

Mineração 4.0: Aplicação de Tecnologia e Automação na Indústria Mineral.

Mining 4.0: Application of Technology and automation in the Mineral Industry.

Minería 4.0: Aplicación de Tecnología y Automatización en la Industria Mineral

Geane Thauanne Silva Sousa¹, Geize Nayara Damascena Silva¹, Roberta Ayane Nunes Cassimiro¹, Jonas Franco Campos da Mata¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Introdução: A indústria de mineração tem se adaptado a novos desafios, como a pressão ambiental e a escassez de trabalhadores qualificados, impulsionando a adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Essas inovações estão moldando o futuro da mineração, integrando novas soluções tecnológicas para enfrentar as demandas do mercado global e as questões ambientais.

Objetivo: Este presente estudo tem como objetivo analisar como a Mineração 4.0, por meio da aplicação de tecnologias emergentes e automação, está transformando a indústria mineral. Busca-se entender o impacto dessas inovações na melhoria de processos, eficiência e segurança, além de explorar desafios e oportunidades trazidos por essas mudanças tecnológicas.

Métodos: Esta pesquisa se baseou em dados secundários sobre inovações tecnológicas e automação na mineração. O foco foi direcionado aos benefícios, desafios e impactos dessas transformações, incluindo sustentabilidade e mudanças no setor.

Resultados: A Mineração 4.0 impulsiona a automação, inteligência artificial e Internet das Coisas, aumentando a eficiência, segurança e sustentabilidade. Apesar dos desafios, empresas líderes adotam tecnologias inovadoras, promovendo um setor mais produtivo e digitalizado.

Conclusão: As tecnologias revolucionárias aplicadas ao setor não apenas impulsionam a eficiência operacional, mas também geram benefícios expressivos para a economia, a sociedade e o meio ambiente. Os ganhos em produtividade, segurança e mitigação de impactos ambientais justificam a crescente adoção dessas tecnologias e impulsionam o avanço da Mineração 4.0.

Palavras-chave: Mineração sustentável; Equipamentos autônomos; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Introduction: The mining industry has adapted to new challenges such as environmental pressures and the shortage of skilled workers, driving the adoption of Industry 4.0 technologies. These innovations are shaping the future of mining, integrating new technological solutions to address global market demands and environmental issues.

Objective: This study aims to analyze how Mining 4.0, through the application of emerging technologies and automation, is transforming the mineral industry. The aim is to understand the impact of these innovations on process improvement, efficiency and safety, in addition to exploring challenges and opportunities brought about by these technological changes.

Methods: This research was based on secondary data on technological innovations and automation in mining. The focus was on the benefits, challenges and impacts of these transformations, including sustainability and changes in the sector.

Results: Mining 4.0 leverages automation, artificial intelligence and the Internet of Things, increasing efficiency, safety and sustainability. Despite the challenges, leading companies are adopting innovative technologies, promoting a more productive and digitalized sector.

Conclusion: Revolutionary technologies applied to the sector not only boost operational efficiency,

Correspondência:

Geane Thauanne Silva Sousa
Universidade Federal dos
Vales do Jequitinhonha e
Mucuri, Janaúba, Minas
Gerais, Brasil.

Email:

geane.thauanne@ufvjm.edu.br

but also generate significant benefits for the economy, society and the environment. Gains in productivity, safety and mitigation of environmental impacts justify the growing adoption of these technologies and drive the advancement of Mining 4.0.

Keywords: Sustainable mining; autonomous equipment; Sustainability.

RESUMEN

Introducción: La industria minera se ha adaptado a nuevos desafíos, como la presión ambiental y la escasez de trabajadores calificados, impulsando la adopción de tecnologías de la Industria 4.0. Estas innovaciones están dando forma al futuro de la minería, integrando nuevas soluciones tecnológicas para abordar las demandas del mercado global y los problemas ambientales.

Objetivo: Este estudio tiene como objetivo analizar cómo la Minería 4.0, a través de la aplicación de tecnologías emergentes y la automatización, está transformando la industria minera. El objetivo es comprender el impacto de estas innovaciones en la mejora de los procesos, la eficiencia y la seguridad, además de explorar los desafíos y oportunidades que traen consigo estos cambios tecnológicos.

Métodos: Esta investigación se basó en datos secundarios sobre innovaciones tecnológicas y automatización en la minería. El foco se centró en los beneficios, desafíos e impactos de estas transformaciones, incluida la sostenibilidad y los cambios en el sector.

Resultados: A Mineração 4.0 impulsiona a automação, inteligência artificial e Internet das Coisas, aumentando a eficiência, segurança e sustentabilidade. Apesar dos desafios, empresas líderes adotam tecnologias inovadoras, promovendo um setor mais produtivo e digitalizado.

Conclusión: Las tecnologías revolucionarias aplicadas al sector no sólo aumentan la eficiencia operativa, sino que también generan importantes beneficios para la economía, la sociedad y el medio ambiente. Las ganancias en productividad, seguridad y mitigación de impactos ambientales justifican la creciente adopción de estas tecnologías.

Palabras-clave: Minería sustentable; equipos autónomos; Sostenibilidad.

INTRODUÇÃO

A indústria de mineração tem enfrentado diversas mudanças recentemente, devido a fatores externos como o aquecimento global, a crescente competição internacional e as dificuldades no recrutamento de trabalhadores qualificados. Esses desafios têm gerado novas exigências nas operações do setor, o que tem levado as empresas a adotar tecnologias digitais, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0 (Löow & Johansson, 2024).

Vnukova *et al.* (2024) afirmam que as tecnologias inovadoras da Indústria 4.0 estão se tornando fundamentais nas estratégias industriais da mineração, promovendo transformações nos modelos de negócios tradicionais e nos processos de produção, além de possibilitar a implementação de novos desenvolvimentos e inovações tecnológicas.

A adoção de novas tecnologias está provocando transformações significativas nos setores de mineração e metalurgia, que historicamente não eram tão avançados tecnologicamente. O uso de inovações como análise de dados em grande escala, internet das coisas, impressão 3D e novos materiais está acelerando a busca por processos de produção mais eficientes. Isso está em linha com os conceitos de 'indústria 4.0' e 'manufatura inteligente', que envolvem digitalização e interconexão das cadeias produtivas. A aplicação das tecnologias da informação e comunicação (TICs) visa integrar o controle de processos, parâmetros e insumos nas etapas de produção. A pesquisa em manufatura avançada foca em áreas como sensores, automação e plataformas digitais, promovendo maior produtividade, eficiência e a redução de impactos socioambientais (Alvim Galbiatti *et al.*, 2023).

Na indústria de mineração, algumas minas deram passos importantes em direção à digitalização, aproximando-se do conceito de Indústria 4.0 no setor, conhecido como Mining 4.0. Por exemplo, carregadeiras e caminhões autônomos já estão operacionais em vários locais, e drones autônomos estão sendo testados para inspeções. Aos poucos, a mineração está alcançando as visões da Indústria 4.0, com minas totalmente automatizadas e instalações de processamento de minério mais tecnologicamente avançadas. Na mineração 4.0, os operadores não precisariam estar restritos a salas de controle. Em vez disso, dados de processos em tempo real e o status das máquinas poderiam acompanhar os mineradores enquanto se deslocam pela mina, permitindo que eles resolvam problemas no local por meio de interação remota com outros operadores, especialistas, fornecedores e clientes, em equipes multidisciplinares. O controle de produção poderia até ser gerenciado por um modelo digital (ou "gêmeo digital") distante da mina (Löow & Johansson, 2024).

O desenvolvimento tecnológico, no entanto, segue muitas vezes seu próprio curso, sendo difícil implementar mudanças. Resistir à nova tecnologia é um desafio, pois a indústria de mineração precisa produzir com custos competitivos no mercado global para garantir sua sobrevivência. Para se manterem competitivas, as empresas de mineração precisam se adaptar de alguma forma às novas tecnologias. Ao mesmo tempo, é importante compreender que a tecnologia não é predeterminada, mas moldada por seus usuários. É nesse paradoxo que as empresas de mineração devem criar condições de trabalho futuras que permitam o uso socialmente sustentável dessas tecnologias. As empresas devem, portanto, ser ao mesmo tempo adaptáveis às novas tecnologias e proativas, aproveitando as oportunidades que elas oferecem para criar ambientes de trabalho atraentes, capazes de motivar os profissionais qualificados do futuro (Löow & Johansson, 2024).

A ERA DA INDÚSTRIA 4.0

A indústria evoluiu significativamente desde seus primórdios até a chegada da Indústria 4.0, impulsionada por uma série de inovações tecnológicas que transformaram a produção de bens e serviços. Essas mudanças também tiveram um impacto profundo na economia, na sociedade e no meio ambiente (Farias, 2024).

A Indústria 4.0 incorpora tecnologias como sistemas ciberfísicos, computação em nuvem, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina à produção industrial. Essa convergência possibilita o surgimento de fábricas inteligentes e autônomas, que conseguem prever falhas e programar manutenções de forma antecipada, aumentando a eficiência operacional, a

disponibilidade de máquinas e equipamentos, além de minimizar prejuízos decorrentes de falhas evitáveis (Farias, 2024).

SETOR DE MINERAÇÃO

Farias (2024) destaca que a indústria mineradora desempenha um papel fundamental na economia brasileira, uma vez que o Brasil possui uma ampla gama de recursos minerais, como cobre, ferro e nióbio, o que o coloca em uma posição de destaque no setor da mineração.

Considerado um dos pilares da economia brasileira, o setor de mineração tem impulsionado avanços tecnológicos significativos. Empresas da área têm investido consideravelmente em pesquisa, visando não apenas aprimorar a eficiência operacional, mas também reduzir os impactos ambientais e melhorar as condições de trabalho (Farias, 2024).

Nesse contexto, destaca-se a relevância da Indústria 4.0 no avanço da mineração, uma vez que possibilita a automação em todas as etapas, desde a extração e transporte até o beneficiamento e distribuição. Além de proporcionar maior eficiência e redução de custos, essas inovações tecnológicas desempenham um papel crucial na melhoria da segurança e na proteção ambiental, ao promover o uso sustentável dos recursos naturais e a prevenção de falhas catastróficas, que poderiam resultar em danos irreversíveis tanto à vida humana quanto ao meio ambiente (Farias, 2024).

Ao integrar a Internet das Coisas (IoT) e sensores inteligentes, é possível conectar equipamentos, proporcionando uma visão abrangente e em tempo real de todas as operações. Isso facilita a tomada de decisões mais embasadas e estratégicas. Além disso, os sensores permitem a coleta de dados essenciais para o planejamento da manutenção, sendo fundamental para prever falhas e agendar intervenções, evitando assim paralisações inesperadas (Farias, 2024).

MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL

A indústria da mineração tem se dedicado a encontrar soluções para reduzir o movimento de material nas minas e minimizar a geração de efluentes, além de diminuir o consumo de água e mitigar os riscos associados ao beneficiamento e à deposição de rejeitos. Também está atenta aos impactos ambientais, buscando promover benefícios sociais. O acidente de Mariana (MG) gerou uma pressão por práticas mais seguras e sustentáveis, o que tem impulsionado investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Esses investimentos buscam aprimorar a recuperação de minerais, reciclar resíduos, reutilizar água e melhorar o monitoramento e controle de barragens e riscos ambientais (ALVIM GALBIATTI *et al.*, 2023).

A remoção das barragens representa um grande desafio na busca por uma mineração mais sustentável. Para isso, pesquisadores e engenheiros estão concentrando esforços no desenvolvimento de processos de enriquecimento de minério que não utilizem água, além de buscar métodos alternativos para o processamento de rejeitos. Além disso, estão sendo realizados investimentos para aprimorar o monitoramento de barragens, com o uso de softwares capazes de analisar imagens das superfícies das estruturas e identificar movimentos irregulares (Alvim Galbiatti *et al.*, 2023).

De acordo com Alvim Galbiatti *et al.* (2023), grandes empresas de mineração, como Vale, Rio Tinto, BHP e Fortescue Metals, estão implementando sistemas de automação e controle em suas operações. A Vale, por exemplo, adotou correias transportadoras em sua operação Ferro Carajás S11D, eliminando a necessidade de caminhões e, conseqüentemente, reduzindo as emissões de gases provenientes da queima de diesel. No setor metalúrgico, os avanços tecnológicos, como a detecção inteligente e a automação no controle de parâmetros e fluxos, apresentam grandes oportunidades para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade do produto. Além disso, a busca por sustentabilidade ambiental na metalurgia inclui o desenvolvimento de novos materiais, com o objetivo de aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões durante a produção de produtos metálicos, representando uma oportunidade importante para as indústrias de mineração e metalurgia.

MÉTODOS

Para a elaboração deste artigo, foi adotada uma revisão sistemática da literatura, considerando artigos recentes que abordam a Mineração 4.0 e suas implicações na indústria mineral. A metodologia adotada teve como objetivo compreender as inovações tecnológicas e as práticas de automação aplicadas ao setor mineral. Para isso, a pesquisa envolveu a coleta de dados secundários, incluindo artigos e estudos sobre tecnologias emergentes e automação na mineração. A seleção das fontes foi feita com base em critérios de relevância e atualidade, considerando publicações recentes.

A análise dos dados concentrou-se em identificar os principais benefícios e desafios dessas inovações, como a melhoria da eficiência operacional, a redução de custos e os avanços em segurança e sustentabilidade. O estudo também investigou os impactos dessas transformações no ambiente de trabalho, nas competências dos profissionais, nas estruturas organizacionais e na sociedade.

A abordagem seguiu as seguintes etapas:

- Seleção de Fontes: Foram selecionados artigos recentes que tratam de diferentes aspectos da Mineração 4.0.
- Leitura Crítica e Sistematização: Cada artigo foi analisado criticamente para extrair os principais resultados e discussões.
- Agrupamento Temático: Os achados foram organizados em cinco tópicos centrais, correspondentes aos principais temas abordados nos artigos.
- Estudos de Caso: Foram analisadas iniciativas de empresas referência no setor mineral, destacando a aplicação prática das inovações tecnológicas e os impactos observados.

Além disso, foram discutidas possíveis abordagens para promover o desenvolvimento sustentável no setor, ressaltando a necessidade de compreender os efeitos dessas tecnologias na indústria mineral, com ênfase nos aspectos ambientais, sociais e econômicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

NOVAS TECNOLOGIAS NA MINERAÇÃO

A adoção de novas tecnologias está transformando a mineração tradicional em um setor altamente automatizado e digitalizado. Segundo Löow & Johansson (2024), a implementação de robótica, big data, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial (IA) tem permitido maior eficiência operacional e redução de riscos.

A automação está reduzindo a intervenção humana em tarefas de alto risco, como perfuração e carregamento automatizado. A análise de big data também está se consolidando como uma ferramenta essencial para otimização de processos, com IA sendo utilizada para prever falhas e melhorar a segurança operacional (Löow & Johansson, 2024).

Outro fator relevante é a integração de sensores e IoT, que possibilitam a coleta em tempo real de dados sobre equipamentos e condições ambientais. Esse monitoramento contínuo permite uma resposta ágil a possíveis falhas e aumenta a confiabilidade dos ativos (El Hiouile *et al.*, 2024).

A realidade aumentada e virtual também está sendo aplicada para treinamento e simulação de operações, permitindo um aprendizado mais seguro e eficiente para os trabalhadores. O impacto dessas inovações tecnológicas é significativo e demanda uma adaptação contínua do setor (Vnukova *et al.*, 2024).

O uso de drones na mineração tem se mostrado uma ferramenta eficiente para a obtenção de dados topográficos com rapidez e precisão, utilizando aerofotogrametria. Esta técnica consiste em efetuar sobrevoos da área em estudo com drones equipados com dispositivos fotográficos digitais, de forma a efetuar imagens sucessivas ao longo das direções de voo destes drones. Posteriormente, estas imagens são interpretadas através de softwares específicos, havendo a geração de representações em 3 dimensões da superfície e suas formas. Além de reduzir custos e otimizar o

tempo de coleta, essa tecnologia melhora a segurança dos trabalhadores ao minimizar a exposição a ambientes de risco. Outra aplicação relevante é o monitoramento automatizado, que permite o acompanhamento em tempo real por meio de dashboards que apresentam indicadores operacionais. Os drones podem ser empregados em diversas atividades, como mapeamento geológico e geotécnico, ortofotografia, modelagem digital de terrenos e superfícies, inspeção de barragens e análise volumétrica, entre outras (Jazida, 2023).

A implementação da Indústria 4.0 na mineração tem possibilitado o uso de equipamentos inovadores, como caminhões, escavadeiras e perfuratrizes, operados remotamente. Atualmente, esses equipamentos podem ser controlados por sistemas computacionais que integram inteligência artificial e GPS, permitindo monitoramento em tempo real. Essa automação reduz a necessidade de operação manual direta, trazendo benefícios como maior produtividade, menor desgaste das máquinas, redução de custos com manutenção e aumento da segurança dos trabalhadores (Jazida, 2023).

A mina de Brucutu utiliza caminhões fora de estrada autônomos em suas operações, um exemplo da aplicação da Indústria 4.0 na mineração. Na Figura 1, observa-se um desses veículos da Vale, cuja operação remota contribui para o aumento da segurança e eficiência da lavra (Jazida, 2023).



Figura 01: Caminhão fora de estrada autônomo da mina de Brucutu. Fonte: Vale (Jazida, 2023).

No setor de transporte, os trens autônomos estão sendo implementados em algumas regiões do mundo, permitindo a realização de viagens de longa distância sem a necessidade de um operador a bordo. Esse sistema aumenta a segurança operacional ao reduzir riscos humanos e possibilitar um controle mais eficiente. As locomotivas contam com câmeras que transmitem imagens em tempo real para uma central de operações, garantindo monitoramento constante. Além disso, o rastreamento ao longo dos trechos ferroviários contribui para a segurança e eficiência do transporte (Jazida, 2023). A Figura 2 ilustra um dos trens autônomos da Rio Tinto na Austrália operados pela empresa, destacando o avanço da automação no setor (Jazida, 2023).



Figura 02: Trem autônomo da Rio Tinto na Austrália. Fonte: Rio Tinto (JAZIDA, 2023).

A digitalização da mineração tem permitido a integração de sistemas e operações unitárias por meio de softwares baseados em inteligência artificial. Essas tecnologias possibilitam a coleta e análise de dados confiáveis em tempo real, fornecendo uma visão ampla da área de exploração mineral e facilitando a criação de estratégias mais precisas. Para otimizar os processos, é essencial estabelecer metas, aumentar a eficiência operacional e realizar diversas aferições de qualidade do produto final. Quando bem aplicada, a tecnologia tem o potencial de transformar os negócios, pois permite análises detalhadas e a adoção de metodologias bem estruturadas, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 (JAZIDA, 2023).

ARQUITETURAS INTELIGENTES E DETECÇÃO DE ANOMALIAS

A segurança e a eficiência nas operações mineradoras têm sido aprimoradas com o desenvolvimento de arquiteturas inteligentes de monitoramento em tempo real. Segundo El Hiouile *et al.* (2024), a implementação de uma arquitetura multicamadas baseadas em redes neurais convolucionais (CNN) e descritores de histograma de gradientes orientados (HOG) apresentou alta precisão na detecção de anomalias.

Os testes em uma mina de fosfato em Marrocos demonstraram que o modelo CNN atingiu uma precisão superior a 99%, mesmo sob condições adversas, como poeira e chuva. Isso reforça a robustez das soluções baseadas em aprendizado de máquina para garantir um monitoramento mais eficiente das minas (El Hiouile *et al.*, 2024).

Comparada a outras soluções de vigilância, a arquitetura multicamadas mostrou vantagens em rastreabilidade e resposta rápida. Isso é essencial para a prevenção de falhas operacionais e aumento da segurança dos trabalhadores (Vnukova *et al.*, 2024).

A abordagem proposta contribui para a mineração autônoma e digitalizada, promovendo um ambiente mais seguro e produtivo, demonstrando o potencial da IA no setor mineral (El Hiouile *et al.*, 2024).

EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

A Mineração 4.0 também traz implicações para a sustentabilidade ambiental. Conforme destacado por El Hiouile *et al.* (2024), o uso de tecnologias para monitoramento ambiental permite uma redução significativa dos impactos negativos da mineração. Sistemas inteligentes podem prever falhas e vazamentos, mitigando riscos ambientais.

A implementação de técnicas de manutenção preditiva também desempenha um papel crucial na eficiência energética. Segundo Farias (2024), o monitoramento contínuo por meio da análise de vibrações reduz o desperdício de energia e prolonga a vida útil dos equipamentos, diminuindo os custos e os impactos ambientais.

IMPACTO NO TRABALHO E ORGANIZAÇÃO

Várias empresas estão liderando a adoção dessas inovações, oferecendo soluções de ponta que moldam o futuro da mineração. A Komatsu, por exemplo, tem sido uma das principais responsáveis pela introdução de tecnologias avançadas no setor, utilizando IA e automação em seus equipamentos de mineração. A empresa implementou caminhões e escavadeiras autônomas, que operam com alta precisão, reduzindo a necessidade de intervenção humana e aumentando a eficiência e segurança nas operações. A adoção dessas tecnologias gerou economias significativas, como o caso da automação dos processos, que ajudou a Komatsu a economizar milhões de dólares, além de otimizar o gerenciamento de suas minas (Blog da Engenharia, 2025).

Outro exemplo relevante é a Vale, que tem investido fortemente em tecnologias de mineração 4.0, com foco na digitalização das suas operações. A Vale implementou plataformas de análise de dados em tempo real para otimizar as atividades de monitoramento de barragens e processos de extração mineral. Além disso, a mineradora tem adotado sensores em suas operações para prever falhas em equipamentos e realizar manutenções preventivas, aumentando a vida útil dos ativos e reduzindo os custos operacionais (Dias, 2024).

Ressalta-se que o papel crucial dos equipamentos especializados não pode ser subestimado. Empresas como Caterpillar e Hitachi têm contribuído significativamente para a pujança da mineração 4.0, oferecendo máquinas equipadas com sensores inteligentes e sistemas de monitoramento remoto. Esses equipamentos ajudam a melhorar o desempenho das minas, aumentar a produtividade e garantir a operação contínua e eficiente (Máquinas e Equipamentos, 2025).

CONCLUSÃO

Este artigo detalhou como as inovações trazidas pela Indústria 4.0 estão transformando e modernizando a mineração de forma contínua. As tecnologias revolucionárias aplicadas ao setor não apenas impulsionam a eficiência operacional, mas também geram benefícios expressivos para a economia, a sociedade e o meio ambiente. Desde o estudo preliminar até a lavra, extração, transporte e beneficiamento, essas mudanças promovem a modernização dos processos e aprimoram a sustentabilidade social e ambiental.

Apesar dos avanços significativos, ainda persistem desafios que evidenciam a necessidade de investimentos contínuos no setor. A capacitação de trabalhadores, a ampliação da infraestrutura digital e o remodelamento das formas de trabalho são fatores essenciais para consolidar essa transformação. No entanto, os ganhos em produtividade, segurança e mitigação de impactos ambientais justificam a crescente adoção dessas tecnologias e impulsionam o avanço da Mineração 4.0.

Empresas de renome têm buscado, cada vez mais, sistemas automatizados que tornem suas operações mais eficazes e lucrativas. O futuro da mineração aponta para a implementação de novas tecnologias que fortalecerão a competitividade e a sustentabilidade do setor. No entanto, para que essa transformação ocorra de maneira eficiente, não basta apenas o desenvolvimento tecnológico; é necessário investir na capacitação dos profissionais e na aplicação de estratégias que possibilitem uma transição equilibrada para essa nova era digital.

A implementação da Mineração 4.0 representa um avanço e modernização do setor, impulsionando ganhos em segurança, eficiência e sustentabilidade. Porém, para que essa transformação seja verdadeiramente eficaz e benéfica, é essencial um esforço conjunto entre indústria e governo.

A adoção de tecnologias avançadas, como inteligência artificial, internet das coisas (IoT), análise de grandes volumes de dados, monitoramento por drones e automação, permite um avanço significativo na mineração. Essas inovações não apenas otimizam processos, mas também são moderadas para a redução de impactos ambientais e o uso mais racional dos recursos naturais.

Dessa forma, é fundamental que a mineração esteja comprometida com a eficiência e a sustentabilidade, garantindo que a implementação das tecnologias 4.0 não gere novos desafios, mas sim promova melhorias alinhadas ao equilíbrio ambiental e produtivo.

Somente por meio da colaboração entre os diferentes agentes do setor será possível garantir uma transição sustentável, equilibrada e inclusiva, preparada para os desafios do futuro. Além da contribuição do setor mineral, esse mercado em crescimento também impulsiona a construção de um modelo mais eficiente e promissor para uma indústria como um todo.

REFERÊNCIAS

Alvim GaLiattl, M.; VITORIA DE MATOS LAGES, E.; DIAS SIMÕES ABREU, A.; MEIRELES RIBEIRO E SOUZA, G. Sustentabilidade no âmbito da mineração: rumo à indústria 4.0. Anais do Congresso Nacional Universidade, EAD e Software Livre, [S. l.], v. 2, n. 16, 2023. Disponível em: <https://ueadsl.textolivre.pro.br/index.php/UEADSL/article/view/1355>. Acesso em: 17 fev. 2025.

BARTNITZKI, T. Mining 4.0 – Importance of Industry 4.0 for the Raw Materials Sector [Ebook]. Páginas 25 – 31. Disponível em: https://mining-report.de/wpcontent/uploads/2017/02/MRG_1701_RWTH_Bartnitzki_170105.pdf

BHP (2020). Annual Report 2020. Disponível em: https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2020/200915_bhpannualreport2020.pdf

BLOG DA ENGENHARIA. Komatsu economiza milhões com IA e automação no setor de mineração.

de vibração. Contribuciones a Las Ciencias Sociales. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-056>>.

CATERPILLAR. AR: Transforming the Future of Mining. Caterpillar, 18 abr. 2023. Disponível em: <https://www.caterpillar.com/pt/news/caterpillarNews/regional-news/ar-transforming-the-future-of-mining.html>. Acesso em: 21 fev. 2025.

DIAS, Ana R. L. Transformações digitais na mineração, 2023. Pantheon UFRJ. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/engenharia/engenharia-civil/komatsu-economiza-milhoes-com-ia-e-automacao-no-setor-de-mineracao/>. Acesso em: 17 fev. 2025.

EL HIOUILE, L., Errami, A., & Azami, N. (2024). Towards Mine 4.0: A Proposed Multi-Layered Architecture for Real-Time Surveillance and Anomaly Detection in an Open-Pit Phosphate Mine. Mining. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining4030038>>.

FARIAS, P. de C. Mineração 4.0: otimização da manutenção preditiva através da análise de vibração. CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, [S. l.], v. 17, n. 5, p. e6690, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.5-056. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/6690>. Acesso em: 17 fev. 2025.

GONÇALVES, José Manoel Ferreira. O desenvolvimento anda de trem – V. Jornal GGN, 20 fev. 2024. Disponível em: <https://jornalgggn.com.br/transporte/o-desenvolvimento-anda-de-trem-v-por-jose-manoel-ferreira-goncalves/>. Acesso em: 21 fev. 2025. [18:19, 21/02/2025] kamilly: HOSSEIN, M.N.; MOHAMMADREZAEI, M.; HUNT, J.; ZAKERI, B. Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. Energies, v. 13, n. 2, p. 494, 2020.

<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21146/1/DIAS%2C%20A.R.L.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2025.

INSTITUTO MINERALE . Como a Internet das Coisas Industrial está mudando a indústria de mineração.

- Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/como-a-internet-das-coisas-industrial-estamudando-a-industria-de-mineracao>. Acesso em: 16 abr. 2025.
- INSTITUTO MINERE. Como a internet das coisas industrial está mudando a indústria de mineração. Instituto Minere, 25 de maio de 2019. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/como-a-internet-das-coisas-industrial-esta-mudando-a-industria-de-mineracao>. Acesso em 15 fev. de 2025.
- IN THE MINE. Vale terá a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no Brasil. 2018. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil/>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- JANG, Hyongdoo; TOPAL, Erkan. Transformação da indústria de mineração australiana e perspectivas futuras. *Tecnologia de Mineração*, 2020. DOI: 10.1080/25726668.2020.1786298.
- KHAN, A.U.; SALMAN, S.; MUHAMMAD, K.; HABIB, M. Modelling Coal Dust Explosibility of Khyber Pakhtunkhwa Coal Using Random Forest Algorithm. *Energies*, v. 15, n. 7, p. 3169, 2022.
- LÖÖW, Joel; JOHANSSON, Jan. Oito condições que mudarão o trabalho de mineração na mineração 4.0. *Mining*, v. 4, n. 4, p. 904-912, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining4040050>. Acesso em: [15/02/2025].
- LUND, E. M., Pekkari, A., Johansson, J., & Löow, J. (2024). Mining 4.0 and its effects on work environment, competence, organisation and society – a scoping review. *Mineral Economics*. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00427-0>
- MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. As máquinas e os equipamentos contribuem para a pujança da atividade minerária. Disponível em: <https://maquinasequipamentos.com.br/as-maquinas-e-os-equipamentos-contribuem-para-a-pujanca-da-atividade-mineraria/>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- PARK, S.; JUNG, D.; NGUYEN, H.; CHOI, Y. Diagnosis of Problems in Truck Ore Transport Operations in Underground Mines Using Various Machine Learning Models and Data Collected by Internet of Things Systems. *Minerals*, v. 11, n. 9, p. 1128, 2021.
- SCHNITZLER, N.; ROSS, P. S.; GLOAGUEN, E. Using machine learning to estimate a key missing geochemical variable in mining exploration: Application of the Random Forest algorithm to multi-sensor core logging data. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 205, p. 106344, 2019. [18:19, 21/02/2025] kamilly: SHAHMORADI, J. et al. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones*, v. 4, n. 1, p. 34, 2020.
- SIDOROV, D.; LIU, F.; SUN, Y. Machine Learning for Energy Systems. *Energies*, v. 13, n. 18, p. 4708, 2020.
- SUNAGAR, P.; NAIK, D.A.; SHRUTHI, G. Artificial Intelligence and Machine Learning for Industry 4.0. In: NIRANJANAMURTHY, M. et al. (Eds.). *Advances in Industry 4.0*. Berlin, Germany: De Gruyter, 2022.
- VALE. Relato Integrado 2021. Maio de 2022. Disponível em https://www.vale.com/documents/d/guest/vale_relato_integrado_2021_pt. Acesso em 15 de fevereiro de 2025.
- VERONESI, F.; SCHILLACI, C. Comparison between geostatistical and machine learning models as predictors of topsoil organic carbon with a focus on local uncertainty estimation. *Ecological Indicators*, v. 101, p. 1032–1044, 2019.

VNUKOVA, Nataliya et al. The innovativeness of technologies of Industry 4.0 in the modern mining environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1348, p. 012015, 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012015.

ZHIRONKIN, S. Technological and Intellectual Transition to Mining 4.0: A Review. Energies, v. 16, n. 3, p. 1427, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16031427>.