menor do que a do diesel (Sabeghi et al., 2023).

Krishnasamy et al. (2021) elaboraram uma revisão geral do efeito da adição de hidrogênio em motores a diesel e encontraram os seguintes resultados.

- A relação combustível - ar, velocidade do motor e carga, têm um papel significativo no desempenho e nas emissões de gases do motor com enriquecimento de hidrogênio.
- A eficiência térmica, a potência efetiva, a pressão média efetiva e o consumo específico de energia dependem das condições de operação do motor quando o hidrogênio é adicionado.
- O enriquecimento de hidrogênio afeta as emissões, então há uma redução de monóxido de carbono, dióxido de carbono e partículas.

A adaptabilidade dos motores a diesel ao hidrogênio, o tornam um candidato viável para



convertê-lo em um motor bicomustível com poucas alterações, sem grandes custos. No arranjo do motor bicomustível, o hidrogênio é introduzido como combustível suplementar por meio do coletor de admissão de ar ou diretamente injetado nos cilindros do motor. Assim, a maior parte da energia é obtida do diesel, enquanto o restante da energia é fornecido pelo hidrogênio, é um combustível limpo, sem carbono (Gholami et al., 2022).

A Tabela 3 apresenta estudos que exploram as aplicações do hidrogênio em motores a diesel, como combustível principal, e H<sub>2</sub>, como combustível secundário. Aos autores evidenciam as melhorias no desempenho do motor e na redução das emissões de gases, principalmente CO, CO<sub>2</sub>, HC e material particulado. Alguns estudos observaram um aumento no NO<sub>x</sub> que foram os principais pontos de atenção e que precisam de investigações completas para serem resolvidos.

Tabela 3. Estudos da adição de hidrogênio no diesel. Fonte: Adaptado Kumar et al. (2023).

Referências	Desempenho do motor	Emissões do motor
Kumar et al. (2021)	Melhora BTE	Redução de NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e HC
Dimitriou et al. (2018)	Aumento BTE	Redução CO, CO <sub>2</sub> e HC
Sharma & Dhar (2018)	Aumento BTE	Redução do material particulado
Garcia et al. (2020)	Melhora BTE	Redução de NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e HC
Elnajjar et al. (2022)	Aumento BTE	Redução de CO, CO <sub>2</sub> e HC, aumento de NO <sub>x</sub>
Pirkl et al. (2022)	Melhora BTE	Redução de CO, CO <sub>2</sub> , HC e NO <sub>x</sub>

\* BTE = Eficiência térmica de freio.

#### *Estimativa de redução da taxa de combustível diesel e emissões de CO<sub>2</sub>*

Para o cálculo do consumo de combustível de um caminhão fora de estrada, deve-se avaliar a rota, condições topográficas, profundidade das cavas, elevação das pilhas de resíduos, condições climáticas, tipos de caminhões empregados nas operações, tráfego e perfil de trabalho do motorista, e principalmente o fator de carga para determinar o consumo de combustível em diferentes trechos da rota de transporte.

Segundo Torres et al. (2022), as emissões de gases de efeito estufa são avaliadas durante as diversas etapas da produção e operação. Os valores podem ser calculados com base na quantidade de combustível consumida, que está relacionada à taxa de material mobilizado, à unidade de tempo (hora) e ao ciclo operacional. Atualmente o fator de emissão de CO<sub>2</sub> equivale, em média, 2,70 quilogramas de CO<sub>2</sub> emitidos por litro de óleo diesel queimado, para veículos pesados.

De acordo com Ahluwalia et al. (2022), Kheirhah et al. (2023) e Pirkl et al. (2023), a adição controlada de hidrogênio em motores a diesel, em veículos pesados, apontam uma taxa de redução do combustível diesel até 18%.

Para Carvalho et al. (2022), a Equação 6 é empregada para estimar as quantidades totais de emissões resultantes de uma taxa de atividade de veículos pesados. Pressupõe-se que, ao longo dos anos, haja uma redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, devido a adição controlada de hidrogênio em equipamentos movidos a motores diesel.

$$E = E_F \cdot A \cdot \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad \text{Eq.(6)}$$

onde E é emissões, A é taxa de atividade, E<sub>F</sub> é fator de emissão e ER é eficiência geral de redução de emissões, %.

Embora haja desafios a serem superados, como métodos de produção de hidrogênio, desenvolvimento de infraestrutura e custo, a importância do uso de hidrogênio na mineração para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> é significativa. A transição para tecnologias baseadas em hidrogênio oferece alternativa para o processo de descarbonização na indústria da mineração.

#### *Descarbonização na mineração*

Na transição para um futuro de energia limpa, as mineradoras precisarão se descarbonizar, não apenas para cumprir as metas de redução de emissões, mas, também, pelas metas impostas pelas regulamentações ambientais, cada vez mais rigorosas e em atendimento de acordos multilaterais entre diferentes países. A maioria das industriais se comprometeu na adaptação operacional para garantir a neutralidade do carbono até 2050 (Calvo & Valero, 2022).

Para atingir as metas de reduções de emissões, destaca-se a chamada “Economia do Hidrogênio”. O termo refere-se a um recurso energético renovável, com base no uso de maiores proporções no lugar de combustíveis fósseis. Ademais, apresenta como uma alternativa viável descarbonizar as operações mineiras, devido a combustão direta do hidrogênio produzir uma quantidade expressiva de energia e obter como



subproduto principal a água, livre de carbono (Chantre et al., 2022).

A descarbonização visa reduzir o consumo de fontes de energia não renováveis, principalmente combustíveis derivados do petróleo, e as emissões de gases de efeito estufa até atingir a neutralidade das emissões de gás carbono na atmosfera (Kalantari et al., 2021). Os próximos 30 anos exigirão uma profunda transformação do

setor energético para substituir os combustíveis fósseis por motores movidos à eletricidade limpa e energias renováveis. A Figura 4 apresenta os principais passos para alavancar as mudanças comportamentais na busca da neutralidade de carbono. Em destaque estão a redução de CO<sub>2</sub>, investimentos, sustentabilidade, descarbonização e regulamentação.

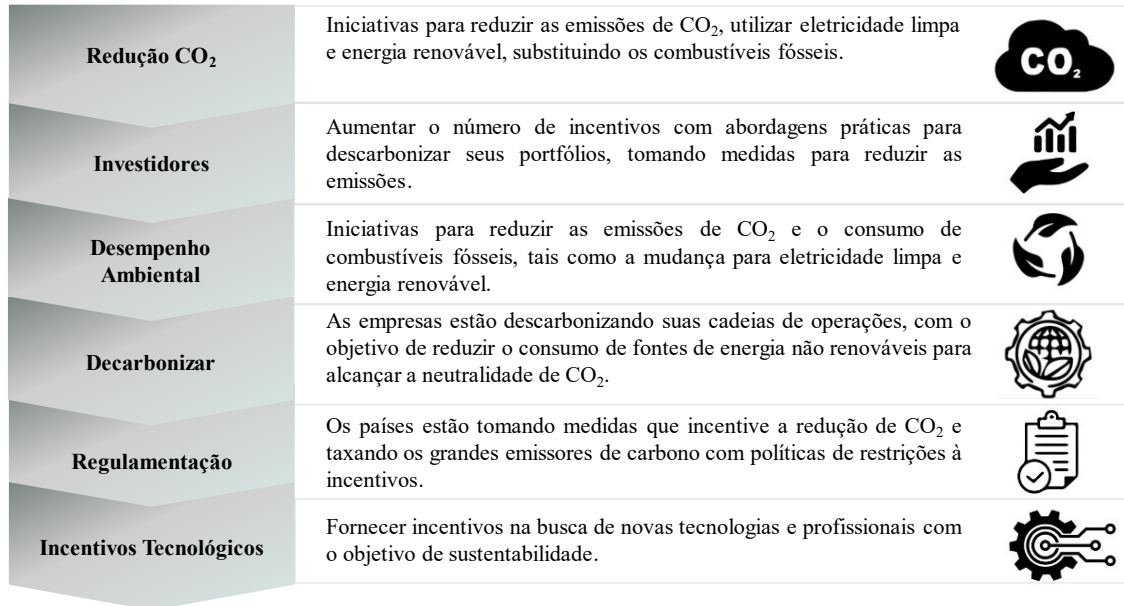


Figura 4. Passos para a descarbonização na mineração. Fonte: Figueiredo et al. (2023).

A indústria mineral tem a perspectivas de ser impactada diretamente com economia do hidrogênio, a qual alterará a matriz energética das fontes de energia dos equipamentos movidos a diesel, o que resultaria na diminuição dos níveis de carbono. Isto em consequência do fato de que o hidrogênio verde é produzido a partir de fontes renováveis de energia, tais como a eólica e a solar, por meio de eletrólise, que emite zero gases de efeito estufa (Gunawan et al., 2021).

## Conclusão

A mineração é uma das indústrias mais intensivas e suas operações dependem de combustíveis fósseis. Suas operações, especialmente o carregamento e transporte de minério, bem como de resíduos de rocha, ou mesmo de rejeitos, que utilizam equipamentos pesados para mover esses materiais. As indústrias de mineração estão buscando novas tecnologias para atender às novas regulamentações de impactos ambientais, especialmente as emissões de gases.

A “Economia de Hidrogênio” apresenta como uma tecnologia promissora, no entanto é necessário avançar nos seguintes pontos:

- Difundir a tecnologia “Economia de Hidrogênio” para aumentar a capacidade de produção e reduzir os custos.
- Viabilizar geração, armazenamento, produção, integração com a rede elétrica, abastecimento e segurança do hidrogênio ao longo de uma cadeia produtiva.
- Fornecer incentivos para desenvolvimento de pesquisas e projetos de tecnologia “Economia de Hidrogênio” para as indústrias.

Destacam-se na tecnologia de “Economia de hidrogênio” o aumento da eficiência térmica de freio, a redução do consumo do combustível e das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO), que colaboram para o processo de descarbonização.

Evidências do potencial do "hidrogênio verde" ou "hidrogênio limpo" produzido a partir da água são destacadas, utilizando fontes de energia renováveis e livres de carbono, aplicadas em proporção controlada com combustíveis fósseis, fornecendo uma alternativa emergente no processo de descarbonização para as indústrias de mineração.

Presume-se que o hidrogênio contribui para a transição do sistema energético, desempenhando um papel fundamental no

processo de descarbonização das empresas de mineração, uma vez que nem todas as operações de mineração podem ser eletrificadas a curto prazo. O hidrogênio verde tem sido difundido como uma realidade para descarbonizar as operações de mineração. Entretanto, as barreiras de produção, armazenamento, infraestrutura e integração com a rede elétrica, fornecimento e segurança precisam ser superadas.

Em investigações futuras, uma análise de oportunidades para o uso do hidrogênio verde no segmento da mineração poderia ser mais difundida, considerando os pontos de vista técnico, econômico e ambiental. Incluir as projeções de custos e a avaliação da implementação do hidrogênio verde, no contexto das mineradoras brasileiras, é uma lacuna observada na literatura. Além disso, é importante apresentar o hidrogênio verde como candidato potencial para as mineradoras, fornecendo informações relevantes sobre oportunidades e desafios.

## Referências

- Ahluwalia, R. K.; Wang, X.; Star, A. G.; Papadias, D. D. 2022. Performance and cost of fuel cells for off-road heavy-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, (20), 10990-11006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.144>
- Ajanovic, A.; 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>
- Al-Dawody, M. F.; Al-Farhany, K. A.; Allami, S.; Al-Chlahawi, K. K. I.; Jamshed, W.; El Din, S. M. 2023. Using oxy-hydrogen gas to enhance efficacy and reduce emissions of diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 102217.
- Alhabradi, M.; Nundy, S.; Ghosh, A.; Tahir, A. A. 2022. Vertically Aligned CdO-Decked  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanorod Arrays by a Radio Frequency Sputtering Method for Enhanced Photocatalytic Applications. *ACS omega*, 7, (32), 28396-28407.
- ANM - Agência Nacional de Mineração. 2022. Anuário Mineral Brasileiro. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: 30 de dezembro de 2022.
- Bajany, D. M.; Zhang, L.; Xia, X. 2019. An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels. 52, 207-212.
- Bakar, R. A.; Widodo; Kadirgama, K. Ramasamy, D.; Yusaf, T.; Kamarulzaman, M. K.; Sivaraos; Aslfattahi, N.; Samylingam, L.; Alwayzy, S. H. 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*, 43, 5415-5435. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.129>
- Bao, H.; Knights, P.; Kizil, M.; Nehring, M. 2023. Electrification Alternatives for Open Pit Mine Haulage. *Mining*, 3, 1-25. <https://doi.org/10.3390/mining3010001>
- Benbellil, M. A.; Lounici, M. S.; Loubar, K.; Tazerout, M. 2022. Investigation of natural gas enrichment with high hydrogen participation in dual fuel diesel engine. *Energy*, 243, 122746.
- Calvo, G.; Valero, A. 2022. Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*, 41, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100640>
- Chantre, C.; Eliziário, S. A.; Braga, S. L. 2022. Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholder's perception, 34, 26-41.
- Carvalho Jr, J. A.; Castro, A.; Brasil, G. H.; Souza Jr, P. A.; Mendiburu, A. Z. 2022. CO<sub>2</sub> Emission Factors and Carbon Losses for Off-Road Mining Trucks. *Energies*, 15, (7), 2659. <https://doi.org/10.3390/en15072659>
- Dimitriou, P.; Kumar, M.; Tsujimura, T.; Suzuki, Y. 2018. Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine. *International journal of hydrogen energy*, 43, (29), 13605-13617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.062>
- Foorginezhad, S.; Mohseni-Dargah, M.; Falahati, Z.; Abbassi, R.; Razmjou, A.; Asadnia, M. 2021. Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 489, 229450. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229450>
- Elnajjar, E.; Al-Omari, S. A. B.; Selim, M. Y. E.; Purayil, S. T. P. 2022. CI engine performance and emissions with waste cooking oil biodiesel boosted with hydrogen supplement under different load and engine parameters. *Alexandria Engineering Journal*, 61, (6), 4793-4805.

- Garcia, A.; Monsalve-Serrano, J.; Martinez-Boggio, S.; Gaillard, P.; Poussin, O.; Amer, A. A. 2020. Dual fuel combustion and hybrid electric powertrains as potential solution to achieve 2025 emissions targets in medium duty trucks sector. *Energy conversion and management*, 224, 113320.
- George, J. F.; Müller, V. P.; Winkler, J.; Ragwitz, M. 2022. Is blue hydrogen a bridging technology? - The limits of a CO<sub>2</sub> price and the role of state-induced price components for green hydrogen production in Germany. *Energy Policy*, 167, 113072. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113072>
- Gholami, A.; Jazayeri, S. A.; Esmaili, Q. 2022. A detail performance and CO<sub>2</sub> 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, 621-635. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.069>
- Giuliano, G.; Dessouky, M.; Dexter, S.; Fang, J.; Hu, S.; Miller, M. 2021. Heavy-duty trucks: The challenge of getting to zero. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102742.
- Golbasi, O.; kina, E. 2022. Haul truck fuel consumption modeling under random operating conditions: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103135.
- Grandi, M.; Rohde, S.; Liu, D. J.; Gollas, B.; Hacker, V. 2023. Recent advancements in high performance polymer electrolyte fuel cell electrode fabrication–Novel materials and manufacturing processes. *Journal of Power Sources*, 562, 232734. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232734>
- Gunawan, T. A.; Raine, D.; Rory, F. D. 2021. Decarbonising city bus networks in Ireland with renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, (57), 28870-28886.
- Hermesmann, M.; Müller, T. E. 2022. Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Hoelzen, J.; Silberhorn D.; Bensmann B.; Hanke-Rauschenbach, R. 2022. Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, (5), 3108-3130. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>
- Jolaoso, L. A.; Bello, I. T.; Ojelade, O. A.; Yousuf, A.; Duan, C.; Kazempoor, P. 2023. Operational and scaling-up barriers of SOEC and mitigation strategies to boost H<sub>2</sub> production-a comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, (62), 31511-31522. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.077>
- Kalantari, H.; Sasmito, A. P.; Ghoreishi-Madiseh, S. A. 2021. An overview of directions for decarbonization of energy systems in cold climate remote mines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111711.
- Kenanoğlu, R.; Baltacıoğlu, E. 2021. An experimental investigation on hydroxy (HHO) enriched ammonia as alternative fuel in gas turbine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, (57), 29638-29648.
- Kheirkhah, P.; Steiche, P.; Whyte, T.; Guan, M.; Kirchen, P. 2023. On-Road CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions for a Heavy-Duty Truck with Hydrogen-Diesel Co-Combustion. No. 2023-01-0281, SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0281>
- Kota, K. B.; Shenbagaraj, S.; Sharma, P. K.; Sharma, A. K.; Ghodke, P. K.; Chen, W. H. 2022. Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. *Fuel*, 324, 124663. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124663>
- Krishnasamy, A.; Gupta, S. K.; Reitz, R. D. 2021. Prospective fuels for diesel low temperature combustion engine applications: A critical review. *International Journal of Engine Research*, 22, (7), 2071-2106.
- Kumar, A.; Kumar, C. B.; Lata, D. B. 2023. Investigation on the performance and emissions of tri-ethylene glycol mono methyl ether with hydrogen as a secondary fuel in dual fuel diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, (26), 9895-9910.
- Kumar, C. B.; Lata, D. B.; Mahto, D. 2021. Effect of addition of di-tert butyl peroxide (DTBP) on performance and exhaust emissions of dual fuel diesel engine with hydrogen as a secondary fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, (14), 9595-9612. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.129>
- Soltani, S. M.; Lahiri, A.; Bahzad, H.; Yan, Y. 2021. Sorption-enhanced Steam Methane Reforming for Combined CO<sub>2</sub> Capture and Hydrogen Production: A State-of-the-Art

- Review. Carbon Capture Science & Technology, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100003>
- Mirzaei-Nasirabad, H.; Mohtasham, M.; Askari-Nasab, H.; Alizadeh, B. 2023. An optimization model for the real-time truck dispatching problem in open-pit mining operations. Optimization and Engineering, 1-25.
- Nejadian, M. M.; Ahmadi, P.; Houshfar, E. 2023. Comparative optimization study of three novel integrated hydrogen production systems with SOEC, PEM, and alkaline electrolyzer. Fuel, 336, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126835>
- Noussan, M.; Raimondi, P.; Scita, R.; Hafner, M. 2021. The role of green and blue hydrogen in the energy transition-a technological and geopolitical perspective. Sustainability, 13, (1), 1-26.
- Pirkel, R.; D'Onofrio, M.; Kapusta, L.; Herrmann, D. 2022. H<sub>2</sub> Direct Injection System for Heavy Duty ICE in transient On- & Off-Road Operation. Commercial Vehicle Technology 2022. ICVTS 2022. Proceedings. Springer Vieweg. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-40783-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-658-40783-4_18)
- Pirkel, R.; Herrmann, D.; Kapusta, L. 2023. H<sub>2</sub> Injection System for Heavy-duty Applications. MTZ worldwide, 84, (2), 28-33. <https://doi.org/10.1007/s38313-022-1432-1>
- Purhamadani, E.; Bagherpour, R.; Tudeshki, H. 2021. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. Journal of Cleaner Production, 291, 125228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>
- Pruvost, F.; Cloete, S.; Dhoke, C.; Zaabout, A. 2022. Techno-Economic assessment of natural gas pyrolysis in molten salts. Energy Conversion and Management, 253, 115187. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115187>
- Reitz, R. D.; Payri, R.; Fansler, T.; Kokjohn, S.; Zhao, H. 2020. 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. 316p.
- Sabeghi, M.; Moghiman, M.; Gandomzadeh, D. 2023. Experimental study of the effect of HHO gas injection on pollutants produced by a diesel engine at idle speed. International Journal of Hydrogen Energy, 48, (24), 9117-9126.
- Sharma, P.; Dhar, A. 2018. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions. International Journal of Hydrogen Energy, 43, (15), 7570-7580. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.181>
- Singh, V.; Buelens, L. C.; Poelman, H.; Saeys, M.; Marin, G. B.; Galvita, V. V. 2022. Intensifying blue hydrogen production by in situ CO<sub>2</sub> utilisation. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 61, 102014. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102014>
- Soofastaei, A.; Aminossadati, S. M.; Kizil, M. S.; Knights, P. 2016. A comprehensive investigation of loading variance influence on fuel consumption and gas emissions in mine haulage operation. International Journal of Mining Science and Technology, 26, (6), 995-1001. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.09.006>
- Subramanian, B.; Thangavel, V. 2020. 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), 25479-25492.
- Torres, L. C. C. 2022. Case study: simulation and artificial intelligence application for the optimization of the hauling and loading process in an open-pit mining system. IFAC-PapersOnLine, 55, (39), 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.032>
- Velandy, S. M. 2011. The green arms race: Reorienting the discussions on climate change. Energy Policy, and National Security. Harv. Nat'l Sec. J., 3, 309.
- Vilaça, A. S. I.; Simão, L.; Montedo, O.; Novaes A. P.; Raupp-Pereira, F. 2022. Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. Resources Policy, 75, 102477.
- Yellishetty, M.; Weng, Z. 2021. Iron ore in Australia and the world: Resources, production, sustainability, and prospects. Chapter 22. In: Lu, L. In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Iron Ore (Second Edition): Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability, Woodhead Publishing, 2022, pp. 711-750.