

HIDROGÊNIO VERDE COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

ROBSON LAGE FIGUEIREDO¹, CARLOS ENRIQUE ARROYO ORTIZ, JOSÉ MARGARIDA SILVA²

Universidade Federal de Ouro Preto / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral¹,
Universidade Federal de Ouro Preto / Departamento de Minas País Brasil²,

<robsonlage@ufop.edu.br>, <carroyo@ufop.edu.br>, <jms@ufop.edu.br>
DOI: 10.21439/conexoes.v17i0.2858

Resumo. Na indústria de mineração, os equipamentos desempenham papel primordial na produção e operação, mas consomem quantidades significativas de energia, com destaque para os motores a diesel. Nas operações mineiras, esses motores são amplamente empregados devido à versatilidade, capacidade de carga e adaptabilidade a várias condições de terreno. No entanto, é importante observar também que apresentam alto consumo de óleo diesel e contribuem substancialmente para as emissões de gases de efeito estufa. Essa realidade ressalta a necessidade de explorar alternativas de energia renovável, como o hidrogênio verde, para reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade nas operações de mineração. Este artigo apresenta discussão do consumo de energia na mineração, das tecnologias de produção do hidrogênio, as vantagens em utilizar o hidrogênio em motores diesel e os desafios de produção, armazenamento e fornecimento. Destaca-se o hidrogênio verde, livre de carbono, alternativa emergente na descarbonização das minas.

Palavras-chaves: Hidrogênio Verde. Energia Renovável. Mineração. Descarbonização.

HYDROGEN AS RENEWABLE ENERGY SOURCE IN THE MINING INDUSTRY

Abstract. In the mining industry, equipment plays a key role in production and operation, but consumes significant amounts of energy, especially diesel engines. In mining operations, these engines are widely used due to their versatility, load capacity and adaptability to various terrain conditions. However, it is also important to note that they consume a lot of diesel fuel and contribute substantially to greenhouse gas emissions. This reality highlights the need to explore renewable energy alternatives, such as green hydrogen, to reduce environmental impact and promote sustainability in mining operations. This article discusses energy consumption in mining, hydrogen production technologies, the advantages of using hydrogen in diesel engines and the challenges of production, storage, and supply. It highlights green, carbon-free hydrogen, an emerging alternative for decarbonizing mines.

Keywords: Green Hydrogen. Renewable Energy. Mining. Decarbonising.

1 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; WENG, 2021).

O setor mineral do Brasil possui posição de destaque no cenário mundial, pois é um dos principais exportadores e beneficiadores de minério de ferro. Segundo o

IPEA(2022), o minério de ferro é uma das *commodities* metálicas mais importantes do Brasil e, junto com soja em grão, ferro, petróleo e açúcar, corresponderam por 40% das exportações brasileiras. O país possui vastas reservas de minério de ferro, que corresponde aproximadamente 19% da produção mundial, sendo grande exportador para várias regiões do mundo, especialmente

para a Ásia, onde a demanda por aço é elevada (ANM, 2022).

Na extração do minério de ferro a céu aberto, diversos equipamentos presentes 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: grande consumo de combustível, alta taxa de emissão de dióxido de carbono e altos custos de manutenção (REITZ et al., 2019). Um dos desafios associados aos motores à base de combustíveis fósseis é a emissão 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).

Assim, o consumo intensivo de óleo diesel motiva a busca por alternativas de energia renovável em sintonia com a redução do impacto ambiental resultante do uso de combustíveis derivados do petróleo. Entre as possibilidades de uso de energia renovável está o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes como solar, eólica ou hidrelétrica. O hidrogênio verde é produzido a partir das fontes citadas, por meio de eletrólise, dessa forma, é considerado uma fonte de energia limpa e renovável, sem emissões de CO₂ (SHAHABUDDIN; BROOKS; RHAMDHANI, 2023).

O hidrogênio é considerado o melhor candidato a aditivo, a ser misturado ao diesel para satisfazer às características exigidas pelo motor. 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).

Este artigo abrange discussão do consumo de energia na mineração e da intensidade energética na movimentação de material extraído. Apresenta as tecnologias de produção do hidrogênio, combustível livre de carbono, que pode ser utilizado como combustível secundário em motores a diesel, proporciona aumento na eficiência térmica, produzindo quantidade expressiva de energia na combustão, liberando vapor d'água. Em seguida, discute impactos do uso do hidrogênio no processo de descarbonização na mineração, com destaque para o hidrogênio verde, que não emite carbono.

2 CONSUMO DE ENERGIA NA MINERAÇÃO

A mineração consome grandes quantidades de energia por meio de atividades primárias, 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 (JESWIET; SZEKERES, 2016).

A mineração é um setor que demanda alto consumo energético, com cerca de 38 do consumo global de energia industrial (IGOGO et al., 2021). Segundo a Administração de Informação sobre Energia (EIA) do Departamento de Energia dos EUA, estima-se que as principais fontes de energia para a mineração são: produtos petrolíferos, eletricidade, carvão e gás natural.

No Brasil, a indústria mineral consome grandes quantidades de óleo diesel. A Figura 1 apresenta o consumo de diesel da indústria de mineração no Brasil no período de 2010 a 2021 (ANM, 2022).

Observa-se um aumento na demanda no período de 2010 a 2014. De 2014 a 2018, houve redução do consumo, retornando a curva ascendente a partir de 2018. Essa flutuação no consumo 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.

Apesar dos avanços tecnológicos nos motores atuais a diesel, especialmente com o advento do Diesel S-10 (tipo de diesel de baixo teor de enxofre), para atender a novas regulamentações das taxas de emissões, ainda é alta a concentração de dióxido de carbono e material particulado emitido por esses equipamentos (MAHMOOD et al., 2020).

2.1 Fatores que afetam o consumo de combustível e emissões de gases

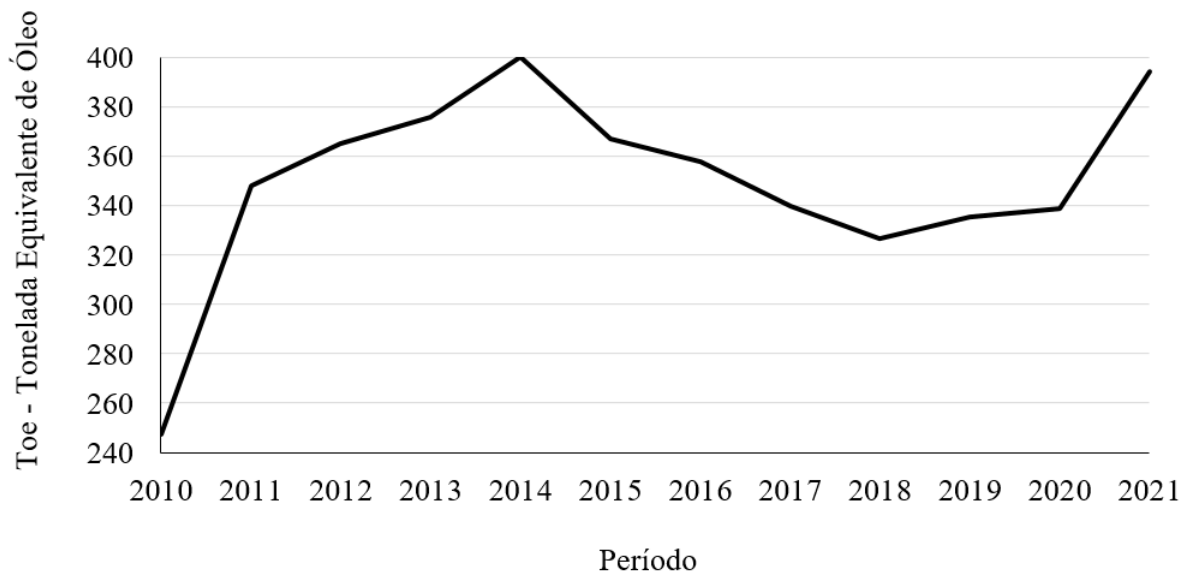
O comportamento do consumo de combustível e das emissões de carbono resultantes de um sistema de despacho pode ser afetado por vários fatores. De acordo com Runge (1998), o consumo de combustível de um caminhão fora de estrada pode ser estimado utilizando a Equação (1).

$$F_C = P \cdot 0,3 \cdot L_F \quad (1)$$

Em que: F_C é o consumo de combustível [L/h], P é a demanda de potência [kW], 0,3 é o fator de conversão da unidade [L/kW/h], e L_F é o fator de carga fornecido pelo fabricante.

Para entender o consumo de combustível nas operações de transporte de uma mina, não se deve limitar às características mecânicas dos caminhões de transporte. É necessário avaliar a influência de outros fatores no processo de produção (como rota, condições topográficas, principalmente o aumento da profundidade das cavas e elevação das pilhas de resíduos, condições climáticas, tipos de caminhões empregados nas operações,

Figura 1: Consumo de diesel na indústria da mineração no Brasil.



Fonte: ANM, 2022..

tráfego e perfil de trabalho do motorista), apresentados na Figura 2 (GOLBASI; KINA, 2022).

Os fatores apresentados na Figura 2 afetam direta ou indiretamente o consumo de óleo diesel e a emissão de gás do escapamento. Dependendo da capacidade de produção, layout da cava e movimentação de materiais, o consumo de diesel aumenta, assim como as emissões de dióxido de carbono e de material particulado.

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 pesado, tais como caminhões de transporte, escavadoras, e *bulldozers*, que requerem grandes quantidades de energia para funcionar.

Segundo Bajany, Zhang e Xia (2019) o custo de transporte pode ser de aproximadamente 35% do custo total de operação em minas de médio ou grande porte, em que, caminhões e escavadeiras são comumente empregados nas minas para carregamento, transporte de minério e estéril, devido à flexibilidade e capacidade de transportar material. Atualmente, esses equipamentos também têm sido considerados como alternativa viável para o transporte de rejeitos. Essas características os tornaram populares nas minas. Por outro lado, 40% da energia consumida em uma mina é proveniente do

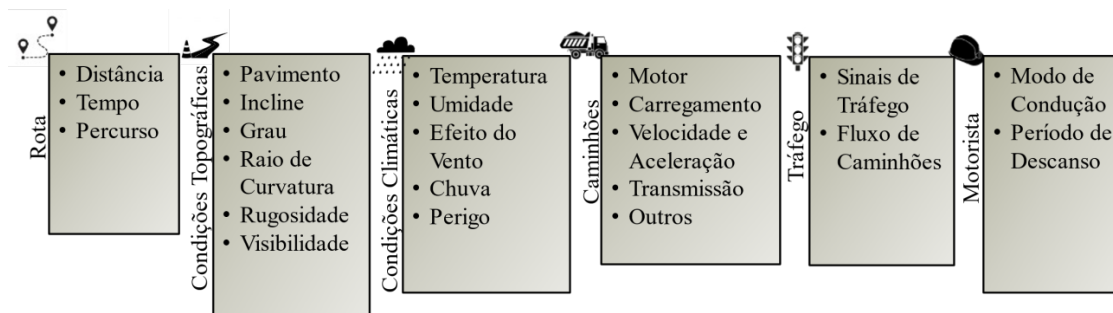
diesel e, apesar da recente melhoria na eficiência dos caminhões, ainda são os maiores consumidores na lavra (VILAÇA et al., 2022).

A queima de combustíveis fósseis em motores a diesel produz uma série de produtos que têm impactos ambientais significativos, destacando-se o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC) e materiais particulados que contribuem para o efeito estufa (GHOLAMI; JAZAYERI; ESMAILI, 2022). Veículos pesados (*Off-Highway*) emitem grandes volumes de gases do efeito estufa e têm sido um desafio para a mineração devido aos danos associados ao meio ambiente, o que representa um desafio na eficiência energética de combustíveis fósseis. Por exemplo, um caminhão fora de estrada 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 (PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021).

3 METODOLOGIA

Trata-se de uma investigação de caráter qualitativo, fundamentada em pesquisa bibliográfica sistemática, empregando bases de dados acadêmicas e científicas.

Figura 2: Fatores que afetam o consumo de combustível dos caminhões.



Fonte: Autor (Própria, 2023).

ficas relevantes para a área de pesquisa, como *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *Web of Science*, *Google Scholar* e *Scopus*. Os objetivos foram discutir e apresentar: tecnologias existentes de produção do hidrogênio, vantagens e desafios que o hidrogênio proporciona ao ser utilizado em motores a diesel e o efeito do hidrogênio no processo de descarbonização na indústria mineral.

Destaca-se o hidrogênio verde, livre de carbono, uma alternativa emergente no processo de descarbonização na indústria da mineração. 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 é a tecnologia de produção de hidrogênio mais favorável para descarbonizar as operações minerais?

4 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

O gás hidrogênio é incolor, inodoro e mais leve. O H_2 é um elemento químico com as seguintes propriedades: (i) massa molar aproximadamente 0,002016 kg/kmol; (ii) densidade em condições normais de temperatura e pressão (CNTP) cerca de 0,08988 kg/m³; (iii) calor de evaporação em torno de 0,449 kJ/kg a 25°C. Isso indica a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de hidrogênio a partir de seu estado líquido; (iv) velocidade da chama do hidrogênio é de aproximadamente 2,4 m/s; (v) limites de inflamabilidade no ar variam de 4% a 75% em volume, tornando-o inflamável em uma ampla faixa de concentrações no ar; (vi) relação estequiométrica A/F (ar/combustível) é de aproximadamente 34:1 em massa, significando que são necessárias 34 partes de ar para queimar 1 parte de combustível de hidrogênio. Em comparação com o di-

esel, a razão A/F é muito mais alta. Isso ocorre porque o hidrogênio é um gás muito leve e requer mais ar para realizar a combustão completa (JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020).

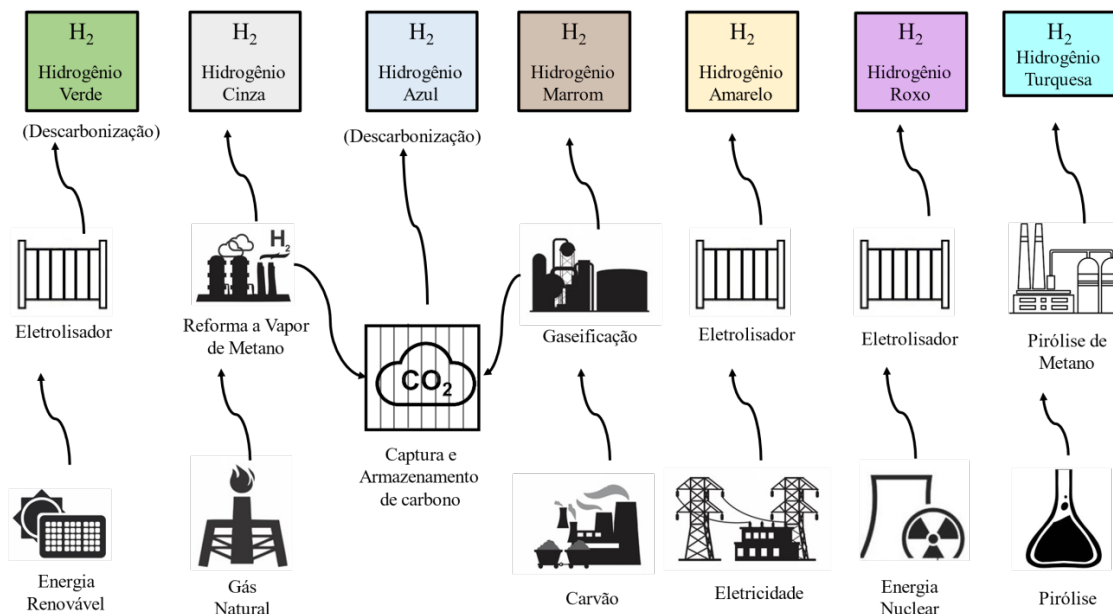
A geração de hidrogênio diferencia-se por várias formas de fontes de energia primária, que podem ser distinguidas por cores diferentes. Dependendo da tecnologia de produção, o hidrogênio é classificado nas cores verde, cinza, azul, marrom, amarelo, roxo e turquesa, ilustradas na Figura 3 (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

As principais formas da produção do hidrogênio são: (i) hidrogênio verde - obtido por eletrólise de água utilizando fontes renováveis no seu processo; (ii) hidrogênio cinza - obtido por reforma de metano a vapor ("cinza"), sem captura do CO_2 , (iii) hidrogênio azul - obtido a partir de fontes fósseis, mas captura e armazena o CO_2 produzido no processo (SMR), (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 por meio de eletricidade proveniente de energias como eólica e solar. Também é conhecido como "hidrogênio renovável", "hidrogênio limpo" ou "hidrogênio livre de carbono" (HOELZEN et al., 2022).

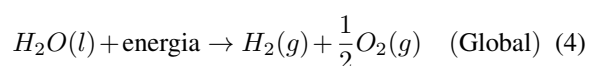
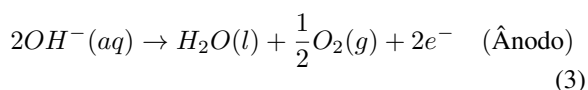
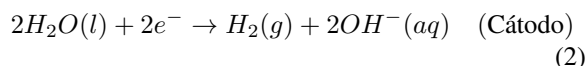
As principais tecnologia de eletrólise são: alcalina (ALK), membrana de troca de prótons (PEM) e célula de eletrólise de óxido sólido (SOEC). Na eletrólise da água alcalina (ALK) o hidrogênio é produzido utilizando eletrolisadores que são compostos pelos eletrodos e eletrólito. Os eletrodos são feitos de metais inertes como aço inoxidável, platina, irídio.

Figura 3: Principais métodos de produção do hidrogênio.



Fonte: Autor (Própria, 2023).

Os eletrólitos líquidos possuem boa condutividade iônica, quando aplicada corrente elétrica contínua. Os elétrons fluem na solução alcalina do terminal negativo, cátodo, da fonte de energia, onde são atraídos pelos íons de hidrogênio existentes na água, gerando o hidrogênio - H_2 , Equação (2). Para manter o equilíbrio alcalino no eletrolisador, os íons hidróxidos resultantes da reação catódica se movem em direção à superfície do ânodo, onde perdem elétrons (que retornam ao terminal positivo da fonte de energia) formando oxigênio - O_2 , Equação (3). A reação global da eletrólise alcalina é obtida pela Equação (4) (SUBRAMANIAN; THANGAVEL, 2020).



A membrana de troca de prótons, também conhecida como "Proton Exchange Membrane"(PEM), é utilizada nas células de combustível eletroquímicas, que

convertem energia química diretamente em eletricidade, por meio de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio, sem a necessidade de combustão. A PEM é uma fina folha polimérica que possui propriedades especiais que permitem o transporte de íons de hidrogênio (prótons) através dela, enquanto impede a passagem de íons de oxigênio(elétrons), evitando o cruzamento dos gases, como o hidrogênio e o oxigênio (KOWALSKI; FABER; CAVE, 2022).

A membrana é porosa, o que permite o fluxo de corrente, acarretando uma maior fluidez no transporte de água e gás. Comumente a membrana é composta de *Nafionou Fumapem*, materiais porosos. As células de eletrólise de óxido sólido (SOEC) são compostas de um eletrólito condutor iônico denso e dois eletrodos porosos.

A cor cinza representa o hidrogênio produzido pela reforma vapor do gás natural (SMR) metano fóssil ou gaseificação do carvão, sem captura de carbono ou pelo subproduto de processos químicos. Caso for produzido por subproduto de processos químicos pode ser classificado na cor branca. Mas também pode ser descrito na literatura 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 produzido em maiores quantidades devido a demanda de fertilizantes. A desvantagem é a emissão

de CO₂ gerada durante a sua produção, principalmente no processo de gaseificação do carvão.

A cor azul representa o hidrogênio obtido a partir de fontes fósseis utilizando a reação de reforma do metano a vapor (SMR) 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 (CCS), ou seja, produção de hidrogênio de baixo carbono (GEORGE et al., 2022).

A cor amarela representa o hidrogênio obtido através do processo de eletrólise, no qual a eletricidade é fornecida a partir da rede elétrica. Esse tipo de hidrogênio é referido como "hidrogênio amarelo" (NOUSSAN et al., 2021).

Roxo representa o hidrogênio obtido a partir da eletrólise por meio de uma corrente atômica. Também se encontra na literatura referência do hidrogênio roxo, proveniente de energia nuclear, como hidrogênio amarelo (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

A cor turquesa representa o hidrogênio obtido a partir da pirólise do metano (MP). Essa reação pode ser dividida em três processos: (i) decomposição térmica, (ii) decomposição a plasma e (iii) decomposição catalítica, é a mais utilizada. O hidrogênio turquesa ainda não é comercializado em larga escala, mas o processo térmico da pirólise é utilizado para obtenção do hidrogênio (PRUVOST et al., 2022).

A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos métodos de geração de hidrogênio. O método da eletrólise alcalina se destaca na Tabela 1, devido à sua capacidade de emitir zero CO₂ quando alimentado por eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. Além disso, possui a flexibilidade de aplicação, podendo ser escalonada para diferentes tamanhos, desde pequenas instalações para uso doméstico até grandes plantas industriais. Destaca-se, por meio desse método, a eficiência energética de 70% a 80%, custos e disponibilidade comercial. No entanto, é importante considerar suas limitações, como a densidade de corrente limitada, solução eletrolítica corrosiva e o fenômeno de cruzamento de gás. Deve-se também avaliar sua aplicação em diferentes contextos industriais e energéticos. Quando alimentada com a eletricidade da rede pode resultar em emissões substanciais de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que a geração de eletricidade em alguns países é baseada em fontes de energia fósseis, como carvão, gás natural ou petróleo.

A tecnologia de membrana de troca de prótons (PEM) oferece vantagens distintas. Destaca-se por sua eficiência energética ainda mais elevada, atingindo taxas de 90%. Ademais, a PEM opera com uma densidade de corrente bastante alta, o que resulta em uma

produção de hidrogênio mais rápida e eficaz em comparação com outros métodos de eletrólise. A pureza do hidrogênio produzido pela PEM é também excepcional, alcançando até 99,99%. Por sua vez, a PEM enfrenta desafios em relação à durabilidade, uma vez que seus componentes podem sofrer degradação ao longo do tempo, demandando substituições periódicas. Além disso, a implementação da tecnologia PEM pode ser mais onerosa devido ao custo dos componentes envolvidos, como catalisadores que frequentemente contêm materiais valiosos como a platina (BERNHARD et al., 2023).

A célula SOEC aproxima-se de uma eficiência energética de 90% a 100%. Uma outra característica importante é sua densidade de corrente elevada, que resulta em uma taxa de produção de hidrogênio significativamente maior em comparação com outros métodos de eletrólise. Tal característica torna a SOEC indicada para aplicações que demandam volumes substanciais de hidrogênio. No entanto, requerendo investimentos em infraestrutura para implementação em grande escala. Ainda em fase de laboratório, a SOEC, enfrenta os desafios que acompanham essa tecnologia, como a durabilidade dos seus componentes, que operam em altas temperaturas, na faixa de 800°C a 1.000°C (HANIF et al., 2023).

A reforma a vapor de gás natural é um método consolidado e amplamente utilizado na produção de hidrogênio na indústria. É uma tecnologia relativamente acessível e de baixo custo em comparação com outros métodos. No entanto, suas limitações, como a alta temperatura de operação, formação de coque e a emissão de CO₂ contribuem para as emissões de gases de efeito estufa (BRITO et al., 2023).

A reforma do metano a vapor sem captura de carbono é um método que se destaca por sua eficiência na conversão de metano em hidrogênio, o que resulta em uma técnica consolidada no mercado, tornando um produto competitivo em termos de custo. Entretanto, uma das principais limitações da SMR é a ausência de um sistema de captura de carbono. Isso significa que o CO₂ gerado durante o processo é liberado na atmosfera. Já a reforma do metano a vapor com captura e armazenamento de carbono, um processo que promete alta pureza de hidrogênio (99,99%), sem emissões de CO₂ e produção livre de carbono.

Mas não se pode ignorar os desafios inerentes a essa abordagem. O alto custo associado ao transporte de oxigênio (O₂) representa um ponto de atenção. A logística e a infraestrutura necessárias para o transporte eficiente de grandes quantidades de oxigênio podem encarecer o processo, o que pode afetar a competitividade do hidro-

Quadro 1: Vantagens e desvantagens dos métodos de geração de hidrogênio.

Método	Vantagens	Desvantagens
Alcalina (ALK)	Eficiência energética (70-80%) Tecnologia de baixo custo Comercializado	Densidade de corrente limitada Solução eletrolítica corrosiva Cruzamento de gás
Membrana de Troca de Prótons (PEM)	Eficiência energética (80-90%) Densidade de corrente alta Alta pureza H ₂ (99,99%)	Baixa durabilidade Componentes caros Pouco comercializado
Célula de Eletrolise de Óxido Sólido (SOEC)	Eficiência energética (90-100%) Densidade de corrente alta Alta pureza H ₂ (99,99%)	Baixa durabilidade Em fase de laboratório Não comercializado
Reforma a Vapor de Gás Natural (SMR)	Eficiência energética (90%) Tecnologia de baixo custo Comercializado	Alta temperatura Formação de coque, Emissão de CO ₂
Reforma do Metano a Vapor - sem captura de carbono (SMR)	Produção de baixo custo Tecnologia consolidada Alta escala de produção	Alta temperatura Sem capturas de carbono Emissão de CO ₂
Reforma do Metano a Vapor - com captura e armazenamento de carbono (CCS) Eletrolise	Alta pureza H ₂ (99,99%) Sem emissão de CO ₂ Carbono livre. Fonte de energia renovável Tecnologia amplamente difundida Alta pureza H ₂ (99,99%) Comercializado	Alto custo para transportar O ₂ Alto custo com energia Alto custo de produção 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

Fonte: Adaptado (SUBRAMANIAN; THANGAVEL, 2020).

gênio produzido dessa maneira (MASSARWEH et al., 2023).

Uma das principais vantagens da pirólise é sua alta taxa de produção de hidrogênio. Esse processo é capaz de extrair quantidades consideráveis de hidrogênio a partir de materiais orgânicos, contribuindo para a oferta de uma fonte limpa e abundante de energia. No entanto, é importante reconhecer os desafios que a acompanham, como o custo do reator, a complexidade da reação e a influência do catalisador na produção do hidrogênio (VUPPALADADIYAM et al., 2022).

5 EFEITO DA ADIÇÃO CONTROLADA DE HIDROGÊNIO A MOTORES 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, pois, em quantidades controladas, pode ser utilizado como combustível secundário, com o di-

esel, para auxiliar no processo de combustão (KENANOĞLU, 2021).

O hidrogênio é indicado como combustível adicional em motores de ignição movidos a diesel, devido às suas propriedades: possui ampla faixa de inflamabilidade, de 4-75%, em comparação com o óleo diesel, e 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 (BENBELLIL et al., 2022).

Krishnasamy, Gupta e Reitz (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 papel significativo no desempenho e nas emissões de gases do motor com enriquecimento de hidrogênio.
- A eficiência térmica, a potência efetiva, a pres-

são 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, os tornam um candidato viável para convertê-lo em um motor bicomustível com poucas alterações, sem grandes custos. Nesse arranjo, 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; JAZAYERI; ESMAILI, 2022).

Elnajjar et al. (2022) Kumar, Kumar e Lata (2023) evidenciam as melhorias no desempenho do motor e na redução das emissões de gases, principalmente CO, CO₂, HC e material particulado. Pirkel et al. (2022) observaram aumento no NO_x que foi o principal ponto de atenção e investigação. A temperatura na câmara de combustão é fator crítico na formação de NO_x, pois à medida que temperatura eleva, maior a probabilidade de formação de NO_x devido a disponibilidade do nitrogênio e oxigênio reagirem. Alguns estudos sugerem a redução do tempo de injeção de combustível líquido, como medida para mitigar a emissão de NO_x (KHEIRKHAH et al., 2023).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Torres (2022), emissões de gases de efeito estufa são avaliadas durante diversas etapas da produção e operação, cujos 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 CO₂ equivale, em média, a 2,70 quilogramas de CO₂ emitidos por litro de óleo diesel queimado, para veículos pesados. Para Soofastaei et al. (2016) a emissão de CO₂ dos combustíveis diesel pode ser calculada pela quantidade de combustível consumida, por meio da Equação (5).

$$\text{Emissões de CO}_2 = F_C \cdot E_F \quad (5)$$

Em que: F_C é o consumo de combustível diesel [L/h] e E_F é o fator de emissão de CO₂.

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 CO₂ na atmosfera devido à adição controlada de hidrogênio em equipamentos movidos a motores diesel.

$$E = EF \cdot A \cdot \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (6)$$

Em que: E [kg] é emissões, EF é fator de emissão [kg/kWh], A é taxa de atividade[kWh] 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 CO₂ é significativa. A transição para tecnologias baseadas em hidrogênio oferece alternativa para o processo de descarbonização na mineração.

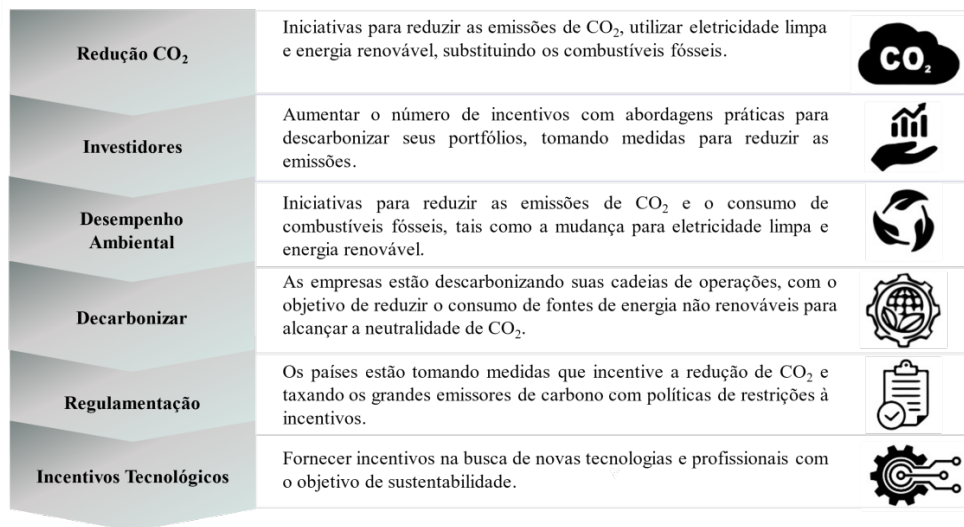
A maioria das indústrias tem se comprometido a adaptar operacionalmente para alcançar as metas de redução de emissões de carbono atmosférico, em prol do aquecimento global. Para atingir esses objetivos de descarbonização, destaca-se o hidrogênio verde, um combustível limpo, com potencial de desempenhar papel importante na transição para uma matriz energética mais sustentável. 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; GHOREISHI-MADISEH, 2023).

A descarbonização na mineração nos próximos trinta anos exigirá uma profunda transformação do setor energético em substituir os combustíveis fósseis pela eletricidade limpa e renovável. A Figura 4 apresenta os principais passos para alavancar as mudanças comportamentais na busca da neutralidade de carbono.

A Figura 5 apresenta a estimativa de custo para as tecnologias de produção de hidrogênio, segundo Ajnovic, Sayer e Haas (2022).

Nota-se que os custos finais de obtenção do hidrogênio podem ser distintos. Observa que 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.

Nota-se que os custos finais de obtenção do hidrogênio podem ser distintos. Observa que 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. Destaca-se, também, o preço de venda do hidrogênio “Turquesa”, entre \$2,92-\$3,50 USD/ kg. O custo do hidrogênio “azul” é maior em comparação com o “cinza”,

Figura 4: Passos para descarbonização


Fonte:Autor (Própria, 2023).

devido os custos adicionais para captura e 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. Ressalta-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 5, pois ainda não é produzido em escala comercial, mas pesquisas apontam estudos para fabricação e comercialização. Pesquisas apontam como desafio a adequação à operação dinâmica para gerada do hidrogênio, armazenamento, produção e abastecimento. O armazenamento acarreta outro grande desafio, desenvolver sistemas compactos, confiáveis, econômicos e seguros. Cientistas estão buscando alternativas viáveis, como diferentes tipos de materiais, mas esbarram nos custos. Segundo Qyyum et al. (2021), armazenar o hidrogênio em tanque de armazenamento de hidrogênio líquido ou tanque criogênico de hidrogênio de 100 kW possui um custo médio de \$1054 - \$1580 USD/kW. Já para tanques menores de 50 kW são mais caros têm um custo médio \$5.267 USD/kW

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração é uma das indústrias mais intensivas e suas operações dependem de combustíveis fósseis, es-

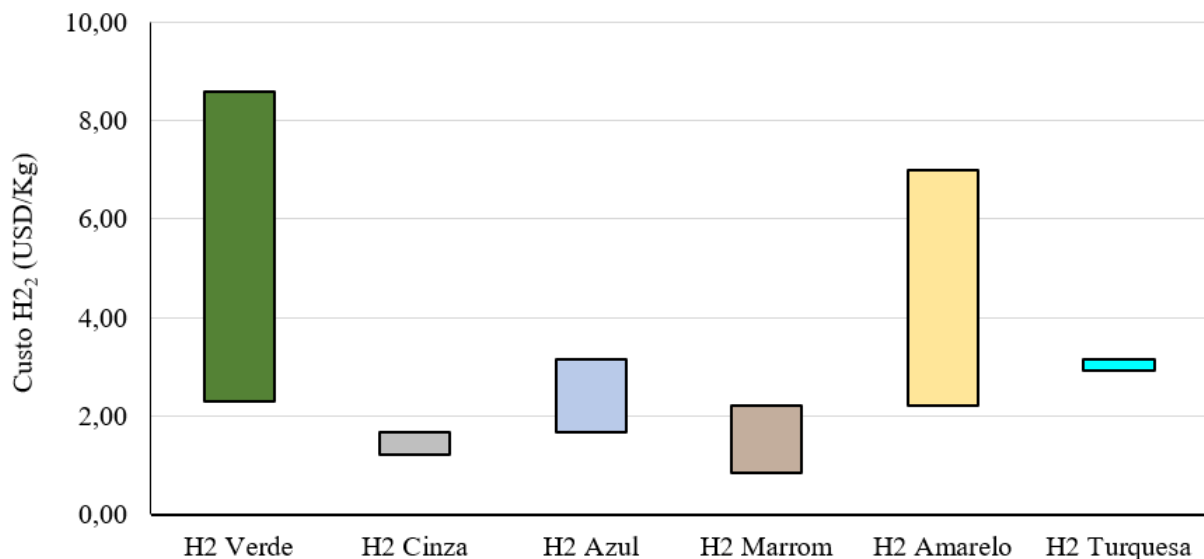
pecialmente o carregamento e transporte de minério, bem como de estéreis, ou mesmo de rejeitos, que utilizam equipamentos pesados para mover esses materiais. As indústrias de mineração estão buscando novas tecnologias para atender às novas regulamentações de impactos ambientais, especialmente as emissões de gases.

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

- Difundir a tecnologia “Economia de Hidrogênio” para aumentar a capacidade de produção e reduzir os custos.
- Viabilizar geração, armazenamento, produção e abastecimento do hidrogênio ao longo de uma cadeia produtiva.
- Avançar no armazenamento e na segurança do hidrogênio.
- Fornecer incentivos para desenvolvimento de pesquisas e projetos de tecnologia “Economia de Hidrogênio” para as indústrias.

Evidências do potencial do “hidrogênio verde” ou “hidrogênio limpo” produzido a partir da eletrólise da água são destacadas, utilizando fontes de energia renováveis e livres de carbono, aplicadas em proporção controlada com combustíveis fósseis, fornecendo uma

Figura 5: Estimativas de custo de produção de hidrogênio por tecnologia.



Fonte: Adaptado de Ajanovic, Sayer e Haas (2022).

alternativa emergente no processo de descarbonização para as indústrias de mineração.

Embora o hidrogênio desempenhe um papel crucial na transição do sistema energético, especialmente no processo de descarbonização das empresas de mineração, nem todas as operações desse setor podem ser eletrificadas a curto prazo. Embora o hidrogênio verde tenha sido apresentado como uma solução viável para descarbonizar as atividades de mineração, é essencial superar desafios relacionados à produção, armazenamento, infraestrutura, integração à rede elétrica, abastecimento e segurança.

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, dentro do 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.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Fe-

deral de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS

- AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2022.
- ANM. **Brazilian Mineral Yearbook: Main Metallic Substances**. 2022. <<http://www.anm.gov.br>>.
- BAJANY, D. M.; ZHANG, L.; XIA, X. An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open-pit mines: Case of heterogeneous fleet of shovels. **Elsevier B.V.**, v. 52, p. 207–212, 2019.
- BENBELLIL, M. A.; LOUNICI, M. S.; LOUBAR, K.; TAZEROUT, M. Investigation of natural gas enrichment with high hydrogen participation in dual fuel diesel engine. **Energy**, v. 243, p. 122746, 2022.
- BERNHARD, N. D.; B., V. H.; MARCO, P.; M., Z. M.; K., G. V. Towards renewable hydrogen-based electrolysis: Alkaline vs proton exchange membrane. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 2023.
- BRITO, J.; PINTO, F.; FERREIRA, A.; SORIA, M. A.; MADEIRA, L. M. Steam reforming of biomass

gasification gas for hydrogen production: From thermodynamic analysis to experimental validation. **Fuel Processing Technology**, p. 107859, 2023.

CARVALHO, J. A. D.; CASTRO, A. D.; BRASIL, G. H.; JUNIOR, P. A. D. S.; ZEVALLOS, A. A. M. Co2 emission factors and carbon losses for off-road mining trucks. **Energies**, v. 15, n. 7, p. 2659, 2022.

ELNAJJAR, E.; AL-OMARI, S. A. B.; SELIM, M. Y. E.; PURAYIL, S. T. P. Ci engine performance and emissions with waste cooking oil biodiesel boosted with hydrogen supplement under different load and engine parameters. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 6, p. 4793–4805, 2022.

FOORGINEZHAD, S.; MOHSENI-DARGAH, M.; FALAHATI, Z.; ABBASSI, R.; RAZMJOU, A.; ASADNIA, M. Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 489, p. 229450, 2021.

GEORGE, J. F.; MULLER, V. P.; WINKLER, J.; RAGWITZ, M. 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**, v. 167, p. 113072, 2022.

GHOLAMI, A.; JAZAYERI, S. A.; ESMAILI, Q. 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**, v. 163, p. 621–635, 2022.

GOLBASI, O.; KINA, E. E. Haul truck fuel consumption modeling under random operating conditions: A case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 102, p. 103135, 2022.

HANIF, M.; HANIF, M. B.; RAUF, S.; ABADEEN, Z. U.; KHAN, K.; TAYYAB, Z.; QAYYUM, S.; MOTOLA, M. Proton-conducting solid oxide electrolysis cells: Relationship of composition-structure-property, their challenges, and prospects. **Matter**, v. 6, n. 6, p. 1782–1830, 2023.

HOELZEN, J.; SILBERHORN, D.; BENSMANN, B.; HANKE-RAUSCHENBACH, R. Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – review and research gaps. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 3108–3130, 2022.

IGOGO, T.; AWUAH-OFFEI, K.; NEWMAN, A.; LOWDER, T.; ENGEL-COX, J. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. **Applied Energy**, v. 300, p. 117375, 2021.

JAMROZIK, A.; GRAB-ROGALIŃSKI, K.; TUTAK, W. Hydrogen effects on combustion stability, performance and emission of diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 38, p. 19936–472020, 2020.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Energy consumption in mining comminution. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 140–145, 2016.

KALANTARI, H.; GHOREISHI-MADISEH, S. A. Study of mine exhaust heat recovery with fully-coupled direct capture and indirect delivery systems. **Applied Energy**, v. 334, p. 120679, 2023.

KENANOĞLU. An experimental investigation on hydroxy (hho) enriched ammonia as alternative fuel in gas turbine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 57, p. 29638–29648, 2021.

KHEIRKHAH, P.; STEICHE, P.; WHYTE, T.; GUAN, M.; KIRCHEN, P. On-road co2 and nox emissions for a heavy-duty truck with hydrogen-diesel co-combustion. **SAE Technical Paper**, n. 2023-01-0281, 2023.

KOWALSKI, A.; FABER, G.; CAVE, E. Pem co2 electrolyzers from an industrial perspective. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100702, 2022.

KRISHNASAMY, A.; GUPTA, S. K.; REITZ, R. D. Prospective fuels for diesel low temperature combustion engine applications: A critical review. **International Journal of Engine Research**, v. 22, n. 7, p. 2071–2106, 2021.

KUMAR, A.; KUMAR, C. B.; LATA, D. B. 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**, v. 48, n. 26, p. 9895–9910, 2023.

MAHMOOD, A. A. S.; HAQI, I.; SADIL, M. D.; HARDAN, A. A. Characteristics of exhaust emissions for a diesel engine fuelled by corn oil biodiesel and blended with diesel fuel. **Engineering and Technology Journal**, v. 38, n. 3A, p. 457–464, 2020.

- MASOUDI, S.; LAHIRI, A.; BAHZAD, H.; YAN, Y. Sorption-enhanced steam methane reforming for combined CO₂ capture and hydrogen production: A state-of-the-art review. **Carbon Capture Science Technology**, v. 1, p. 100003, 2021.
- MASSARWEH, O.; AL-KHUZAEI, M.; AL-SHAFI, M.; BICER, Y.; ABUSHAUKHA, A. Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 70, p. 102438, 2023.
- NOUSSAN, M.; RAIMONDI, P. P.; SCITA, R.; HAFNER, M. The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 1–26, 2021.
- PIRKL, R.; D'ONOFRIO, M.; KAPUSTA, L.; HERRMANN, D. H₂ direct injection system for heavy duty ice in transient on- off-road operation. In: **International Commercial Vehicle Technology Symposium**. [S.l.]: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. p. 273–295.
- PRUVOST, F.; CLOETE, S.; DHOKE, C.; ZAABOUT, A. Techno-economic assessment of natural gas pyrolysis in molten salts. **Energy Conversion and Management**, v. 253, p. 115187, 2022.
- PURHAMADANI, E.; BAGHERPOUR, R.; TUDESHKI, H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p. 125228, 2021.
- REITZ, R. D.; PAYRI, R.; FANSLER, T.; KOKJOHN, S.; ZHAO. The future of the internal combustion engine. **International Journal of Engine Research**, SAGE Publications Ltd, 2019.
- RUNGE, I. C. **Mining economics and strategy**. [S.l.]: SME - Society for Mining Metallurgy Exploration, 1998. ISBN 0873351657.
- SHAHABUDDIN, M.; BROOKS, G.; RHAMDHANI, M. A. Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 136391, 2023.
- SOOFASTAEI, A.; AMINOSSADATI, S.; KNIGHTS, P.; KIZIL, M. A comprehensive investigation of loading variance influence on fuel consumption and gas emissions in mine haulage operation. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 26, n. 6, p. 995–1001, 2016.
- SUBRAMANIAN, B.; THANGAVEL, V. 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**, v. 45, n. 46, p. 25479–25492, 2020.
- TORRES, L. C. C. Case study: simulation and artificial intelligence application for the optimization of the hauling and loading process in an open-pit mining system. **IFAC-PapersOnLine**, v. 55, n. 39, p. 265–269, 2022.
- VILAÇA, A. S. I.; SIMÃO, L.; MONTEDO, O.; OLIVEIRA, A. P.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of iron ore tailings in brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resources Policy**, v. 75, p. 0–10, 2022.
- VUPPALADADIYAM, A. K.; VUPPALADADIYAM, S. S. V.; AWASTHI, A.; SAHOO, A.; REHMAN, S.; PANT, K. K.; LEU, S. Y. Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production. **Bioresource Technology**, p. 128087, 2022.
- YELLISHETTY, M.; WENG, Z. Iron ore in australia and the world: Resources, production, sustainability, and future prospects. Woodhead Publishing: Elsevier, p. 711–750, 2021.