

# REVISTA DESAFIOS

ISSN: 2359-3652

## **INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO: PERSPECTIVA DE ENERGIAS**

*ENVIRONMENTAL INNOVATIONS IN THE IRON ORE INDUSTRY: ENERGY PERSPECTIVE*

*INNOVACIONES AMBIENTALES EN LA INDUSTRIA DEL MINERAL DE HIERRO: PERSPECTIVA ENERGÉTICA*

**Raissa Helena Paiva Apolinario<sup>\*1</sup>, Maria Tereza Saraiva de Souza<sup>1</sup>, Luciana Soares da Silva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Administração, Centro Universitário FEI, Rua Tamandaré, 688, Liberdade, São Paulo 01525-000, Brasil.

<sup>2</sup> Docente, Faculdades Integradas Campos Salles, Rua Nossa Sra. da Lapa, 270, Lapa, São Paulo - SP, 05072-000, Brasil.

Aprovado em 12/2023 publicado em 29/12/2023.

### **RESUMO**

Como o setor de mineração é intensivo no consumo de energia, os recursos renováveis, apresentam-se como soluções para desafios energéticos presentes na indústria de mineração. Apesar da difusão e a adoção de inovações tecnológicas serem uma alternativa para lidar com os desafios energéticos, sua aplicação ainda enfrenta dificuldades devido a complexidades e resultados a longo prazo. O objetivo do estudo é analisar a difusão e a adoção de inovações ambientais relacionadas às energias renováveis no setor de minério de ferro brasileiro. Essa pesquisa utilizou uma abordagem metodológica qualitativa, por meio do método de estudo de casos múltiplos com os seguintes instrumentos de coleta de dados: entrevistas semiestruturadas e documentos públicos. Como contribuição apresentam-se os aspectos ambientais e operacionais do setor de minério de ferro; potenciais tecnologias de energias renováveis utilizadas no setor de mineração de ferro; e orientação para gestores da área de sustentabilidade, assim como criadores de políticas públicas do tema. As principais estratégias utilizadas pelo setor são a eficiência energética e descarbonização de energia. Porém, as tecnologias de eficiência energética e iniciativas ambientais para mitigação das emissões de GEE ainda são equacionadas entre incertezas dos riscos de investimentos e benefícios ambientais diretos e indiretos.

**Palavras-chave:** Mineração, Inovação Ambiental, Energia, Energia Renovável

### **ABSTRACT**

Given the energy-intensive nature of the mining sector, renewable resources emerge as prospective solutions to address the prevailing energy challenges within the mining industry. Despite the diffusion and adoption of technological innovations being recognized as an alternative means to confront these energy challenges, their practical implementation remains encumbered by complexities and long-term

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

outcomes. The primary aim of this study is to scrutinize the diffusion and adoption of environmental innovations pertaining to renewable energy within the Brazilian iron ore sector. This investigation employed a qualitative methodological approach utilizing the multiple case study method, along with data collection instruments such as semi-structured interviews and documents. The presented contributions encompass environmental and operational facets of the iron ore sector, prospective renewable energy technologies deployed within the iron mining domain, and guidance for sustainability managers and policymakers vested in this domain. Predominant strategies embraced by the sector encompass energy efficiency and energy decarbonization. Nonetheless, energy efficiency technologies and environmental initiatives geared towards greenhouse gas emissions mitigation still grapple with the equilibrium between uncertainties surrounding investment risks and direct as well as indirect environmental benefits.

**Keywords:** Mining, Environmental Innovation, Energy, Renewable Energy

### **RESUMEN**

Dado el alto consumo de energía en el sector minero, los recursos renovables se presentan como soluciones prometedoras para abordar los desafíos energéticos. A pesar de que la difusión y adopción de innovaciones tecnológicas se consideran una alternativa para enfrentar estos desafíos energéticos, su implementación práctica aún enfrenta dificultades. El objetivo de este estudio es analizar la difusión y adopción de innovaciones ambientales relacionadas con las energías renovables en el sector brasileño del mineral de hierro. Esta investigación empleó un enfoque metodológico cualitativo utilizando el método de estudio de casos múltiples, junto con instrumentos de recopilación de datos como entrevistas semiestructuradas y documentos públicos. Las contribuciones presentadas abarcan aspectos ambientales y operativos del sector, posibles tecnologías de energía renovable utilizadas en el sector minero del hierro, y orientación para gestores de sostenibilidad, así como creadores de políticas públicas en este ámbito. Las estrategias principales adoptadas por el sector incluyen la eficiencia energética y la descarbonización de la energía. Sin embargo, las tecnologías de eficiencia energética y las iniciativas ambientales enfrentan al equilibrio entre la incertidumbre en torno a los riesgos de inversión y los beneficios ambientales directos e indirectos.

**Descriptor:** Minería, Innovación Ambiental, Energía, Energía Renovable

### **INTRODUÇÃO**

O setor de mineração consome aproximadamente 38% do uso energético industrial global (Igogo et al., 2021), tendo como principais o consumo de energia, tanto na infraestrutura fixa como em cada etapa do processo (Immink et al., 2018). Tal necessidade faz das operações de mineração responsáveis pela geração de gases de efeito estufa (GEE), gerando impactos como o aquecimento global, destruição da camada de ozônio, poluição da água, solo e desmatamento (Adomako; Nguyen, 2023). Como alternativa, o aumento da eficiência energética oportunizaria possíveis reduções das emissões de carbono e gases de efeito estufa (Immink et al., 2018), utilização da recuperação de energia em outros processos (Igogo et al., 2021) e a implementação de energias renováveis (Kumar Katta et al., 2019).

Os recursos renováveis, apresentam-se como uma das soluções aos riscos presentes na indústria de mineração, como a escassez de água, segurança do fornecimento de energia constante e a incerteza do custo deste fornecimento – influência direta na produção e preço do produto final. Todos estes fatores influenciam a empresa mineradora e seu o negócio, sendo capaz de causar impacto na cadeia de produção (Nguyen et al., 2014). Apesar de benefícios, a inclusão de energias renováveis e tecnologias de uso eficiente de energia ainda enfrentam desafios de aplicação no setor, devido a escala e constância no fornecimento (Igogo et al., 2021). A difusão e aplicação de inovações nas atividades extrativistas de mineração permitem mitigar os impactos ambientais (Rodvalho et al., 2019).

O setor de mineração possui alguns desafios para aplicação de energias renováveis, como a carga operacional da mineração ser de 24 horas por dia, o que dificulta a flexibilidade da contratação de novas estruturas energéticas; o espaço geográfico em que o depósito de minério está localizado e barreiras e regulamentos que dificultam a adoção de tecnologias renováveis em grande escala. Apesar destes desafios, identifica-se um aumento na adoção de inovações ambientais relacionadas ao consumo energético no setor, sendo impulsionado por fatores como a redução de custos referentes a energia, metas ambientais – nacionais e internacionais, além de considerações de novos conceitos como licença social para operar (Igogo et al., 2021).

A inovação define-se como a implementação de uma ideia que gera um novo produto, processo, serviço, novo ou com melhorias significativas. Já a inovação ambiental é uma vertente da inovação que visa minimizar as consequências ambientais negativas advindas de processos, gerando valor crescente e renovando a estrutura de inovação enquanto considera fatores ambientais, sociais e econômicos no processo de inovação (Shamsuzzoha et al., 2023). A difusão da inovação explica o porquê e como um conceito é difundido na sociedade, de modo a entender o que impulsiona a adoção de uma ideia ou tecnologia (Vargo et al., 2020), como por exemplo inovações ambientais relacionadas às energias renováveis.

Na indústria de mineração a incerteza em torno do fornecimento de eletricidade contínuo e as questões de gerenciamento de emissões de carbono motivam o uso de energias alternativas na mina, sendo as energias renováveis opções viáveis, principalmente, quando combinada em sistema híbrido com armazenamento para evitar as interrupções advindas dos períodos noturnos ou meteorológicas (Votteler; Brent, 2016).

A capacidade de energias renováveis ainda representa uma fração pequena da energia total exigida pelas operações mineiras, sendo a combinação de inovações e tecnologias de energias renováveis uma das formas para enfrentar os desafios relacionados ao consumo energético do setor de mineração e seus impactos ambientais (Igogo et al., 2021). Deste modo, o objetivo do estudo é analisar a difusão e adoção de inovações ambientais relacionadas às energias renováveis no setor de minério de

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

ferro brasileiro. Para responder o objetivo proposto, optou-se por uma pesquisa qualitativa, conduzida por meio da abordagem de estudos de casos múltiplos, tendo como recorte de casos duas indústrias de mineração. Os dados foram coletados via entrevistas com colaboradores das mineradoras e especialistas do setor, além de documentação pública de órgãos do setor. Optou-se pela indústria de minério de ferro como objeto de estudo devido a sua importância no PIB nacional e sua escala de produção no Brasil (Agência Nacional de Mineração, 2023).

A pesquisa contribui teoricamente ao apresentar os aspectos ambientais e operacionais do setor de minério de ferro - envolvido em grandes passivos ambientais como rompimentos de barragens ocorridos em Mariana, 2015, e Brumadinho, 2019, bem como identifica potenciais tecnologias de energias renováveis utilizadas no setor de mineração de ferro para lidar com o consumo intensivo de energia dos processos de lavra e beneficiamento. O estudo apresenta como contribuição gerencial, direcionamentos para gestores e coordenadores da área de sustentabilidade do setor, assim como para o desenvolvimento de políticas públicas e regulamentação ambiental, que estimulem o uso das energias renováveis nessa indústria.

### **Difusão da Inovação Ambiental**

A difusão da inovação é uma peça de um conjunto de criações do próprio processo de inovação, refletindo a integração de novas ideias e soluções dentro de uma estrutura social. Logo, a difusão faz parte do processo de inovação - evolução do conhecimento útil, que acontece por meio de diversos ciclos e difusão e institucionalização, havendo a necessidade de feedbacks dentro deste sistema e sendo dependente de estruturas e arranjos institucionais dominantes para continuar as melhorias e inovações (Vargo et al., 2020).

Em contraponto, em que pese a difusão da inovação possuir agentes que incentivem a adoção de inovações tecnológicas ambientais, ainda é um desafio devido a sua complexidade e resultados de longo prazo. Dessa forma, é importante avaliar os efeitos da inovação e a sua inserção na organização, ou seja, dividir o processo em etapas se faz útil como uma maneira de lidar com as incertezas e entender sua complexidade na orientação estratégica da organização. Na divisão do processo de análise da inovação há uma sequência de processos: a) início – análise dos benefícios potenciais para o desempenho e negócios da organização; b) adoção - decisão sobre a utilização da análise de negócios; e c) assimilação – análise da utilização da tecnologia após a adoção; de modo a avaliar o sucesso da assimilação destas inovações tecnológicas (Nam et al., 2019).

Nesse sentido de internalização, os gerentes de organizações tendem a orientar estrategicamente suas decisões de modo a abordar questões ambientais e sociais específicas, que são tratadas pela mídia, órgãos regulatórios, mercado, entre outros. Permitindo que a difusão tenha

respaldo no gerenciamento de riscos e na obtenção de experiências temporais, de modo a construir uma curva de aprendizagem e de confiança, criando situações confiáveis e vantagens relativas ao novo sistema (Burritt et al., 2019).

Como barreira para a difusão da inovação destaca-se a pressão advinda do mercado, que em alguns casos não é benéfica para a organização, já que não há tempo hábil para adquirir os conhecimentos e as habilidades necessárias para novas assimilações, seja pela empresa ou pelo seu corpo diretivo (Nam et al., 2019). Outro ponto fundamental, são as restrições empresariais orçamentárias perante o escopo das inovações organizacionais (Burritt et al., 2019), como por exemplo, regulatório ou de mercado.

Em relação à inovação ambiental, esta impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias, produtos e processos que promovem mitigação dos impactos ambientais, sendo importante para um futuro sustentável a longo prazo, uma vez que auxilia na diminuição das emissões de gases nocivos devido ao efeito de estufa, adaptar-se às alterações climáticas e aumenta a eficiência energética (Agrawal et al., 2023). Porém, mesmo que se compreenda tais benefícios potenciais ambientais como vantagens competitivas, ainda é possível identificar dificuldades na aplicação de soluções inovadoras focadas em mitigação do impacto ambiental (Kanda et al., 2019).

Alguns benefícios da inovação ambiental são a redução de custos de produção por meio da ecoeficiência, redução de emissões, gerenciamento de resíduos e design ecológico (Leitão et al., 2019). Sendo resultado de ações orientadas à questão ambiental para o tomador de decisão (Arranz et al., 2019), por meio do uso eficiente de energia e recursos, mitigando os desperdícios do processo de manufatura (Leitão et al., 2019). Este conceito propõe uma mudança no processo produtivo da organização a fim de reduzir o uso de recursos na fabricação de um produto ou serviço e incentivada pelas capacidades de inovação da organização que a utilizam, além de agregar a ecoeficiência, mostrando sua importância à medida que traz mudanças que integram o uso tecnologias limpas (Liao et al., 2018) e energias renováveis.

### **Etapas do Processo Produtivo e Consumo Energético da Indústria de Minério de Ferro**

O início do processo de lavra acontece na etapa de perfuração. É o processo que perfura os poços em que os explosivos da próxima etapa serão depositados no corpo de minério. Os equipamentos de perfuração consistem em diversos tipos de brocas e caminhões de explosivos, sendo que a energia para movimentar as brocas pode ser de eletricidade, diesel ou ar comprimido, variando de acordo com a capacidade e escala de produção da mina. A etapa seguinte é a explosão, responsável pela extração do minério por meio da energia consumida de explosivos aplicados nos poços de

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

explosão. A atenção na operacionalização desta etapa garante a otimização das etapas seguintes, principalmente para o consumo energético e a economia de energia (Norgate; Haque, 2013).

O carregamento e transporte são consideradas as etapas finais da lavra do minério. As rochas fragmentadas na etapa anterior são carregadas nos modais de transporte por meio de um conjunto de equipamentos de abastecimento. A quantidade e tipos de equipamentos dependem da escala de produção da mina. A maior parte dos modais de transporte utilizados na mineração, principalmente os caminhões de carga *off-road*, são alimentados por combustível fóssil, acarretando uma grande emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Norgate; Haque, 2010), além de outros fatores como poeira mineral, ruído e vibrações, que impactam ambientalmente e socialmente as comunidades ao entorno e o ecossistema natural (Rodvalho et al., 2019).

O início do processo de beneficiamento se dá na etapa de trituração é responsável pela redução do tamanho das rochas e minérios extraídos na mina em partículas grossas ( $\geq 5$  mm) (Norgate; Haque, 2010). Este é um dos processos que mais consome energia da indústria de mineração (Zuo et al., 2015). O processo de moagem é a etapa seguinte e seu papel é a redução das partículas grossas em partículas finas ( $\leq 0,1$  mm ou 100  $\mu$ m) e os equipamentos são geralmente alimentados por energia elétrica ou combustíveis fósseis (Norgate; Haque, 2010). Logo nesta etapa, também há um grande gasto de energia no uso de equipamentos visando a otimização das etapas seguintes.

O processo de moagem pode ser realizado a seco ou em solução líquida, chamada de moagem úmida, a escolha do processo depende da escala e da operação da mineradora. O processo de moagem a seco consome de 15 a 50% mais energia para fragmentar a mesma quantidade de partículas que a moagem a úmido, sendo que o processo a seco apresenta desgastes menores no minério, ou seja, mais partículas aglomeradas e superfícies mais ásperas. Por outro lado, o processo de moagem úmida consome menos energia, porém há um maior desgaste no revestimento do equipamento devido à umidade e o desgaste do minério é superior, ou seja, partículas mais finas são formadas neste processo gerando um impacto no resíduo mineral. Logo, a escolha do tipo de moagem é importante para a otimização do processo de separação sólido-líquido - devido ao tamanho das partículas, e o gerenciamento ambiental do contexto da mina – tanto energéticos como hídricos (Chelgani et al., 2019).

Após a trituração e moagem é feito o processo de separação, em que as substâncias valiosas são separadas das substâncias indesejadas com base em diversos fatores das propriedades físicas dos minérios e no resultado comercial do minério (Norgate; Haque, 2010), sendo estes parâmetros finais fundamentais na determinação da eficiência, desempenho e precisão dos processos de classificação, consequentemente na eficiência energética do processamento. Para isto, muitas técnicas foram desenvolvidas a fim de melhorar o beneficiamento do minério (Ponomar et al., 2018), sendo as mais

comuns: i) separação magnética (Wang et al., 2018); ii) separação gravimétrica; e iii) flotação. Este último sendo o método de separação que mais apresenta alertas de impacto ambiental, pois consome muita energia elétrica (Norgate; Haque, 2010) e envolve diversos reagentes químicos ao tanque de rejeitos (Wang et al., 2018).

As características do minério podem influenciar o consumo de energia e a forma que é realizado o gerenciamento energético da mina (Nguyen et al., 2014), uma vez que o tipo e o grau do minério e a localização da jazida podem interferir nas etapas do processo e conseqüentemente no consumo de energia, gerando uma alta variabilidade de operações de mineração, plantas e equipamentos para diferentes minas (Kumar Katta et al., 2019). Deste modo, sobre a questão energética, a mineração é dividida em duas categorias, sendo elas: fora da rede elétrica – lavra - e conectada à rede elétrica - beneficiamento. Destaque para as operações fora da rede, que em sua maioria, dependem de combustíveis fósseis, como diesel, óleos pesados e carvão para geração e transporte no local da mina (Igogo et al., 2021).

Estima-se que globalmente a utilização do sistema de bombeamento consome 15% da energia elétrica global disponível e o sistema de moagem até 4% (Jeswiet; Szekeres, 2016). As operações de britagem e moagem e o carregamento e transporte de minérios, respectivamente, utilizam 44% e 17% da energia de todo do setor mineração (Kumar Katta et al., 2019). A indústria de mineração consome aproximadamente mais de um terço do uso global de energia industrial, sendo que as condições de emissões de GEE estão divididas respectivamente, aproximadamente 29% do uso de eletricidade e 71% de combustíveis fósseis (McLellan et al., 2012).

Outro ponto relevante em relação ao consumo de energia do setor está relacionado ao aumento da profundidade devido à baixa concentração de minério que tem reduzido em depósitos que são explorados a longo prazo, tornando a extração mais complexa e exigindo novos processos e tecnologias. Essa complexidade da extração acarreta o aumento de energia para retirar a mesma quantidade de minério de novas jazidas, do que daquelas já existentes (Kumar Katta et al., 2019). Deve ser considerado ainda, o estágio de vida da mina e o teor de minério, que declinam ao longo dos anos, resultando no aumento da distância do poço de extração, aumentando assim, o gasto no transporte do poço até o beneficiamento do minério (Immink et al., 2018).

Assim, a redução no consumo de energia e nas emissões de gases com efeito de estufa, depende da combinação das tecnologias no desenvolvimento de energias renováveis, vista como solução para enfrentar desafios energéticos no setor (Igogo et al., 2021).

### **Energias Renováveis no setor de mineração**

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

O alto consumo elétrico pelo setor de mineração pode ser contraposto com estratégias, na gestão de eficiência energética da mina, a descarbonização da energia consumida (McLellan et al., 2012) e principalmente, o uso de energias renováveis. Este último apresenta-se como uma grande alternativa, uma vez que não poluem o meio ambiente e não emitem gases de efeito estufa durante seu período de operação. Portanto, auxiliam na redução dos impactos ambientais advindos dos processos industriais de extração e beneficiamento de minerais, servindo como base de metas ambientais e políticas relacionadas ao combate dos impactos negativos das mudanças climáticas (Igogo et al., 2021; Xue et al., 2015).

A instalação eólica é uma forma econômica de geração de energia limpa e renovável, porém adequada somente em alguns contextos e localidades geográficas específicas, pois dependem de condições meteorológicas diretas. Como por exemplo, vento suficientemente forte ou que devem ser desativadas durante ventos fortes, furacões e risco de qualquer tipo de tempestade, necessitando de um maior monitoramento (Strang, 2017). Em relação à energia eólica, as instabilidades estruturam-se na dependência das condições meteorológicas - podendo variar da ausência de vento a ventos fortes - é importante a análise e o estudo do perfil de ventos da região de localização do depósito de minério. Desta forma a fonte de energia eólica é viável para a indústria de mineração em complemento à energia hidrelétrica, pois assim a intermitência meteorológica não prejudica as operações (Votteler; Brent, 2016).

A instalação solar é um método econômico de geração de energia verde (Strang, 2017), porém a indústria de mineração possui um consumo de energia constante, sendo necessários sistemas de armazenamento ou sistemas híbridos para solucionar as intermitências de abastecimento das fontes de energia renováveis (Votteler; Brent, 2016), nos mesmos moldes da energia eólica. A geração de eletricidade por energia solar é possível, porém apresenta algumas limitações de localização geográfica e depende de variações climáticas para atingir a capacidade mínima, como por exemplo, luz solar direta em um ângulo específico (Strang, 2017).

A instalação hídrica é um meio econômico de geração de energia limpa e renovável, utiliza a energia cinética da água para mover as turbinas e produzir eletricidade sem conversão ou perda adicional, sendo uma forma eficaz e confiável de geração e de sistema de armazenamento de eletricidade. Porém, este método apresenta algumas controvérsias ao conceito de ambientalmente renovável, já que possui efeitos socioambientais negativos – como o desmatamento e a necessidade de grandes áreas para construção das barragens para acúmulo da água (Strang, 2017).

Ainda assim, a energia hidrelétrica é vista como estável, pois consegue gerar energia independentemente das condições meteorológicas, e por gerar poucas emissões de GEE comparado a outras formas de energia não renováveis. Para viabilizar as instalações hidrelétricas é necessário que o

país possui potencial hídrico para armazenamento e abastecimento das usinas. É uma matriz energética amplamente utilizada na indústria de mineração que possui características geológicas favoráveis, como é o caso do Brasil. Esta matriz é vista como uma alternativa promissora para reduzir as emissões do setor, comparadas às fontes convencionais de geração de energia, como o carvão, o diesel, o gás (McLellan et al., 2012).

O biocombustível é produzido com base em recursos renováveis, porém não são neutros em carbono, ou seja, possuem baixas emissões de carbono, se comparado com os combustíveis fósseis (McLellan et al., 2012). Embora a produção sustentável de biomassa ainda não possa alcançar a escala de produção exigida pela indústria de mineração, é uma ótima opção como matéria-prima para a mineração fora-da-rede, como os processos da lavra (Igogo et al., 2021). O biocombustível líquido é visto como uma energia alternativa ao combustível fóssil, utilizado pelos caminhões *off-road*, e é uma das alternativas viáveis para o transporte rodoviário a curto e médio prazo, pois pode aproveitar a infraestrutura de distribuição dos combustíveis tradicionais. Outro ponto positivo dos biocombustíveis, é que sua produção pode gerar coprodutos com valor potencial para outras indústrias auxiliando na circularidade do sistema (Whitaker et al., 2010).

O combustível líquido é o principal transportador de energia na indústria de mineração, especialmente o diesel – utilizado muito nos meios de transporte e maquinário de carregamento, está ligado a infraestrutura fixa do projeto da mina, que é um setor intensivo em consumo de energia. O biodiesel é uma alternativa ao diesel convencional, pois possui menor fator de emissão, sendo uma oportunidade em potencial para a redução das emissões de GEE (Immink et al., 2018).

Desse modo, existem diversas fontes de energias renováveis que podem ser aplicadas ao setor de mineração, apesar de desafios como a larga escala de intensidade devido a operação 24h nos processos produtivos minerais (Igogo et al., 2021). Embora a maioria do modais de energia renovável apresente variabilidade de fornecimento, outro desafio para as operações mineiras, a junção de sistemas híbridos e de armazenamento de energia podem mitigar esta variabilidade, sendo uma ótima alternativa para o uso de combustíveis fósseis e descarbonização do setor (Igogo et al., 2021; Votteler; Brent, 2016).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Essa pesquisa utilizou uma abordagem metodológica qualitativa, por meio do método de estudo de casos múltiplos. Optou-se pelo objeto de pesquisa da indústria de minério de ferro, principalmente nas etapas de lavra e beneficiamento, considerando a importância deste setor conforme descrito no Anuário Mineral Brasileiro (ANM), pois o minério de ferro é a principal substância metálica na produção bruta e comercialização. A seleção dos casos múltiplos foi baseada no critério

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

das principais empresas que atuam no setor de minério de ferro na região de Minas Gerais (Brasil) e que atuam com processamento a úmido - separação do minério por meio aquoso. Além dos casos selecionados, optou-se por agregar entrevistas de especialistas como forma de trazer mais robustez ao estudo, ao acrescentar informações de agentes diretos e indiretos ao setor aumentando os dados para triangulação de informações na análise dos resultados. O Quadro 1 apresenta a relação dos entrevistados.

Quadro 1 - Relação dos entrevistados da pesquisa

<b>Categoria</b>	<b>Cargo</b>	<b>Código</b>
Caso 1	Coordenadora de Desenvolvimento Sustentável – Gerência de Meio Ambiente – Mineradora 1	EMP1- A
	Especialista em Energias – Mineradora 1	EMP1-B
Caso 2	Engenheiro Especialista – Mineradora 2	EMP2-A
Especialistas	Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento – Instituto Brasileiro de Mineração	ESP1
	Gerente de Sustentabilidade – Instituto Brasileiro de Mineração	ESP2
	Diretora Executiva – Empresa de Consultoria em Mineração	ESP3

Fonte: Elaborado pelos autores

Utilizou-se como instrumentos de coleta de dados a entrevista semiestruturada e análise documental. Baseado nos conceitos utilizados no trabalho, criou-se categorias para orientar a construção do roteiro de entrevistas semiestruturadas e a análise de conteúdo das entrevistas e documentos, sendo elas: como é o consumo atual de energia na mina, considerando os processos de lavra e beneficiamento; utilização de energias renováveis; e a difusão e adoção de inovações relacionadas ao consumo energético da mina - desde o desenvolvimento, projetos e metas organizacionais.

As entrevistas semiestruturadas foram realizadas via plataforma online, gravadas – com autorização dos entrevistados - e transcritas para auxiliar na análise de conteúdo dos dados. Utilizou-se as transcrições das entrevistas para análise de conteúdo individual dos casos *a priori*, para logo em seguida realizar análise comparativa entre os casos, baseando as análises em categorias. Baseando-se as análises em categorias-chaves de energias renováveis na mineração como forma de identificar semelhanças e diferenças significativas entre os casos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa, relacionados às fontes de energia e energias alternativas, expondo um comparativo entre os casos do estudo baseado na coleta de dados nas entrevistas e documentos, conforme observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Quadro síntese da análise das categorias entre as mineradoras selecionadas como casos da pesquisa

<b>Categorias de Análise</b>	<b>Mineradora1</b>	<b>Mineradora2</b>
Consumo de energia no processo de Lavra	Principalmente o Combustível Fossil, transportado em veículos e depósitos até o beneficiamento	Principalmente o Combustível Fossil, transportado em depósitos até o beneficiamento
Consumo de energia no processo de Beneficiamento	Energia Elétrica advinda do SIN (Sistema Interligado Nacional)	Energia Elétrica advinda do SIN (Sistema Interligado Nacional)
Projetos para adoção de energias limpas e renováveis	Projetos que visam a utilização de energia solar, eólica e biogeradores	Projetos que visam a utilização de energia solar, eólica e combustíveis verdes/combustíveis sintéticos
Metas direcionadas para o tema (consumo de energia eficiente, a redução de emissões de GEE)	Metas visando a melhoria da eficiência energética em 30% até 2030. Assim como a redução de 8% de energia em relação a projeção usual e implementação de projetos prioritários para atingir meta de 2030.	Metas alinhadas com o acordo de Paris, com foco em ser neutra em 2050 e metas visando a redução de emissões de GEE.
Desenvolvimento de parcerias para projetos relacionados ao tópicos	Internamente (entre unidades da empresa mineradora), assim como agentes externos	Desenvolve parcerias com stakeholders internos e externos, com o objetivo de diversificar o portfólio de tecnologias para viabilizar a sustentabilidade financeira.
Projetos de P&D para inovação no consumo eficiente e menor impacto ambiental	Projetos que focam na adoção de energia solar e energia eólica em suas unidades de negócio, com baixa emissão de carbono. Como a atingir o objetivo de mudar a economia atual para uma economia de baixo carbono.	Projetos que visam o fornecimento de energia limpa, como por exemplo, combustíveis verdes, HVO (óleo vegetal hidrotratado), caminhos de hidrogênio.

Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação às fontes de energia, a Mineradora 1 utiliza o diesel no processo de lavra e a energia elétrica, no processo de beneficiamento (EMP1-B). No caso da lavra, o alto consumo de diesel está relacionado aos meios de transporte, como os caminhões. E em relação a etapa de beneficiamento, utiliza-se a energia elétrica advinda de hidrelétricas da região e do Sistema Interligado Nacional (SIN) (EMP1-A e EMP1-B) – sistema de transferência de energia entre subsistemas por meio da malha de transmissão e interconexão de sistemas elétricos do Brasil. Para a Mineradora 2 no beneficiamento - o processo de britagem, peneiramento, flotação não são processos que têm um impacto ambiental significativo. Já a lavra é considerada de alto impacto ambiental em relação às emissões, considerando que os caminhões fora-de-estrada são atualmente os maiores emissores utilizados no processo. O caminhão fora-de-estrada é muito utilizado devido a sua flexibilidade para as operações minerais. Outros tipos de tecnologias com uma pegada ambiental menor, como a correia transportadora, são muito inflexíveis e com alto investimento inicial (EMP2-A).

Conforme apontado em pesquisas anteriores (McLellan et al., 2012; Norgate; Haque, 2010; Rodvalho et al., 2019), o imperativo de proteção ambiental e a preocupação com o uso eficiente de

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

energia está relacionada com o nível de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) gerado, principalmente, pelos combustíveis fósseis, que são muito utilizados pelas empresas mineradoras estudadas nos processos de lavra, com os caminhões fora-de-estrada. Na Mineradora 1 há um monitoramento mensal destas emissões de GEE por área de empreendimento, chamado Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa, com a finalidade de entendimento e controle deste consumo (EMP1-A), além da adoção de tecnologias e métodos ao processo para a utilização energética eficiente (EMP1-B). Já a Mineradora 2 possui metas alinhadas com o acordo de Paris, com foco em ser neutra em 2050 e metas de redução de emissões. A empresa está estudando diversas formas de incentivar empreendimentos de baixas emissões por meio de bônus da avaliação econômica, como uma forma de priorizar projetos que possuam uma pegada ambiental menor, mas que não são ainda competitivos financeiramente. Deste modo, a empresa tende a escolher os projetos que utilizam novas tecnologias que possuam menor impacto ambiental (EMP2-A).

Como forma de mitigar este consumo intensivo de energia e as emissões de GEE, a Mineradora 1 possui projetos para ampliar o uso de energias alternativas globais, ou seja, aplicado em cada mina da empresa pelo mundo, não somente limitado a mina de minério de ferro (EMP1-A). Para o complexo da Mineradora 1 localizado aqui no Brasil, há projetos em fase de desenvolvimento para a utilização de biodiesel, como uma forma de impactar menos o meio ambiente e uma alternativa ao alto consumo de diesel dos caminhões fora-de-estrada (EMP1-B). A Mineradora 2 desenvolve projetos referentes ao consumo de energia e redução de emissões, com diferentes escopos, incluindo fontes fixas e móveis. Há projetos com o objetivo de eletrificação de equipamentos e processos, combustíveis alternativos, outras fontes de energia e até mesmo a troca de processos existentes. Como exemplo deste último item, a substituição de caminhões fora-de-estrada, que consomem diesel, por correia transportadora; ou substituição de combustíveis não renováveis por combustíveis renováveis. A mineradora percebe como investimento positivo, aqueles projetos que auxiliam na redução do impacto ao meio ambiente e reduzem os gastos em paralelo. Atualmente possui um mix de energia renováveis, não somente no Brasil, mas em outros países de operação (EMP2-A). Como apontado na literatura (Whitaker et al., 2010; Immink et al., 2018, McLellan et al., 2012) o biodiesel apresenta-se como uma oportunidade em potencial para a redução das emissões de GEE, sendo possível identificar a procura do setor mineral por esse tipo de alternativa em seus processos.

A Mineradora 2 está estudando formas de fornecimento de energia limpa. O setor estuda diversas opções como combustíveis verdes, HVO (óleo vegetal hidrotratado), caminhões de hidrogênio, entre outros. Porém, um grande desafio é que no processo de lavra existem diversas variáveis que afetam a adoção de cada tecnologia, por exemplo, a geometria da cava e a vida restante do ativo da mina. “Não tem uma solução única que vai atender a todas as minas”. Assim, são

necessárias soluções customizáveis, porém ainda há incertezas sobre o fornecimento deste tipo de tecnologia no futuro (EMP2-A). A seleção e desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao processo, pode mitigar os impactos ambientais e otimizar o fornecimento energético, principalmente no setor mineral (McLellan et al., 2012).

Os desafios para a difusão e adoção de inovações e iniciativas ambientais, principalmente, as dificuldades gerais da difusão de tecnologias e projetos ligados a questão energética e de inovação industrial são: engajamento das partes interessadas e o fato de que a inovação é aplicada ao processo e não ao produto, como é o caso de outros produtos tecnológicos (EMP1-B). Um ponto relacionado ao tópico de energias alternativas e que pode ser uma exigência do mercado internacional e impactar as Mineradoras, é a taxaço do carbono. O mercado de carbono já influencia a empresa em outros países de atuação da mineradora, porém ainda não há taxaço aqui no Brasil, entretanto há expectativas que o tema vá se definir nos próximos anos (EMP1-B). A taxaço de carbono pode diminuir as incertezastanto do mercado quanto do retorno incerto de potenciais investimentos a serem realizados nos processos e aplicados ao setor mineral, que visam uma descarbonização das fontes energéticas.

Para a Mineradora 2, a pressão como o incentivo, resulta de agentes internos e externos. Uma mudança de colaboradores internos que começam a apresentar preocupações ligadas a geração de gases de efeito estufa, e a demanda dos *stakeholders* por iniciativas que objetivem reduzir a pegada ambiental (EMP2-A). Em seu portfólio de projetos para atender as metas propostas, a Mineradora 2 possui opções de alto custo e poucas soluções comerciais, a maturidade tecnológica de alternativas para redução de emissões é muito baixa (EMP2-A). O baixo nível de maturidade das tecnologias causa um excesso de opções o que dificulta a escolha do melhor caminho a seguir, não apenas do lado da empresa, mas também do lado dos fornecedores. É importante que o setor defina os seus rumos e estabeleça parcerias para que as soluções sejam desenvolvidas no tempo certo (EMP2-A).

A Mineradora 1 possui um grupo técnico em sustentabilidade, responsável por definir diretrizes para padronizar as unidades de negócios global em diversas áreas, entre elas energia e carbono. De modo a atender condutas de licenciamento e de *compliance* dos países com diferentes níveis de rigor na regulamentação. Por exemplo, a legislação ambiental da África do Sul é muito menos restritiva do que a legislação do Brasil, logo há uma necessidade de padronizar o processo das unidades para garantir que as atividades não causem impacto ao meio ambiente ou a comunidades próximas, igualmente para os dois países (EMP1-A). Desse modo, a energia renovável, além de mitigar a emissão de poluentes atmosféricos, auxilia no atendimento da regulamentação e políticas ambientais (Xue et al., 2015).

Outras iniciativas, como o lançamento do Plano de Mineração Sustentável em 2018, contém metas definidas para as unidades de Negócio e a empresa, de uma forma global, paraserem cumpridas

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

até 2030. Este plano visa a melhoria da eficiência energética, por meio de uma meta principal, melhorar a eficiência energética em 30% até 2030. Por meio de metas complementares como redução de 8% de energia em relação à projeção usual e implementação de projetos prioritários para atingimento da meta de 2030. Sendo que as preocupações deste plano de mineração são relacionadas com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (EMP 1-A), principalmente à ODS 7, Energia Limpa e Sustentável.

Para atingir esta eficiência energética, identificou-se em entrevistas a realização de projetos pela Mineradora 1 para a adoção de energia solar e energia eólica em suas unidades de negócio, com baixa emissão de carbono. Sendo que há a implementação de projetos com o objetivo de mudar a economia atual para uma economia de baixo carbono, por meio de alternativas energéticas. Como por exemplo, o investimento no contrato de produção de energia solar e eólica para o abastecimento da mina de minério de ferro do Brasil e cidades próximas (EMP 1-A). Apesar das limitações dos sistemas eólicos e solares, de acordo com pesquisas anteriores (Strang, 2017; Votteler; Brent, 2016), identificou-se que há um potencial de mudança para redes energéticas de baixo carbono, visto seu potencial de fornecimento energético junto a possibilidade de redução de custos.

Em entrevista com especialista, destaca-se que há a possibilidade de identificar no Balanço Energético, documento do Ministério de Minas e Energia, que o principal uso de energia no setor de mineração ainda é de matriz fóssil - óleo diesel para uso nas operações – e energia elétrica – advindas de concessionárias (ESP2), como mencionado também pela Mineradora 1 e 2. Há autores (McLellan et al., 2012) que apontam a energia hidrelétrica como uma alternativa promissora para reduzir as emissões do setor, comparadas às fontes convencionais como o carvão, o diesel e o gás.

A dificuldade para análise de evolução em relação aos dados energéticos do setor, em entrevista com especialista destacou-se a obscuridade no levantamento de dados técnicos referentes ao setor mineral o que dificulta o controle e acompanhamento da evolução ou do declínio relacionado ao consumo do setor. Considerado os dados energéticos para o setor há duas opções de informações para análises e estudos, sendo o Balanço Energético Nacional – porém com uma restrição já que o dado é considerado para todo o setor de mineração, não havendo um recorte para o setor específico de minério de ferro; ou os relatórios de sustentabilidade específicos de cada mineradora que os publicam periodicamente.

Ao analisar o Balanço Energético Nacional, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que presta serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), podemos afirmar que o setor de mineração é considerado junto com a produção nos valores energéticos, não permitindo uma análise isolada por recorte de processos de lavra ou beneficiamento. As principais fontes para o setor, considerando dados de 2018, são eletricidade (40,80%), gás natural (15,63%), coque petróleo

(14,73%) óleo diesel (11,75%), carvão mineral coque (11,53%), entre outros. Sendo assim, neste relatório as únicas fontes de energia renováveis são gás natural (15,62%) e biodiesel (1,18%), que possuem um baixo consumo quando comparados ao consumo de diesel normal, sendo que não é especificado, no documento, de quais fontes vem esta energia elétrica. O setor de mineração é conservador na questão do uso de energia, não destacando tantos esforços para a questão de eficiência energética, além de formas de gestão do gerenciamento do consumo de energia em horário de pico de uso.

Pesquisas mostram (Burritt et al., 2019; Leitão et al., 2019) que a substituição de tecnologia está relacionada com o equacionamento estratégico entre vantagens adquiridas e custo deste novo investimento. Em empresas que possuem metas de sustentabilidade, a adoção de tecnologia na empresa é mais fácil com a inclusão destas metas no P&D na rota de incentivos de investimentos. Logo, a questão do custo é uma barreira organizacional para a difusão e adoção de inovações ambientais que incentivem a implantação de matriz energética renovável da empresa (ESP3).

Um ponto que pode servir como determinante de alterações no processo e iniciativas ambientais é a observação de mudanças por parte dos concorrentes, por meio de resultados concretos (ESP3). Deste modo o setor mineral utiliza-se muito como estratégia de difusão e adoção o *catch-up* de inovação, ou seja, analisa e descobre o que está sendo utilizado e como está sendo aplicado pelo concorrente ou em outra indústria, como uma forma de diminuir os riscos advindos da novidade de iniciativas e inovações no processo.

Quanto às barreiras ou impulsionadores advindos da legislação, a difusão e adoção de inovações ambientais para o consumo eficiente de energia, ficam a critério da legislação dos estados em que as operações estão localizadas e, principalmente, das exigências para o licenciamento ambiental dos empreendimentos que apresentam condicionantes para a gestão da energia. Porém, não há um padrão do órgão regulador (ESP3). A regulamentação não é tão incisiva para o tema de energias alternativas ou o consumo eficiente de energia (EMP2-A). No que diz respeito à inclusão da energia alternativa pelas mineradoras, identificou-se que há um determinante advindo de países importadores, principalmente a Europa e a China (ESP1). Esta pressão do mercado por produtos que garantam eficiência energética, gera um valor diferenciado nas bolsas de valores, tornando mais atrativas aos investimentos (ESP2). Para alguns autores, tanto o mercado (Arranz et al., 2019; Kanda et al., 2019; Leitão et al., 2019) como a questão regulatória podem ser impulsionadores de inovações ambientais.

Deste modo, há um consenso do alto consumo energético pela indústria de mineração, tanto pelas mineradoras como para os especialistas, sendo as principais matrizes energéticas a fóssil e hidrelétricas. O consumo de energia está vinculado a emissões de GEE, resultando na preocupação do consumo energético eficiente e utilização de fontes de energias renováveis. As duas mineradoras

## Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO PERSPECTIVA DE ENERGIAS

possuem áreas responsáveis por estes projetos sustentáveis, integradas com outras áreas da empresa. Porém, a difusão e adoção de iniciativas ambientais pela empresa neste tópico ainda está relacionada a equacionamento de custos, resultados de concorrentes e exigências regulatórias e de mercado.

### CONCLUSÃO

Os resultados mostram que as fontes mais utilizadas na indústria de mineração são os combustíveis fósseis e a eletricidade da rede nacional. O gerenciamento de emissões de carbono está diretamente ligado com a questão energética do setor mineral. A mineração é intensiva em energia, consequentemente pequenas reduções podem resultar em economias consideráveis em relação às emissões de Gases de Efeito Estufa e custos com energia. As mineradoras realizam parcerias para auxiliar tanto em projetos de energias alternativas como no desenvolvimento dos projetos de eficiência energética. As barreiras para a difusão de inovações ambientais são principalmente organizacionais – relacionada ao equacionamento de valor devido ao alto investimento para os projetos; tecnológicas – muitas vezes as tecnologias existentes no mercado não podem ser aplicadas ao porte da atividade de mineração de ferro; e de mercado – considerando a orientação dos custos pela dinâmica setorial do minério de ferro. Os determinantes para esta categoria são de mercado analisando as exigências por produtos verdes e a taxação de carbono que orientam as iniciativas ambientais.

Identificou-se que o setor de mineração possui uma preocupação ambiental relacionada ao tópico de consumo energético e uso de energias alternativas, mas há um equacionamento do investimento, ou seja, a análise dos benefícios tangíveis comparado ao investimento financeiro de modo que a questão do custo de tecnologias e iniciativas ambientais é uma barreira organizacional para a difusão de inovações ambientais que incentivem a matriz energética renovável da empresa de mineração. A redução nos preços dos combustíveis e a queda nos lucros da empresa podem implicar barreiras para a ampla difusão de energias renováveis. Os investimentos neste tipo de energia podem não resistir às pressões de investidores por capital de curto prazo.

Apesar de o consumo energético estar entre uma das questões mais importantes para a indústria de mineração, principalmente pela associação aos altos impactos ambientais, identificou-se que a questão regulatória não é tão evidente em relação ao tema, que fica a critério das exigências dos estados e do licenciamento ambiental, de forma discricionária.

No setor de mineração busca-se por fontes alternativas de eletricidade e energia, com o intuito de reduzir custos, diminuir a pegada de carbono e criar maior independência – diferentes matrizes de energia para fornecimento confiável. A difusão e adoção de tecnologias adequadas e a adoção de inovação auxiliam com os desafios ambientais e outros desafios. Pelas mineradoras dos casos estudados, a implementação de práticas e tecnologias ambientais possui riscos e incertezas. Logo, há

uma procura por tecnologias e iniciativas já implementadas por outros setores ou outras empresas concorrentes, que possa ser adaptado pela mineradora em seus processos. Este *catch up* de inovação é visto como uma estratégia para redução de riscos e incertezas.

As principais estratégias são a de eficiência energética e descarbonização de energia. Porém, deve-se entender que as iniciativas ambientais e tecnologias de eficiência energética e mitigação de emissões de GEE podem variar consideravelmente entre diferentes etapas da cadeia de valor. Práticas ambientais que são implementadas na indústria da mineração, muitas vezes são tecnicamente viáveis, porém economicamente apresentam diferença entre custos de capital e custos operacionais, isto é, ainda há um equacionamento entre incertezas e riscos de investimentos e benefícios diretos e indiretos.

Como sugestões de pesquisas futuras, recomenda-se progredir na temática de energias renováveis no setor de mineração, considerando desde o planejamento até o fechamento da mina. Isto é, de modo a englobar tecnologias e métodos que reduzam os impactos ambientais além das etapas de lavra e beneficiamento. Outro ponto profícuo sobre o tema, seria centrar-se na identificação de oportunidades e inovações de inclusão energética para toda cadeia de mineração, considerando as vertentes: i) aumento da eficiência energética; ii) recuperação de energia em outros processos – internos e externos; e iii) energias renováveis. Desenvolver a temática em mais pesquisas práticas, de modo a consolidar o tema de energias renováveis na mineração, englobando diferenças de contextos (outros países, minérios e regiões). Destaca-se, também, a oportunidade de estudos sobre a otimização do tema por meio de arranjos institucionais como forma de avançar potenciais tecnologias e inovações no setor.

## AGRADECIMENTO

O presente estudo foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

---

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

---

## REFERÊNCIAS

ADOMAKO, S.; NGUYEN, N. P. Eco-innovation in the extractive industry: Combinative effects of social legitimacy, green management, and institutional pressures. **Resources Policy**, [s. l.], v. 80, p. 103184, jan.2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.anm.gov.br>.

AGRAWAL, R. et al. Adoption of green finance and green innovation for achieving circularity: An exploratory review and future directions. **Geoscience Frontiers**, [s. l.], p. 101669, jul.2023.

Apolinario et al, 2023\_INOVAÇÕES AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO  
PERSPECTIVA DE ENERGIAS

ARRANZ, N. et al. Incentives and inhibiting factors of eco-innovation in the Spanish firms. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 167–176, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.126>>

BURRITT, R. L. et al. Diffusion of environmental management accounting for cleaner production: Evidence from some case studies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 224, p. 479–491, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.227>>

CHELGANI, S. C. et al. A comparative study on the effects of dry and wetgrinding on mineral flotation separation-a review. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 5004–5011, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.053>>

IGOGO, T. et al. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. **Applied Energy**, [s. l.], v. 300, 15.out.2021.

IMMINK, H.; LOUW, R. T.; BRENT, A. C. Tracking decarbonisation in the mining sector. **Journal of Energy in Southern Africa**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 14–23, 2018.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Energy Consumption in Mining Comminution. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 48, p. 140–145, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>>

KANDA, W. et al. A technological innovation systems approach to analyse the roles of intermediaries in eco-innovation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 227, p. 1136–1148, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.230>>

KUMAR KATTA, A.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold, and potash mining sectors. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], n. xxxx, p. 118718, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118718>>

LEITÃO, J.; DE BRITO, S.; CUBICO, S. Eco-innovation influencers: Unveiling the role of lean management principles adoption. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1–27, 2019.

LIAO, Z. et al. What drives environmental innovation? A content analysis of listed companies in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 198, p. 1567–1573, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.156>>

MCLELLAN, B. C. et al. Renewable energy in the minerals industry: A review of global potential. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 32, p. 32–44, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.016>>

NAM, D.; LEE, J.; LEE, H. Business analytics adoption process: An innovation diffusion perspective. **International Journal of Information Management**, [s. l.], v. 49, n. July, p. 411–423, 2019.

NGUYEN, M. T. et al. Water and energy synergy and trade-off potentials in mine water management. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 629–638, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.063>>

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 266–274, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>>

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 42, p. 13–21, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.012>>

PONOMAR, V. P.; DUDCHENKO, N. O.; BRIK, A. B. Synthesis of magnetite powder from the mixture consisting of siderite and hematite iron ores. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 122, n. December 2017, p. 277–284, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.018>>

RODOVALHO, E. et al. Sequential glory hole approach as a new mining method for sustainable operations. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 4788–4796, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.025>>

SHAMSUZZOHA, A. et al. Development of value proposition to promote green innovation for sustainable organizational development. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 15, p. 100668, ago.2023.

STRANG, K. D. Feasibility of a hidden renewable energy hydro power storage battery. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 13, p. 164–175, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2017.07.001>>

VARGO, S. L.; AKAKA, M. A.; WIELAND, H. Rethinking the process of diffusion in innovation: A service-ecosystems and institutional perspective. **Journal of Business Research**, [s. l.], n. December 2018, 2020.

VOTTELER, R. G.; BRENT, A. C. A literature review on the potential of renewable electricity sources for mining operations in South Africa. **Journal of Energy in Southern Africa**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 1–21, 2016.

WANG, D. et al. Technical, economic and environmental assessment of coagulation/filtration tertiary treatment processes in full-scale wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 170, p. 1185–1194, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.231>>

WHITAKER, J. et al. Sources of variability in greenhouse gas and energy balances for biofuel production: A systematic review. **GCB Bioenergy**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 99–112, 2010.

XUE, B. et al. A life cycle co-benefits assessment of wind power in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 41, n. 72, p. 338–346, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.056>>

ZUO, W. et al. Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 84, p. 64–73, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.025>>