



Amanda Ribeiro Lutterback Dias

**MINERAÇÃO 4.0: A EVOLUÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO
SETOR DA MINERAÇÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2023



UFRJ

Amanda Ribeiro Lutterback Dias

**MINERAÇÃO 4.0: A EVOLUÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO
SETOR DA MINERAÇÃO**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador:

Prof. Dr. Edson Farias Mello
(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Rio de Janeiro
Junho de 2023

DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback

MINERAÇÃO 4.0: A EVOLUÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DA MINERAÇÃO / Amanda Ribeiro Lutterback Dias - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2023

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2022.

Orientador: Edson Farias Mello;

1. Geologia. 2. IGEO - Trabalho de Conclusão de Curso. I. Edson Farias Mello, UFRJ. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Mineração 4.0: A evolução e os benefícios da Indústria 4.0 no setor da mineração.

MINERAÇÃO 4.0: A EVOLUÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DA MINERAÇÃO

Amanda Ribeiro Lutterback Dias

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE GEOLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE GEÓLOGO.

Autor:

Amanda Ribeiro Lutterback Dias

Orientador:

Prof. Edson Farias Mello, D. Sc.

Examinador:

Prof. Claudio Gerheim Porto, D. Sc.

Examinador:

Prof. Marco Antonio Braga, D. Sc.

Rio de Janeiro - RJ, Brasil
Junho de 2023

Agradecimentos

À toda a minha família, em especial a meu pai Pedro que me apresentou o incrível universo da Geologia, a minha mãe Cláudia pelo apoio e carinho e a minha irmã Lívia que tem sido um exemplo de pessoa e profissional. Agradeço por me apoiarem, escutarem e me incentivarem durante toda a graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Farias Mello, que foi um grande exemplo para mim durante a graduação. Sua dedicação e paciência durante esse processo e seus ensinamentos passados foram essenciais para a minha formação.

Aos meus amigos que estiveram presentes em todos os momentos, nas aventuras e perrengues dos estágios de campos e na sala de aula que tornaram esse ciclo o melhor possível.

À todo o Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, aos professores do departamento, que são grandes exemplos de dedicação e amor pela geologia.

E agradeço à Deus pelas minhas conquistas.

Resumo

DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback, **SMART MINING: A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO**. 2023.

xii, 73 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A mineração é uma atividade essencial para a produção de bens e para o desenvolvimento econômico de muitos países. Com o aumento da demanda por recursos minerais, torna-se cada vez mais importante a adoção de tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e a produtividade da mineração. A Indústria 4.0, conceito introduzido por Klaus Schwab, fundador do Fórum Econômico Mundial, refere-se à quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias avançadas em processos produtivos. A mineração 4.0 é uma extensão desse conceito, que se refere à adoção de tecnologias da Indústria 4.0 na mineração. As tecnologias da Indústria 4.0 incluem automação, drones, inteligência artificial, *machine learning*, internet das coisas, *big data*, realidade aumentada e virtual e impressão 3D. Essas tecnologias podem melhorar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade da mineração. A sustentabilidade e a mitigação de risco são temas importantes para a indústria da mineração, pois a atividade pode ter impactos ambientais e sociais significativos. A adoção de tecnologias avançadas pode ajudar a minimizar esses impactos. Este trabalho baseia-se em uma Revisão Sistemática da Literatura, utilizando as bases Scopus e Google Scholar que teve como resultado 50 artigos científicos. Além disso, também são utilizados jornais, revistas e relatórios de sustentabilidade de empresas para explicar alguns casos de sucesso de mineradoras que utilizam a mineração 4.0. Algumas das empresas mencionadas incluem a Vale, Anglo American, Rio Tinto e outras. Esses exemplos mostram como a adoção de tecnologias avançadas pode melhorar a eficiência e a produtividade da mineração, ao mesmo tempo em que reduz os impactos ambientais e sociais da atividade. A mineração 4.0 é uma tendência crescente na indústria da mineração e é uma oportunidade para as empresas melhorarem sua competitividade e sua sustentabilidade.

Palavras-Chave: Mineração 4.0; Tecnologias; Sustentabilidade.

Abstract

DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback, **SMART MINING: A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO**. 2023.

xii, 73 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Mining is an essential activity for the production of goods and the economic development of many countries. With the increasing demand for mineral resources, the adoption of advanced technologies to improve mining efficiency and productivity is becoming increasingly important. Industry 4.0, a concept introduced by Klaus Schwab, founder of the World Economic Forum, refers to the fourth industrial revolution, characterized by the integration of advanced technologies into production processes. Mining 4.0 is an extension of this concept, referring to the adoption of Industry 4.0 technologies in mining. Industry 4.0 technologies include automation, drones, artificial intelligence, machine learning, the internet of things, big data, augmented and virtual reality, and 3D printing. These technologies can improve mining efficiency, safety, and sustainability. Sustainability and risk mitigation are important topics for the mining industry, as the activity can have significant environmental and social impacts. The adoption of advanced technologies can help minimize these impacts. This work is based on a systematic literature review using the Scopus and Google Scholar databases, resulting in 50 scientific articles. In addition, newspapers, magazines, and sustainability reports from companies are also used to explain some successful cases of mining companies using Mining 4.0. Some of the companies mentioned include Vale, Anglo American, Rio Tinto and others. These examples show how the adoption of advanced technologies can improve mining efficiency and productivity while reducing the environmental and social impacts of the activity. Mining 4.0 is a growing trend in the mining industry and an opportunity for companies to improve their competitiveness and sustainability.

Keywords: Mining 4.0; Technologies; Sustainability.

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução das diversas fases de evolução das revoluções industriais. Fonte Reis 2021.....19

Figura 2: A vida útil dos pneus na mina de Salobo aumentou 30%. Fonte: Vale....43

Figura 3: “SmartCap” sendo utilizado por motorista de caminhão de mina de carvão da Rio Tinto. Foto de SMH Austrália.....47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relação de artigos analisados nesta primeira etapa da metodologia.....	16
Tabela 2. As 15 maiores empresas mineradoras do mundo em 2021. Fonte: S&P Capital, PwC Mine 2021.....	51

Lista de Siglas

AIA	Avaliação do Impacto Ambiental
AR	Realidade Aumentada
AIA	Avaliação do Impacto Ambiental
EEG	Eletroencefalograma
FFI	Fortescue Future Industries
FMG	Fortescue Metal Group
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IA	Inteligência Artificial
IIoT	Industrial Internet of Things (Internet das Coisas Industrial)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IROC	Centro Integrado de Operações Remotas
ML	Machine Learning
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D&I	Pesquisa Desenvolvimento e Inovação
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ROI	Return on Investment (Retorno sobre o investimento)
RTOC	Centro de Operações Rio Tinto
RTIC	Centro de Inovação Rio Tinto
TI	Tecnologia da Informação
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
VR	Realidade Virtual

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Relação dos artigos publicados e analisados no decorrer dos anos.....17

Gráfico 2: Relação dos países dos primeiros autores dos artigos analisados.....17

Sumário

Agradecimentos.....	5
Resumo.....	6
Abstract.....	7
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	9
Lista de Siglas.....	10
Lista de Gráficos.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	14
2. METODOLOGIA.....	15
3. RESULTADOS.....	18
3.1 O Estado da Arte da Mineração 4.0.....	18
3.1.1 As Revoluções Industriais.....	18
3.1.1.1 Pré a Primeira Revolução Industrial.....	19
3.1.1.2 Segunda Revolução Industrial.....	20
3.1.1.3 Terceira Revolução Industrial.....	22
3.1.1.4 Quarta Revolução Industrial.....	23
3.1.2 Conceitos da Indústria 4.0 e Mineração 4.0.....	24
3.1.3 Inovações Tecnológicas.....	25
3.1.3.1 Automação e Drones.....	26
3.1.3.2 Inteligência Artificial e Machine Learning.....	27
3.1.3.3 Internet das Coisas.....	29
3.1.3.4 Big Data.....	31
3.1.3.5 Realidade Aumentada e Virtual.....	32
3.1.3.6 Impressão 3D.....	33
3.1.4 Sustentabilidade e Mitigação de Riscos.....	34
3.2 Mineradoras e o Acordo de Paris.....	36
3.3 Empresas e Casos de Sucesso.....	39
3.3.1 Vale.....	39
3.3.1.1 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Brucutu.....	40
3.3.1.2 Casos de Sucesso da Vale: Complexo Tubarão.....	41
3.3.1.3 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Salobo.....	42
3.3.1.4 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Totten.....	43
3.3.2 Rio Tinto.....	43
3.3.2.1 Casos de Sucesso da Rio Tinto: Hunter Valley.....	45
3.3.2.2 Casos de Sucesso da Rio Tinto: West Angelas.....	46
3.3.3 BHP.....	47
3.3.3.1 Casos de Sucesso da BHP: Mina de Escondida.....	47
3.3.3.1 Casos de Sucesso da BHP: Mina de Jimblebar.....	48
3.3.4 Fortescue Metal Group.....	48
3.3.3.1 Casos de Sucesso da FMG: Mineração de Pilbara.....	49

4	DISCUSSÕES.....	50
5	CONCLUSÕES.....	54
	Referências Bibliográficas.....	55

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho de conclusão de curso aborda um tema recente que iniciou-se após a quarta revolução industrial em 2011. Sendo assim, os artigos e informações usados neste trabalho são novos devido o tema estar em alta no momento. Este trabalho foi realizado pela aluna Amanda Ribeiro Lutterback Dias no curso de Geologia na Universidade Federal do Rio de Janeiro, tendo como orientador o professor Edson Farias Mello.

Vale ressaltar que a Mineração 4.0, também conhecida por *Smart Mining* é um tema relacionado às inovações tecnológicas da Indústria 4.0 que foi criado e dito pela primeira vez pelo pesquisador Klaus Schwab na Feira de Hannover na Alemanha em 2011, em que tem como objetivo otimizar os processos potencializando os lucros, tendo como ferramentas a inteligência artificial, *big data*, internet das coisas e *machine learning*. A partir disso, surgiu a Mineração 4.0, que são essas tecnologias da 4ª Revolução Industrial adaptadas para a mineração.

A mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade e é crucial para a economia global e para o bem-estar da sociedade moderna. Ela fornece os materiais básicos para a fabricação da maioria dos bens de consumo, incluindo eletrônicos, veículos, bens de construção, medicamentos e muito mais.

O aumento da produção de eletrônicos nos últimos anos tem resultado em uma crescente demanda por matérias-primas, como cobre, alumínio, ouro e outros minerais. Os eletrônicos, como smartphones, computadores, tablets e outros dispositivos, são feitos de minerais, e a produção em massa desses itens está aumentando a demanda por essas matérias-primas. Além disso, o aumento da produção de eletrônicos também está sendo impulsionado pelo fenômeno da obsolescência programada, em que os fabricantes projetam produtos com uma vida útil limitada, o que leva ao aumento da produção de novos dispositivos.

Como resultado, a mineração tem sido cada vez mais importante para atender à demanda por matérias-primas, especialmente em países em desenvolvimento, onde grandes reservas de minerais estão sendo exploradas para atender à crescente demanda mundial. No entanto, a mineração tradicional tem seus desafios, incluindo impactos negativos no meio ambiente, condições de trabalho perigosas e falta de responsabilidade social. É aqui que a mineração 4.0 entra, pois ela oferece soluções para esses desafios, ao mesmo tempo em que

atende à crescente demanda por matérias-primas. Mineração 4.0 é uma tendência em constante evolução, e representa uma oportunidade para a geologia e a tecnologia trabalharem juntas para tornar a mineração mais eficiente, sustentável e segura. Nesse contexto, esse conceito surge como uma nova abordagem que busca combinar a tradicional mineração com a tecnologia de ponta para criar soluções mais eficientes e sustentáveis. Mineração 4.0 tem como objetivo maximizar a extração de recursos naturais, reduzir os custos operacionais e minimizar os impactos ambientais. A tecnologia também tem um papel fundamental nesse processo, que permite o uso de ferramentas avançadas de monitoramento, análise de dados e automação, entre outros. Essas tecnologias possibilitam a coleta de informações em tempo real e a otimização das atividades de mineração, resultando em uma operação mais segura e eficiente.

Diante desse cenário, surgem algumas questões importantes a serem exploradas. Como por exemplo: As tecnologias da indústria 4.0 foram benéficas no tempo de covid? Quais as maiores mineradoras do mundo e por quê elas estão se preocupando cada vez mais com a sustentabilidade? E também, quais países estão na frente da aplicação da Mineração 4.0 e qual sua relação com o desenvolvimento tecnológico e econômico. Essas questões são cruciais para entender o atual panorama da Mineração 4.0 e suas implicações para a indústria e para a sociedade como um todo.

1.1 Objetivos

Este trabalho busca explicar o surgimento e o conceito de Mineração 4.0 e fazer a análise de casos de sucesso de empresas mineradoras que utilizam tecnologias da Mineração 4.0. Também busca identificar os benefícios e vantagens que as tecnologias da Mineração 4.0 podem trazer às empresas mineradoras, discutir os desafios enfrentados por essas empresas ao implementar tecnologias de mineração inteligente buscando fazer uma comparação entre as práticas de mineração inteligente de diferentes empresas mineradoras, fazer uma análise dos impactos sociais, ambientais e econômicos da utilização de tecnologias da Mineração 4.0

2. METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado teve como objetivo analisar as tecnologias e empresas envolvidas na Mineração 4.0, com foco na sustentabilidade. O presente trabalho utilizou Referência Sistemática da Literatura através das bases Scopus e Google Scholar, com as palavras-chave *mining 4.0*, *smart mining*, *technology*, *technologies* e *sustainability*. Na base Scopus tivemos um resultado total de 50 artigos científicos. Em seguida, foram realizadas buscas na base Google Scholar com as mesmas palavras-chave, resultando em 29 artigos científicos relevantes. Totalizando assim, 79 artigos no total, contudo vários deles repetidos nas duas plataformas. Desses 79 artigos foram excluídos os:

- 1- Repetidos em ambas as plataformas (Scopus e Google Scholar)
- 2- Os em línguas diferentes da língua inglesa
- 3- Os de ano inferior a 2012
- 4- E os com relação com data mining

Totalizando enfim 50 artigos científicos nessa primeira etapa de identificação de artigos. O processo de triagem dos artigos é representado na tabela 1.

Etapa	Filtro	Número de Artigos	
		Scopus	Google Scholar
1	Total de Artigos Encontrados utilizando as palavras chaves "mining 4.0", "smart mining", "technology", "technologies" and "sustainability"	50	29
2	Língua Diferente da Língua Inglesa	7	4
3	Ano Inferior a 2012	5	0
4	Relação a Data Mining	5	3
Artigos repetidos nas duas bases		5	
Total analisado		50	

Tabela 1: Relação de artigos analisados nesta primeira etapa da metodologia

Desses 50 artigos analisados, montamos um gráfico para mostrar o quão atual é o tema abordado nesse trabalho de conclusão de curso. Sendo assim, foi montado um gráfico abaixo para correlacionar os anos a quantidade de artigos publicados.

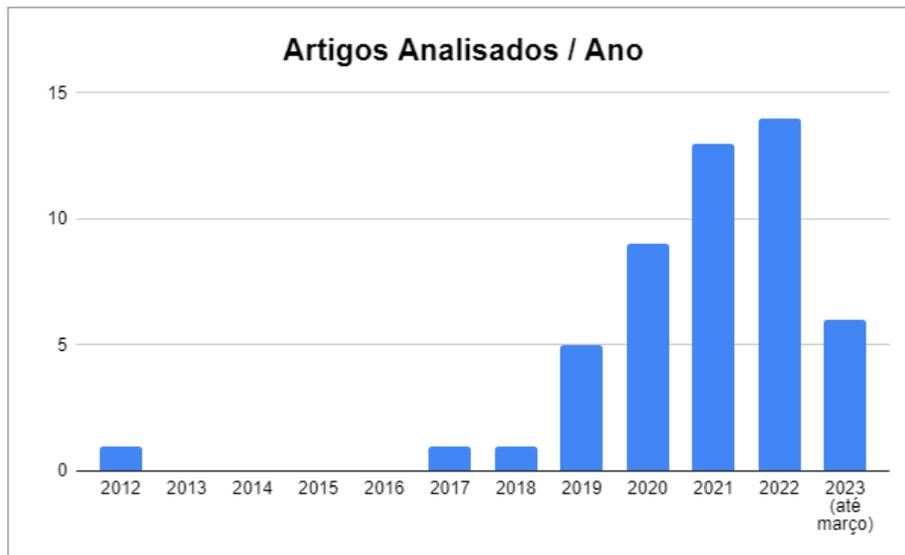


Gráfico 1: Relação dos artigos publicados e analisados no decorrer dos anos.

Além disso, também fizemos a análise de quais países dos primeiros autores dos 50 artigos analisados no trabalho, para assim sabermos quais os países pioneiros na escrita de artigos acadêmicos sobre Mineração 4.0.

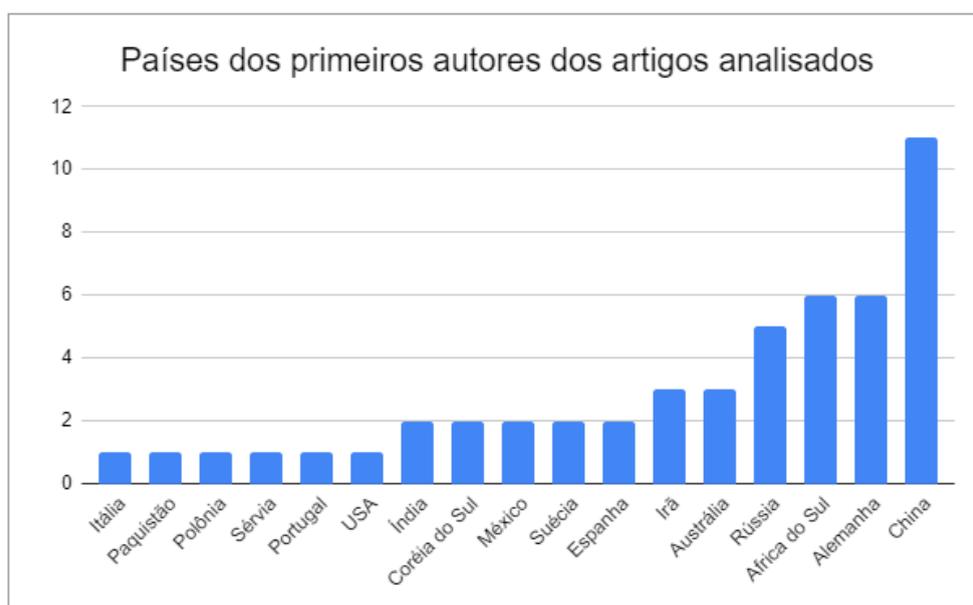


Gráfico 2: Relação dos países dos primeiros autores dos artigos analisados

Com base no gráfico 2 analisado concluímos que os países que estão na frente de publicações sobre Mineração 4.0 são a China, Alemanha, África do Sul e Rússia.

Após essa etapa do trabalho de conclusão de curso realizamos um fichamento desses 50 artigos em que analisamos empresas que utilizam tecnologias da mineração 4.0, como por exemplo a Vale, Rio Tinto, BHP e Fortescue Metal Group.

Depois disso, coletamos dados sobre os casos de sucesso dessas empresas através de fontes confiáveis, como relatórios de sustentabilidade, sites dessas empresas, jornais e revistas. Sendo assim, foi realizada uma pesquisa exploratória, com a análise de diversas matérias publicadas em veículos de imprensa e sites oficiais.

Posteriormente analisamos esses dados dessas empresas coletadas em que as informações foram organizadas de acordo com cada empresa estudada, comparando suas práticas de mineração, tecnologias utilizadas e impactos em relação à sustentabilidade.

3. RESULTADOS

3.1 O Estado da Arte da Mineração 4.0

3.1.1 As Revoluções Industriais

As quatro revoluções industriais representam diferentes fases de transformação na produção industrial e são caracterizadas pelo surgimento de novas tecnologias e inovações que mudaram radicalmente a forma como as coisas são feitas. A tecnologia teve um papel fundamental para essas evoluções.

Para Cavalcanti 2011, às Revoluções Industriais vão além da ideia de grande desenvolvimento dos mecanismos tecnológica aplicados à produção, na medida em que: consolidou o capitalismo; aumentou de forma rapidíssima a produtividade do trabalho; originou novos comportamentos sociais, novas formas de acumulação de capital, novos modelos políticos e uma nova visão do mundo; e talvez o mais

importante, contribuiu de maneira decisiva para dividir a imensa maioria das sociedades humanas em duas classes sociais opostas e antagônicas: a burguesia e o proletariado.

A importância dessas revoluções industriais é que cada uma delas transformou profundamente a economia global, gerando novos empregos, acelerando o crescimento econômico e melhorando a qualidade de vida das pessoas. A quarta revolução industrial, em particular, tem o potencial de revolucionar ainda mais a maneira como vivemos e trabalhamos, trazendo desafios e oportunidades significativas para empresas, governos e sociedade como um todo.

A figura 1 de Reis 2021, representa as quatro revoluções industriais que veremos mais detalhadamente nos próximos tópicos deste trabalho.



Figura 1: Evolução das diversas fases de evolução das revoluções industriais. Fonte (Reis 2021)

3.1.1.1 Pré a Primeira Revolução Industrial

No livro *Before the Industrial Revolution*, o autor Cipolla 1994 cita que o período que antecedeu a Primeira Revolução Industrial foi marcado por mudanças significativas na economia, na sociedade e na tecnologia. A agricultura continuava a ser a atividade predominante, mas o comércio e a manufatura estavam se

desenvolvendo rapidamente. Novas técnicas de produção e transporte estavam sendo desenvolvidas, e as cidades estavam se expandindo.

Além disso, antes da primeira revolução industrial as condições de vida eram geralmente precárias para a maioria da população. A falta de tecnologia e de meios de transporte eficientes limitavam a circulação de bens e a economia em geral. A primeira revolução industrial mudaria tudo isso, ajudando a transformar a economia e a sociedade.

Segundo Decicino (2011) a Primeira Revolução Industrial começou na Inglaterra, por volta de 1760. Essa Revolução foi caracterizada pelo uso de novas fontes de energia, pela utilização de máquinas movidas a vapor, pelo desenvolvimento dos meios de comunicação, o chamado telégrafo e por ter ocorrido a divisão e especialização do trabalho.

Para Lima e Neto (2017) o século XVIII, da Indústria 1.0, ocorreu uma sucessão de invenções que deram origem ao modo de produção fabril, no qual aconteceu uma série de melhorias no processo produtivo que contribuiu para o início da Revolução Industrial. De modo geral, foi além do aparecimento de novas máquinas e fábricas, aumento de produtividade e do nível de renda. Na verdade, foi uma Revolução que transformou a Inglaterra e o continente europeu de uma forma brilhante, com consequências enraizadas nas relações sociais. Além disso, os autores afirmam que as origens da Revolução Industrial na Inglaterra são complexas e diversas, onde a sociedade assistiu a mudança da produção agrária e de manufatura para uma economia industrial com base em princípios capitalistas.

Para Cavalcanti (2019), a criação do motor a vapor do engenheiro James Watt, foi de grande importância, pois impulsionou e caracterizou a primeira Revolução Industrial, dinamizando as relações de tempo e espaço que eram conhecidas até então. Esse motor a vapor se baseia na transformação de energia térmica proveniente da queima de carvão em energia mecânica que realizará o trabalho necessário para determinada situação, que poderia substituir os antigos meios de realização de trabalho como animal, humana ou proveniente da força da água.

Essa revolução teve um impacto profundo na sociedade, mudando a forma como as pessoas trabalhavam e viviam. As máquinas a vapor e outras inovações tecnológicas permitiram a produção em massa de bens manufaturados, tornando-os

mais acessíveis e baratos. Isso, por sua vez, ajudou a estimular o crescimento econômico e a elevar o padrão de vida das pessoas.

No entanto, as condições de trabalho nas fábricas eram frequentemente precárias e insalubres, e muitos trabalhadores eram explorados. Além disso, a produção em massa de bens manufaturados e a intensificação da mineração para fornecer matérias-primas também tiveram impactos negativos no meio ambiente.

3.1.1.2 Segunda Revolução Industrial

A segunda revolução industrial foi um período de intensa inovação e mudanças tecnológicas que ocorreu no final do século XIX e início do século XX. Ela foi caracterizada por uma série de avanços importantes na área da tecnologia da informação, incluindo a invenção do telégrafo, do rádio e do telefone, e pela popularização da eletricidade. Segundo Silva 2013, essa revolução industrial teve destaque pela busca de maiores lucros; especialização do trabalho; ampliação da produção.

Para Griffin (2014) a Segunda Revolução Industrial foi caracterizada pela expansão do uso de máquinas nas indústrias, aumento do uso de energia a vapor, produção e uso de ferro e aço, levando à construção de ferrovias. O uso de eletricidade, telégrafo, telefone e petróleo também foi fundamental nesse período, de 1870 até o início da Primeira Guerra Mundial em 1914.

Essa revolução teve um impacto profundo na sociedade, mudando a forma como as pessoas se comunicavam, trabalhavam e viviam. A popularização da electricidade, por exemplo, permitiu a criação de fábricas mais eficientes, que puderam produzir bens de forma mais rápida e barata. A invenção do telefone permitiu uma comunicação mais fácil e pessoal.

Segundo Cuogo (2012), de certa forma, a Segunda Revolução Industrial é uma fase do processo de industrialização, visto que não ocorreu uma ruptura e um reinício da Revolução Industrial. Houve apenas uma evolução e expansão - tanto no âmbito geográfico quanto nas questões tecnológicas entre o período que compreende a Primeira Revolução e a Segunda Revolução. Houve, principalmente, estímulo na fabricação e produção de bens nas indústrias e expansão das ferrovias e navios a vapor.

Boettcher (2015) explica que foi nessa revolução que começou o Fordismo de Henry Ford, criado em 1914, esse conceito se refere aos sistemas de produção em massa e tinha em vista racionalizar a produção capitalista por meio de inovações técnicas, onde de um lado acontecia a produção em massa e de outro o consumo em massa. Além disso, a segunda revolução industrial também foi marcada pela invenção e popularização de novos produtos, como automóveis, aviões e aparelhos domésticos. Esses produtos mudaram a forma como as pessoas viviam e se locomoviam, e ajudaram a tornar a vida mais fácil e conveniente.

No entanto, a segunda revolução industrial também teve seus efeitos negativos. Por exemplo, a produção em massa de bens e a intensificação da mineração para fornecer matérias-primas para a indústria tiveram impactos negativos no meio ambiente. Além disso, a crescente dependência da electricidade e da tecnologia também trouxe questões sociais, como a crescente desigualdade econômica e a polarização política.

3.1.1.3 Terceira Revolução Industrial

A terceira revolução industrial, que começou na década de 1960, também chamada revolução tecnológica e científica, foi marcada pelo desenvolvimento de tecnologias eletrônicas e automação industrial, tendo ocorrido uma mudança significativa no processo produtivo. Para Mowery (2009) ocorreu uma mudança de dispositivos puramente mecânicos e eletrônicos para computadores digitais e tecnologias de gravação lançou a Era da Informação, ou Revolução Digital, também conhecida como a Terceira Revolução Industrial.

Medeiros e Rocha (2004) resumem que a terceira Revolução Industrial constitui um processo difuso que repercute na dimensão cultural; o chamado pós-modernismo influencia a arte e os costumes. No que diz respeito à política e à economia gerou o chamado neoliberalismo e a era da globalização. Essa transformação no modo de produção ocorre simultaneamente na organização do Estado e no processo de trabalho nos setores: primário (agropecuária, extração de minérios), secundário (indústria, pesquisa, informática) e terciário (serviços).

Ela ajudou a transformar a produção em massa, o que permitiu uma produção mais rápida e eficiente de bens e serviços. A terceira revolução industrial

também viu a ascensão da informática, da robótica e da internet, que mudaram a forma como as pessoas se comunicam e trocam informações. A automação permitiu que atividades realizadas por seres humanos pudessem ser realizadas por máquinas.

“O desemprego traz implicações sociais, culturais e políticas, com ressonância no modelo econômico, na estrutura da sociedade, nas relações de produção, nas subjetividades e intersubjetividades e na produção da vida cotidiana, provocando insegurança, intranquilidade e mudando as relações de poder. A Terceira Revolução Industrial imprime a marca da exclusão, na qual a força de trabalho é dicotomizada em trabalhadores centrais e periféricos, desempregados e excluídos, dividindo também a parcela de apreensão do conhecimento e a utilização de tecnologias, gerando relações desiguais de poder pelo saber e pelo controle econômico, colocando no topo da escala os empregados das grandes empresas, seguidos dos trabalhadores do setor informal, cujo trabalho é precário e parcial. No extremo inferior da escala estão os desempregados, muitos dos quais não mais conseguirão voltar ao mercado de trabalho, por constituírem a classe de desempregados vítimas do denominado desemprego estrutural” (MEDEIROS e ROCHA, 2004)

3.1.1.4 Quarta Revolução Industrial

A Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, é uma abordagem que foi apresentada pela primeira vez por Klaus Schwab, fundador e presidente executivo do Fórum Econômico Mundial, em um artigo publicado em 2011. Segundo Schwab, a Quarta Revolução Industrial se diferencia das revoluções anteriores por combinar tecnologias digitais, como inteligência artificial e internet das coisas, com a indústria física.

A Quarta Revolução Industrial foi publicamente lançada na feira de Hannover em 2011, na Alemanha. A feira de Hannover é uma das principais feiras industriais do mundo, que reúne líderes empresariais, políticos e acadêmicos para discutir as tendências e desafios do setor industrial. No evento, o Governo Alemão apresentou a Indústria 4.0 como uma estratégia para fortalecer a competitividade da indústria manufatureira alemã e impulsionar o crescimento econômico.

Segundo Nobre (2021), na última década surgiram diversas tecnologias, como Big Data, Internet das Coisas, Manufatura Aditiva, Computação em Nuvem e Blockchain, que permitem que bilhões de pessoas conectem uns aos outros e compartilhem informações e conhecimentos como nunca antes. Este fenômeno está sendo considerado como a Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. Para Griggs (2013) essa é a primeira vez que uma revolução industrial está tratando a questão do desenvolvimento sustentável como um de seus principais elementos, principalmente porque governos, organizações e consumidores têm se preocupado mais não só com o lado econômico, mas também com o ambiental e aspectos sociais.

De acordo com Klaus Schwab, a Quarta Revolução Industrial está mudando profundamente a forma como as pessoas vivem, trabalham e se relacionam entre si. Ela está criando novos modelos de negócios, transformando indústrias existentes e promovendo a inovação em todos os setores. Além disso, está levando a uma economia cada vez mais digital e ao surgimento de novos trabalhos e habilidades.

A Quarta Revolução Industrial traz consigo uma série de desafios e questões éticas e sociais, como a proteção da privacidade, a segurança cibernética e a inclusão digital. É importante destacar que a Indústria 4.0 não é apenas sobre tecnologia, mas também sobre as pessoas e suas necessidades.

3.2 Conceitos da Indústria 4.0 e Mineração 4.0

A mineração 4.0, também conhecida como smart mining, é a evolução da mineração tradicional através da aplicação de tecnologias avançadas, tais como Automação e Drones, Inteligência Artificial e Machine Learning, Internet das Coisas, Big Data, Realidade Aumentada e Virtual e Impressão 3D. Essas aplicações serão explicadas posteriormente no trabalho. A mineração 4.0 começou após a quarta revolução industrial, que iniciou em 2011. Um de seus objetivos é tornar a indústria da mineração mais eficiente, segura e sustentável. O surgimento desta nova abordagem vem crescendo nos últimos anos e tem ganhado importância devido à necessidade de aprimoramento na indústria de mineração.

Para Bartnitzki (2017), a Mineração 4.0 significa o avanço da automação durante a extração, transporte e processamento para obter assim uma matéria prima mais econômica por meio da automação de operações de mineração mecanizadas que são altamente produtivas.

Atualmente, alguns países estão na frente da Mineração 4.0. Destaca-se na lista a Austrália, com várias mineradoras já adotando tecnologias de inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) em seus processos de extração. Outros países como a China e a África do Sul também vêm investindo em novas tecnologias para o setor.

Mendoza (2020) diz que Mineração 4.0 significa automação no processo: extração, transporte e processamento. Também possibilita um menor impacto negativo no meio ambiente, maior produtividade e eficiência, incluindo a melhoria em atividades como gestão de minas e saúde e segurança dos funcionários através do suporte de tecnologias de digitalização. Por outro lado, a Mineração 4.0 permite uma produção sustentável com economia de recursos; tecnologias associadas à Indústria 4.0 permitem economizar em custos de transporte, tratamento e descarte de minerais inúteis. A Mineração 4.0 promove a implementação de atividades de baixo impacto ao meio ambiente e às áreas urbanas, com efeito positivo na melhoria da produtividade, no uso eficiente de recursos e na melhoria da segurança.

Segundo Bertayeva (2019), a implementação do conceito, Indústria 4.0 envolve a criação de uma indústria inteligente que evoluiu desde o uso de sistemas de informação e comunicação até sistemas ciberfísicos, estes sistemas permitem a transformação de informação do meio físico para o digital.

Os benefícios da implementação da Mineração 4.0 são muitos, incluindo aumento de eficiência, segurança, redução de custos e preservação do meio ambiente. Por meio de tecnologias avançadas, como sensores IoT, drones, robôs, análise de dados e inteligência artificial, é possível acompanhar e controlar os processos de extração de maneira mais precisa, garantindo a segurança dos trabalhadores e a eficiência na utilização de recursos. É citado por Löow et al., 2019, que várias tarefas desempenhadas por equipas de trabalhadores podem vir a ser substituídas por trabalhadores que sozinhos vão estar equipados com ferramentas digitais

Além disso, a Mineração 4.0 tem um impacto positivo na preservação do meio ambiente, já que permite uma extração mais sustentável de recursos minerais.

O uso de tecnologias avançadas e processos mais eficientes ajuda a minimizar o impacto da extração em áreas sensíveis, preservando o equilíbrio ambiental. Dessa forma, a Mineração 4.0 é uma importante tendência para o setor de mineração que oferece benefícios significativos, como aumento de eficiência, segurança, redução de custos e preservação do meio ambiente.

Algumas das empresas que utilizam tecnologias da indústria 4.0 na mineração são a BHP, Rio Tinto, Glencore, Vale, Anglo American, Eickhoff Bergbautechnik, Fortescue Metal e outras, que veremos a seguir neste mesmo trabalho.

3.1.3 Inovações Tecnológicas

A indústria 4.0 está impulsionando a inovação tecnológica na mineração, trazendo diversas soluções digitais e tecnológicas para otimizar processos, melhorar a segurança, reduzir custos e aumentar a produtividade. Algumas dessas inovações tecnológicas são: Automação, Inteligência Artificial, Machine Learning, Internet das Coisas, Big Data, Realidade aumentada e Virtual e Impressão 3D.

3.1.3.1 Automação e Drones

A automação e o uso de drones são tecnologias essenciais na Mineração 4.0 e estão sendo amplamente utilizadas por empresas de mineração que se adaptaram para a Mineração 4.0.

Segundo Zhironkina (2023) as máquinas automáticas podem ser usadas de diversas formas na Mineração 4.0 pois tem como benefícios uma operação segura, redução de custos acidentais, aumento da eficiência, e tem como malefícios os altos custos de implementação, redução de empregos, demanda por pessoal especializado.

A automação na Mineração 4.0 envolve o uso de equipamentos autônomos e semi autônomos para a realização de tarefas como perfuração, carregamento e transporte de minério. Isso permite que as operações de mineração sejam mais eficientes, seguras e sustentáveis. Alguns dos benefícios da automação na são o

aumento da produtividade pois é possível aumentar a produtividade da mineração e reduzir o tempo de inatividade dos equipamentos, a redução de custos pois diminui a mão de obra nas mineradoras e também melhorar a eficiência dos processos de mineração, a melhoria na segurança pois reduz o risco de acidentes devido a presença humana ser minimizada em áreas perigosas e a redução do impacto ambiental pois a tecnologia possibilita a utilização mais eficiente de recursos e a redução do consumo de energia.

Para Stachowiak (2021) as áreas de aplicação de dispositivos semelhantes para o controle robótico totalmente autônomo de transportadores de mina podem ser monitoramento de equipamentos em locais especialmente perigosos e de difícil acesso, diagnóstico do estado da correia transportadora em vários tipos de minas e diferentes condições climáticas de pedreiras, adaptação de métodos de controle para condições extraordinárias em minas (alto teor de poeira, contaminação por gases, etc.).

O uso de drones na Mineração 4.0 é outra tecnologia importante para a otimização de processos e a melhoria da eficiência e segurança na mineração. E tem como benefício a coleta de dados (geológicos e topográficos) em tempo real, permitindo a análise e tomada de decisão mais rápida e precisa, mapeamento de áreas inacessíveis pois podem mapear áreas de mineração que são de difícil acesso ou perigosas para os trabalhadores e a inspeção de equipamentos possibilitando detectar problemas de forma mais rápida.

Segundo o Instituto Minere (2019) O drone ou veículos aéreos não tripulados (vant), tem um papel fundamental na mineração quanto em outros setores da economia, como agricultura, engenharia, meio ambiente e outros. Tendo a possibilidade de acessar lugares de difícil acesso, alcançar áreas distantes e inserir diferentes tipos de sensores, como laser scanning, magnetômetro, câmeras termais, multiespectrais e a básica rgb, o vant trouxe para a indústria, assim como para a sociedade, diversas possibilidades de trabalho. Na mineração, um destes processos, seria o mapeamento de toda a mina em 3d, construção de curvas de nível e monitoramento das cavas, calcular pilhas de rejeito, inspeção de maquinários e nos usos mais avançados, como por exemplo o uso de magnetômetros para captar áreas mais propícias para o avanço de uma mina de ferro, assim como para prospecção de novos locais.

Para Shahmoradi (2020) o uso de drones na indústria mineradora hoje é bastante diverso: mapeamento 3D do ambiente da mina, controle de qualidade das operações de perfuração e detonação e estado dos depósitos de carvão, monitoramento da sustentabilidade das barragens de rejeitos. De acordo com isso, também há uma significativa diversidade entre os tipos de projetos de drones e seu equipamento. A tendência mais moderna na prática de uso de drones na mineração é seu uso em minas subterrâneas, gradualmente superando problemas específicos, como falta de GPS e heterogeneidade do sinal wireless, espaço limitado, concentração de poeira e gases.

3.1.3.2 Inteligência Artificial e *Machine Learning*

A inteligência artificial (IA) e o *machine learning* (ML) são tecnologias essenciais na Mineração 4.0. A IA e o ML são ferramentas importantes na mineração 4.0, pois permitem que grandes volumes de dados sejam analisados de forma inteligente e automatizada. Com essas tecnologias, é possível prever e prevenir falhas em equipamentos, melhorar a produtividade e a eficiência dos processos de mineração, além de aumentar a segurança no trabalho.

Para Schnitzler (2019) e Veronesi (2019) a evolução dos métodos estatísticos e computacionais de Inteligência Artificial (IA) e aprendizado de máquina (Machine Learning - ML) como o aprendizado profundo de máquina (Deep Learning - DL) e Redes Neurais Artificiais (RNA) são ferramentas importantes na geoquímica e mineração atuais, pois permitem a análise de dados geofísicos de alta resolução e em grande escala, que pode proporcionar descobertas, aprimoramento de processos e ganhos de produtividade de forma complementar aos métodos de geoestatística tradicionais.

Para Sunagar (2022) e Siderov (2020) a inteligência artificial, um modo único de interação entre humanos e máquinas, possibilitou que as máquinas interajam entre si e com sistemas industriais por meio da Internet das Coisas. Transferindo esse padrão para a mineração, podemos afirmar um aumento no nível de integração de sistemas de mineração, transporte e processamento, a exclusão gradual de uma pessoa de zonas especialmente perigosas e o aumento na operação ininterrupta de

equipamentos de mineração durante a introdução de tecnologias de machine learning.

Alguns dos benefícios da aplicação da IA e do ML na mineração 4.0 são a melhoria na segurança pois podem ser usados para detectar problemas de segurança e riscos antes que ocorram, aumentando a segurança no ambiente de mineração, a otimização de processos pois permite a análise de dados em tempo real otimizando os processos de mineração, reduzindo o tempo de inatividade e minimizando o desperdício e aumentando a eficiência, a descoberta de depósitos minerais pois essas tecnologias permitem uma análise mais detalhada dos dados geológicos, ajudando a identificar a presença de minerais valiosos, o aumento da produtividade pois é possível obter dados em tempo real sobre o desempenho dos equipamentos, permitindo ajustes rápidos e aumentando a produtividade da mineração e a redução de custos pois com a otimização dos processos e a prevenção de falhas, os custos da mineração são reduzidos, aumentando a lucratividade da empresa.

Para Khan (2022) o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para prevenir explosões de poeira de carvão pode reduzir significativamente os riscos de acidentes provocados pelo homem em minas de carvão e usinas termelétricas.

3.1.3.3 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) Internet das Coisas Industrial (IIoT) são tecnologias que conecta dispositivos e sensores para coletar e compartilhar dados em tempo real. Na Mineração 4.0, a IoT é usada para coletar dados de sensores em equipamentos e máquinas de mineração, permitindo o monitoramento e controle remoto de processos e equipamentos. Alguns dos benefícios da IoT na Mineração 4.0 são o monitoramento remoto pois permite que os dados sejam coletados e analisados em tempo real o que permite o monitoramento e controle remoto de processos e equipamentos de mineração, a manutenção preditiva pois com a coleta e análise de dados, é possível identificar problemas e realizar manutenção preventiva antes que ocorram falhas fazendo reduzir o tempo de inatividade dos equipamentos, a redução de custos pois permite o monitoramento e controle remoto, minimizando a necessidade de presença humana em áreas perigosas e

reduzindo o consumo de energia, a melhoria na segurança pois permite a detecção de possíveis riscos à segurança em tempo real, reduzindo o risco de acidentes e o aumento da eficiência pois permite a coleta e análise de dados em tempo real, permitindo a identificação de gargalos na produção e a melhoria da eficiência dos processos de mineração.

Segundo o Instituto Minere (2019) Através da IIoT, a perfuração e o jateamento podem ser otimizados, levando a uma melhor programação de minas e logística. A integração da tecnologia da IIoT em uma operação completa de mina pode expandir o ROI, impulsionando o rendimento e reduzindo os gastos.

Para Hossein (2020) as tecnologias modernas da Internet das Coisas oferecem ao setor de recursos minerais uma oportunidade única de excluir os humanos de muitos processos de operação de máquinas e mecanismos em condições complexas, prejudiciais e perigosas de mineração. Como resultado, há uma redução radical na influência do fator humano nas operações de mineração e seu fator perigoso nos humanos, graças aos Sensores Inteligentes para temperatura, umidade, luz, velocidade, radiação infravermelha passiva e distância.

Alguns exemplos de aplicação da IoT na mineração 4.0 incluem o monitoramento de equipamentos em tempo real, a monitoração de vibrações e temperaturas, o monitoramento de níveis de água e a detecção de gases tóxicos. A IoT é uma tecnologia que pode trazer muitos benefícios para a mineração 4.0, melhorando a eficiência, segurança e sustentabilidade da indústria.

Segundo o Instituto Minere (2019) depois de avaliar os usos e benefícios da IIoT para a indústria de mineração, o investimento significativo de muitas empresas de recursos nessa tecnologia é facilmente justificável. Como a IIoT se desenvolve rapidamente, as minas estão se tornando mais produtivas. Embora a mineração esteja sujeita a ciclos de expansão e retração, a IIoT pode criar operações mais seguras e consistentes para aumentar o crescimento e a segurança.

Segundo Park (2021) um ponto importante da aplicação de interações de máquina para máquina com base na IoT Industrial (IIoT) é o monitoramento em tempo real das condições técnicas do equipamento de mineração. O escopo da Internet das Coisas na mineração se estende muito além do diagnóstico avançado e controle da carga de equipamentos ao longo de toda a cadeia de produção. A "Mina Digital" é baseada em interações na plataforma da Internet das Coisas, como

planejamento e agendamento dinâmicos, monitoramento de segurança, cadeia de suprimentos automatizada.

3.1.3.4 *Big Data*

Big Data é uma tecnologia que se refere ao armazenamento, gerenciamento e análise de grandes volumes de dados que são gerados a partir de diferentes fontes. Na Mineração 4.0, o uso de *Big Data* pode trazer diversos benefícios, tais como a tomada de decisões mais informadas que pode melhorar a eficiência dos processos, auxilia na tomada de decisões mais informadas, identificação de padrões e anomalias, o que pode levar a uma melhor compreensão do comportamento das máquinas e equipamentos de mineração, otimização dos processos, previsão de falhas pois o monitoramento de equipamentos de mineração por meio de sensores e a análise de *Big Data* podem ser usados para prever falhas antes que elas ocorram, permitindo a manutenção preventiva e reduzindo o tempo de inatividade, aumento da segurança pois é possível identificar possíveis riscos à segurança dos trabalhadores, permitindo a tomada de medidas preventivas e reduzindo o risco de acidentes.

Segundo Tyleckova (2020), ao contrário da análise de pequenos fluxos de dados pelos sistemas autônomos de informação, o *Big Data* permite gerar novos conhecimentos que mudam o cenário digital da mineração, desenvolvem ML e a IA. Para Sishi (2020) *Big Data* pode ser considerado como a base para a gestão multilocal e multicanal dos processos de mineração. O núcleo de tal gestão é a integração de sistemas de informação díspares de várias áreas de mineração. Isso fornece uma conexão de informações sobre os componentes econômicos heterogêneos de produção do ciclo de negócios de uma empresa.

Para Hassani (2022) um olhar especial sobre o papel do *Big Data* no desenvolvimento da mineração está associado à superação da incerteza no fornecimento da economia com energia e transportadores de energia. A incerteza, que se forma nos mercados mundiais, tem um impacto direto nos custos e na produção das empresas de mineração, e em sua rentabilidade. Portanto, a análise de *Big Data* permite adaptar os processos de mineração às mudanças no mercado global de matérias-primas, levando em conta a expansão da energia alternativa.

Algumas aplicações de *Big Data* na mineração 4.0 incluem a análise de dados de sensores para monitorar o desempenho de equipamentos, a análise de dados de produção para identificar oportunidades de melhoria e a análise de dados ambientais para medir e monitorar o impacto ambiental da mineração. O uso de *Big Data* na mineração 4.0 pode trazer muitos benefícios para a indústria, melhorando a eficiência, segurança e sustentabilidade da mineração.

Para Zhironkina (2023) *Big Data* pode ser usado em parâmetros de operação de máquinas, mineração, transporte e dados de processamento e tem como benefícios o monitoramento contínuo dos parâmetros em tempo real, melhoria da organização do trabalho e ação preventiva. E como malefícios a grande quantidade de dados processados, necessidade de ferramentas analíticas avançadas, custos de manutenção.

3.1.3.5 Realidade Aumentada e Virtual

Realidade aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR) são tecnologias que podem ser usadas na mineração 4.0 ou smart mining para melhorar a eficiência e segurança dos processos de mineração. A AR consiste na sobreposição de elementos virtuais sobre o mundo real, enquanto a VR cria um ambiente virtual imersivo.

Segundo o site Indústria 4.0 Manufatura Avançada (2020) ocorre umas das formas de realidade aumentada e virtual quando a cava é representada por um modelo virtual, que pode ser visualizada em tablets, celular e dispositivos portáteis que permite a interação entre pessoas mesmo longe geograficamente, que tem como ferramenta a RA para visualizar informações, resultados de simulações com a utilização de dados reais, plotagem de resultados de análises preditivas e atualização automática do modelo virtual baseado por dados coletados em drones e outras ferramentas.

Alguns benefícios da AR e VR na mineração 4.0 incluem o treinamento e simulação pois podem ser usados para treinar os trabalhadores de mineração, simulando situações de risco sem expô-los a perigos reais o que causa o aumento da segurança dos trabalhadores reduz o tempo e custos de treinamento, visualização e planejamento pois podem ser usadas para visualizar e planejar a

mina, permitindo que os trabalhadores vejam como a mina será antes mesmo de ser construída podendo ajudar na identificação de problemas e oportunidades de melhoria antes de iniciar as operações, manutenção e reparos fornece informações em tempo real sobre o equipamento de mineração e auxiliar os técnicos de manutenção em reparos podendo reduzir o tempo de inatividade e aumentar a eficiência operacional, aumento da segurança pois pode ser usada para sobrepor informações de segurança em tempo real, como avisos de perigo, rotas de fuga e outras informações, podendo ajudar a aumentar a segurança dos trabalhadores, inspeção e monitoramento para permitir a identificação de possíveis problemas e falhas, melhoria da colaboração e comunicação entre os trabalhadores de mineração, permitindo que eles compartilhem informações em tempo real e trabalhem juntos de maneira mais eficiente.

Para Zhironkina (2023) a realidade virtual e aumentada pode ser usada na saúde e treinamento vocacional da mineração, manutenção de máquinas e tem como benefícios ser uma forma moderna de conduzir treinamentos, limitando erros humanos, controle automático do trabalho, preparação do funcionário para situações de emergência. Porém tem como malefícios os altos custos, recursos limitados de equipamentos, limitações técnicas, a necessidade de melhorar as qualificações da equipe.

3.1.3.6 Impressão 3D

A impressão 3D, também conhecida como fabricação aditiva, é uma tecnologia que pode ser utilizada na mineração 4.0 para criar objetos tridimensionais a partir de um modelo digital.

Para Dickey (2013) modelos virtuais 3D de equipamentos de mineração permitem não só melhorar suas unidades individuais, mas também reduzir o impacto de fatores prejudiciais aos seres humanos. Um desses fatores é a vibração, que pode ser reduzida na área onde os operadores estão localizados usando modelos dinâmicos 3D de transmissão de vibração entre diferentes nós na fase de projeto.

Como benefícios da impressão 3D na mineração são a redução de custos pois a impressão 3D pode ser usada para produzir peças e componentes sob

demanda, diminuindo os custos de armazenamento e transporte de peças de reposição, personalização pois pode produzir peças e componentes personalizados, adaptados às necessidades específicas de cada operação de mineração, redução de tempo de inatividade pois pode ser usada para produzir peças de reposição rapidamente, o que pode reduzir o tempo de inatividade do equipamento de mineração e aumentar a eficiência operacional, prototipagem pois pode ser usada para criar protótipos de novos equipamentos e componentes, permitindo que os engenheiros de mineração testem e aprimorem seus projetos antes de investir em produção em larga escala e redução de desperdício pois cria peças e componentes sob demanda.

Para Zhironkina (2023) a impressão 3D pode ser utilizada em trabalhos de perfuração e explosão e tem como benefício a melhoria da eficiência e segurança e redução do consumo de materiais. E como malefícios o alto custo do equipamento e necessidade de treinamento adicional.

3.1.3 Sustentabilidade e Mitigação de Riscos

Em 1987 a ONU definiu sustentabilidade como um termo que se refere à capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades. O surgimento da preocupação com a sustentabilidade pode ser rastreado até a antiguidade, quando civilizações como a grega e a romana já tinham preocupações com a gestão dos recursos naturais e a preservação do meio ambiente. No entanto, a preocupação com a sustentabilidade ganhou mais destaque a partir da Revolução Industrial, quando houve um aumento significativo na exploração dos recursos naturais e a consequente degradação do meio ambiente.

Segundo a PNUMA (2019), a mineração é uma atividade intensiva em recursos naturais que pode ter um impacto significativo no meio ambiente e nas comunidades locais, afetando a biodiversidade, a qualidade do ar e da água, e a saúde e os meios de subsistência das pessoas.

Para Zhironkin (2022) o desenvolvimento de tecnologias de mineração inovadoras deve contribuir para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável, resolvendo quatro questões de fornecer à humanidade matérias-primas

e energia de alta qualidade, reduzindo o impacto nos ecossistemas naturais e sociais e acelerando sua recuperação

Sendo assim, o surgimento da Mineração 4.0 pode trazer vários benefícios em termos de segurança do trabalho, redução da poluição e diminuição de resíduos. A utilização do monitoramento remoto, pois sensores e sistemas de monitoramento remoto podem ser usados para monitorar as condições de trabalho em tempo real, detectar anomalias e alertar os trabalhadores sobre perigos potenciais. Automação de processos pode reduzir a exposição dos trabalhadores a condições perigosas e minimizar os riscos associados a operações em minas profundas ou áreas de difícil acesso. Drones e robôs podem ser usados para realizar tarefas perigosas, como inspeção de áreas inacessíveis ou detecção de vazamentos de gases tóxicos, reduzindo a exposição dos trabalhadores a condições perigosas. Redução de poluição com a adoção de tecnologias mais limpas, como veículos elétricos, pode reduzir a emissão de poluentes e melhorar a qualidade do ar em torno das operações de mineração. Gerenciamento de resíduos, pois a adoção de tecnologias mais eficientes de processamento de minério pode reduzir a quantidade de resíduos gerados pelas operações de mineração e melhorar a eficiência no uso dos recursos.

Para Zhironkina (2023) um aumento ainda maior na produtividade e segurança das operações de mineração, é necessária uma nova geração de robôs colaborativos, que possam combinar as tecnologias de Visão e Machine Learning, eliminar em grande parte o fator humano em acidentes causados pelo homem e aumentar radicalmente a sustentabilidade da mineração. A expansão da frota de escavadeiras, perfuratrizes e caminhões basculantes robóticos excluirá completamente uma pessoa das etapas de perfuração e detonação, escavação e carregamento, processos de transporte, levantamentos geodésicos, planejamento e controle de processos operacionais. Por sua vez, o "ponto crítico" no desenvolvimento da mineração a céu aberto e subterrânea se abre para o amplo uso de drones e está associado à obtenção da informação visual, espectral e magnetométrica mais completa sobre objetos geológicos e industriais necessários para o impacto não tripulado sobre eles.

Atualmente as mineradoras se preocupam em fazer uma avaliação de impacto ambiental (AIA) que é antes de iniciar a mineração, as empresas realizam uma avaliação de impacto ambiental para identificar os possíveis impactos negativos da atividade e desenvolver medidas para mitigá-los, em fazer gestão de

resíduos, utilizar tecnologias mais limpas e também querem a participação da comunidade para desenvolver soluções que atendam a empresa e as pessoas locais. Sendo assim, em comparação com o passado, as medidas de mitigação de riscos são mais amplas e diversificadas. Antigamente, a mineração era vista como uma atividade que tinha prioridade sobre o meio ambiente e as comunidades locais. A falta de regulamentação e fiscalização adequadas resultava em práticas que causavam sérios impactos ambientais e sociais.

Para Mota e Maneschy (2017) a indústria mineral tem compromissos com a sustentabilidade que são urgentes e permanentes. O setor representa um campo rico de análise para o encontro das racionalidades econômicas e ambientais. Devido à escala das atividades e aos impactos socioambientais, e sua operação sob fortes pressões dos mercados globais de commodities, é importante entender a evolução recente desse setor.

Em resumo, a mineração 4.0 pode melhorar a segurança do trabalho, reduzir a poluição e diminuir a geração de resíduos por meio da adoção de tecnologias mais limpas, automação de processos, monitoramento remoto e uso de drones e robôs para tarefas perigosas. Isso pode melhorar a sustentabilidade das operações de mineração e reduzir o impacto ambiental dessas atividades.

3.2 Mineradoras e o Acordo de Paris

O Acordo de Paris é um acordo internacional que foi estabelecido em 2015 durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21). O objetivo principal do Acordo é limitar o aquecimento global a 2°C acima dos níveis pré-industriais, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. O Acordo exige que os países signatários tomem medidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a fim de alcançar esse objetivo.

Para evitar ultrapassar o aumento global de temperatura proposto pelo Acordo de Paris de 1,5 a 2°C e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS), que visam a redução da pobreza, é necessário um investimento rápido e significativo na descarbonização dos sistemas de energia, infraestrutura e ambiente construído. Muitas tecnologias sustentáveis

com baixo teor de carbono são mais dependentes de metais do que as equivalentes atuais de alto teor de carbono. A análise do aumento das demandas da transição para uma economia de baixo carbono mostra que isso pode levar ao próximo boom da mineração e metais, aumentando a demanda por metais em até 10 vezes até 2050.

Sobre o Acordo, em outubro de 2021 o IBRAM se posicionou que:

“1) O Setor de Mineração defende a precificação de carbono como mecanismo econômico para viabilizar a transição para a economia de baixo carbono. Para tanto, é necessário que exista um mercado de carbono robusto, creditício e regulado, a fim de promover a efetiva compensação das emissões, ou seja, por meio da compra de créditos de carbono em mercados robustos (cap and trade).

2) Apoiamos a regulamentação do Artigo 6 do Acordo de Paris, de forma que a integridade ambiental do mecanismo de precificação seja assegurada e que se fortaleçam os compromissos de redução de emissão, estabelecendo níveis de preços adequados às transformações necessárias.

3) Apoiamos a regulamentação do Artigo 6.4 sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável – MDS e o Mercado de Carbono Global, que irá contribuir com o aumento da competitividade e a consolidação da economia de baixo carbono na Mineração.

4) Incentivamos a adoção dos marcos regulatórios, voltados para impulsionar uma agenda Carbono Neutra do setor, quanto ao Pagamento por Serviços Ambientais* e fomento a um Mercado Voluntário de Carbono, proveniente desses serviços e integrado ao mercado regulado de Carbono. (*Floresta+, Floresta+ Carbono, Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais).

5) Apoiamos a mobilização e incremento do financiamento climático, oriundo dos países desenvolvidos, na efetiva aplicação em P&D&I e implementação de novas tecnologias de baixa emissão de carbono, nos processos e atividades em todas as fases do empreendimento mineral.

6) Apoiamos e incentivamos a Capacitação e Transferência de Tecnologia na transição global para uma economia de baixa emissão de carbono, a partir de incentivos reais de desenvolvimento tecnológico no uso de minerais estratégicos e equipamentos de eficiência energética e energias renováveis, no intuito de contribuir para a transição energética justa e de mobilidade.

7) Apoiamos o Plano Nacional de Adaptação Brasileiro e os financiamentos globais para a Adaptação Climática como forma de reduzir os riscos e impactos adversos ao setor mineral, bem como incentivar as práticas eficazes e necessidades de adaptação do setor.”

Sendo assim, as mineradoras são um dos setores que contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, principalmente através da extração e processamento de minerais, bem como do transporte desses materiais. Para cumprir com as metas do Acordo de Paris, as mineradoras estão implementando tecnologias da mineração 4.0 que visam aumentar a eficiência operacional, reduzir o consumo de energia e diminuir as emissões de gases de efeito estufa.

Desse modo, as mineradoras estão implementando tecnologias da mineração 4.0 para cumprir com as metas do Acordo de Paris e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. As tecnologias da mineração 4.0, como a automação, sensores inteligentes, big data, IoT e energia renovável, estão permitindo que as mineradoras aumentem a eficiência operacional, reduzam o consumo de energia e diminuam as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, as mineradoras estão se comprometendo a melhorar suas práticas de mineração sustentável, incluindo a redução de resíduos e a reciclagem de materiais. Algumas mineradoras também estão investindo em tecnologias de mineração subterrânea para evitar a remoção de grandes quantidades de solo e reduzir o impacto ambiental. Mas apesar dos avanços na tecnologia da mineração 4.0, ainda há desafios a serem enfrentados para cumprir as metas do Acordo de Paris. A mineração é um processo complexo e intensivo em recursos, e as tecnologias da mineração 4.0 podem ser caras de implementar. Além disso, a adoção dessas tecnologias pode levar tempo, pois é necessário treinar os funcionários e atualizar a infraestrutura existente.

É importante que as mineradoras continuem a investir em tecnologias da mineração 4.0 e práticas de mineração sustentável, enquanto trabalham em colaboração com governos e outras partes interessadas para alcançar as metas do Acordo de Paris. A implementação dessas tecnologias pode não apenas ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também melhorar a eficiência operacional, a segurança dos trabalhadores e a proteção do meio ambiente.

3.3 Empresas e Casos de Sucesso

Como resultado iremos explorar empresas mineradoras globais que utilizam tecnologias da indústria 4.0 na sua extração e transporte de matérias primas. Faremos a aplicação das tecnologias estudadas no capítulo 3 desse trabalho em grandes empresas da atualidade. Vale ressaltar que os casos de sucesso são apenas algumas dessas tecnologias utilizadas no dia a dia da empresa, pois na realidade a aplicação é muito mais ampla.

3.3.1 Vale

A primeira empresa a ser abordada nesse trabalho de conclusão de curso é a Vale, que é uma das maiores empresas mineradoras do mundo. Segundo o relatório de sustentabilidade da empresa publicado em 2021, a Vale atua na extração e comercialização de diversos tipos de minérios, incluindo ferro, níquel, cobre, manganês, carvão metalúrgico e térmico, metais do grupo da platina (PGM), ouro, prata e cobalto. Foi fundada em 1942, e tem sua sede localizada na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, e opera em vários países ao redor do mundo, como Canadá, Chile, Austrália, Moçambique e Indonésia, entre outros. A empresa tem investido fortemente em tecnologias de mineração 4.0, que visam aumentar a eficiência e a segurança de suas operações. Entre as tecnologias utilizadas pela empresa estão o uso de drones no pátio ferroviário, a utilização de caminhões autônomos em suas operações, a implantação de Analytics e inteligência artificial, COIs que são centros de operação integrados, digital lab e escavadeiras autônomas.

A Vale também tem investido em tecnologias para reduzir seus impactos ambientais. A empresa tem se comprometido com a redução de suas emissões de gases de efeito estufa e a conservação da biodiversidade em suas áreas de atuação. Além disso, a Vale tem investido em tecnologias para o reaproveitamento de resíduos e a recuperação de áreas degradadas pela mineração. A empresa também tem investido em tecnologias para a melhoria da segurança de seus funcionários. A empresa tem implantado sistemas de monitoramento e alerta de riscos em suas operações, além de equipamentos de proteção individual de última geração.

3.3.1.1 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Brucutu

Segundo Renger 1994, a Mina de Brucutu, da Vale está localizada no Quadrilátero Ferrífero estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, onde são lavrados corpos de minério de ferro de alto teor, compactos, semi-friáveis e friáveis, além de itabiritos enriquecidos, todos hospedados na Formação Cauê do Supergrupo Minas. Essa mina é uma das maiores minas de ferro a céu aberto do mundo, localizada na região de São Gonçalo do Rio Abaixo, em Minas Gerais, aproximadamente a 120 km a leste de Belo Horizonte.

Essa mina foi pioneira no uso de caminhões autônomos no Brasil, ela começou a usar em 2016 imensos caminhões fora de estrada, com capacidade para 240 toneladas que circulam nas vias de uma grande área de mineração sem um operador na cabine. Em 2019, essa mina se tornou a primeira do Brasil a ter 100% de seus veículos autônomos e até agora não tiveram acidentes causados por esses caminhões envolvendo pessoas. Controlados apenas por sistemas de computador, GPS, radares e inteligência artificial, os veículos se movimentam de forma eficiente entre a frente de lavra e a área de descarga. Relacionando ao modelo tradicional de transporte, a produtividade do sistema de operações autônomas é superior. A produtividade de caminhões fora de estrada tem ganhos expressivos. A operação autônoma também aumenta a vida útil do equipamento, que pode aumentar em 15% e além disso, gera menor desgaste de peças e redução dos custos de manutenção, e os custos de manutenção e consumo de combustível sejam reduzidos em 10% e também um aumento da velocidade média dos caminhões. E também, com a diminuição do uso de combustíveis no maquinário trará benefícios ambientais, pois será emitido um volume mais baixo de CO². Vale ressaltar que ao implementar a utilização dos caminhões sem motoristas, guiados à distância, a Vale conseguiu aumentar em 26% o volume de minério transportado na mina.

Demartini 2018, explica que o maior benefício citado está relacionado a um aumento na vida útil das máquinas, que a companhia espera ser de 15%. Junto com esse aspecto, vem também uma queda de 10% no consumo de combustível e nos custos de manutenção, uma vez que, ao serem operados por máquinas, os veículos trabalham de forma otimizada, o que também resulta em um volume mais baixo de emissões de CO₂ e outros gases.

Os números apresentados pela Vale indicam que o projeto de automação da mina tem sido bem-sucedido em aumentar a eficiência da operação. O aumento na quantidade de carga movimentada por hora e na velocidade média dos caminhões é significativo e pode trazer impactos positivos na produtividade da mina. Além disso, a redução estimada no consumo de combustíveis e nos custos de manutenção também é uma vantagem importante, já que pode resultar em economia de recursos para a empresa. A diminuição do desgaste dos pneus também é um ponto positivo, já que pode reduzir os custos com reposição desses equipamentos.

Além disso, em 2019 a Vale com o intuito de reduzir o uso de barragens, a Vale investiu na implementação de tecnologia de empilhamento de rejeito a seco e filtrado (dry stacking). A técnica deve permitir filtrar e reutilizar a água do rejeito e possibilita seu empilhamento, de forma a reduzir o uso das barragens. E em 2021 começou a execução desses aterros experimentais nessa Mina de Brucutu, utilizando essa forma de pilha de rejeito filtrado.

3.3.1.2 Casos de Sucesso da Vale: Complexo de Tubarão

O Complexo Tubarão é o primeiro exemplo de integração do sistema mina, ferrovia e porto, uma estratégia fundamental para a logística da mineração. O Complexo de Tubarão é uma importante operação industrial da Vale localizada na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo, no Brasil. O complexo é composto por duas usinas de pelotização, uma usina de minério de ferro e uma unidade de terminal portuário. O complexo de Tubarão é uma das principais operações da Vale no Brasil e é responsável pela produção de pelotas de minério de ferro, que são utilizadas na produção de aço em todo o mundo. A primeira usina de pelotização do complexo de Tubarão começou a operar em 1966, e desde então a Vale tem investido em sua modernização e expansão. Além das usinas de pelotização, o complexo de Tubarão também inclui uma usina de minério de ferro. O complexo de Tubarão emprega mais de 6.000 pessoas e é uma importante fonte de empregos e receita para a região.

Em 2015 o uso de drone já é uma realidade para o pátio ferroviário de Tubarão, no Espírito Santo. Um drone pode ser utilizado para diversas finalidades, na Vale, ele é usado para mapeamento dos vagões que estão carregados com

minérios, possibilitando verificar o excesso de umidade na carga, que antes do equipamento, causava um transtorno gerando custos adicionais. O drone também pode ser um aliado importante para a segurança, principalmente no que diz respeito ao monitoramento. Assim, o uso desse equipamento trouxe ganhos de produtividade e segurança para os empregados que trabalham nessa área.

Além disso, em 2020, a Vale, em parceria com a Progress Rail da Caterpillar, instalou no Complexo de Tubarão uma nova locomotiva de pátio de manobra 100% elétrica, movida a bateria. Além de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa pela substituição de diesel por eletricidade proveniente de fontes renováveis, o equipamento também irá reduzir a emissão de ruídos, minimizando os impactos nas comunidades que moram no entorno das operações da companhia. A locomotiva de pátio 100% elétrica faz parte do Programa PowerShift de substituição da matriz energética da Vale por fontes limpas. Esta iniciativa contribui com a estratégia da Vale de redução de suas emissões diretas e indiretas em 33% até 2030, a partir de 2017, de acordo com o acordo de Paris.

3.3.1.3 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Salobo

A mina de Salobo é uma operação de mineração de cobre da Vale localizada no município de Marabá, estado do Pará, no Brasil, que começou a operar em 2012. A mina de Salobo é uma das principais operações de mineração da Vale no Brasil e é uma das maiores minas de cobre a céu aberto do mundo. Essa mina emprega mais de 1.000 pessoas e contribui significativamente para a economia local, gerando empregos e investimentos na região.

A Mina de Salobo utiliza Advanced Analytics que é uma inteligência artificial, essa tecnologia de manutenção otimiza o ciclo de vida dos equipamentos, aumenta sua vida útil e evita intervenções desnecessárias. Nessa mina, no Pará, foi um dos projetos de maior impacto da Vale, pois em 2017 houve um aumento de 30% em um ano na vida útil dos pneus de caminhões fora de estrada, o que representou uma economia de US\$ 5 milhões em um ano.

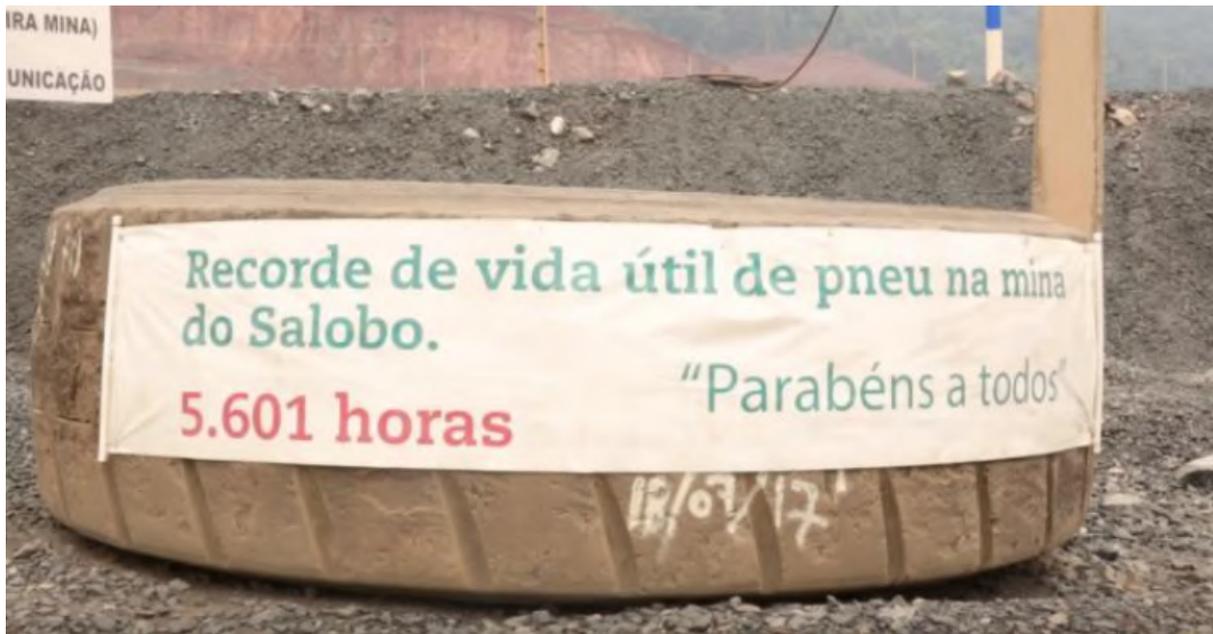


Figura 2: A vida útil dos pneus na mina de Salobo aumentou 30%. Fonte: Vale

3.3.1.4 Casos de Sucesso da Vale: Mina de Totten

A mina Totten é uma mina de níquel e cobre localizada na região de Sudbury, em Ontário, Canadá, e é de propriedade da mineradora Vale. A mina Totten está em operação desde 2014 e é uma das minas de níquel mais importantes da região de Sudbury. Nessa mina, a Vale implementou controles por meio de tablets para operar os equipamentos remotamente. Essa inovação gera maior segurança e redução de lesões entre os operadores, além de melhorar a visibilidade das atividades realizadas.

3.3.2 Rio Tinto

A Rio Tinto é uma empresa de mineração, fundada em 1873 e sediada em Londres, Reino Unido. A empresa tem operações em mais de 36 países em todo o mundo, incluindo Austrália, Canadá, Estados Unidos, Chile, Brasil, Mongólia e África do Sul. De acordo com o relatório de sustentabilidade anual de 2020 da empresa, a Rio Tinto emprega mais de 46.000 pessoas em todo o mundo. A empresa atua em

diversas áreas da indústria, incluindo alumínio, cobre, diamantes, ouro, minério de ferro, urânio e outros minerais.

Essa empresa também tem investido em tecnologia para melhorar suas operações de mineração e aumentar a eficiência. Um exemplo disso é o programa "Mine of the Future", que visa usar tecnologias avançadas, como a automação e a inteligência artificial, para tornar a mineração mais segura, produtiva e sustentável. Segundo o Instituto Minerale, 2019, a empresa conta com centro de operação que controla todas as máquinas autônomas em todos os locais de mineração, o que fornece à companhia uma visão completa com painéis de controle. Além disso, há também a possibilidade de colaboração entre os diversos times de mineração, em tempo real. Isso ajuda os gerentes a otimizar a logística e a manutenção de todas as minas, através de uma localização central.

Para Jang (2020) a Rio Tinto estabeleceu o Centro de Automação de Minas na Universidade de Sydney em 2007 (antes do surgimento do termo Mineração 4.0) em conjunto com a Komatsu Japan. A Mina do Futuro do Rio é considerada o plano mais ambicioso da história da mineração, abrangendo grupos globais de pesquisa em mineração e produtores de equipamentos. Em 2010, como parte da Mina do Futuro, o Centro de Operações Rio Tinto (RTOC) foi inaugurado em Perth, Austrália Ocidental. A RTOC opera diretamente 16 minas de minério de ferro, quatro instalações portuárias e um sistema automático de operação ferroviária abrangendo 1.700 quilômetros na região de Pilbara, na Austrália Ocidental. Além disso, o Centro de Inovação Rio Tinto (RTIC) foi inaugurado em Pune, Índia, em 2012. O RTIC está realizando vários estudos sobre tecnologias-chave na implementação do sistema de automação de mineração, como tecnologia da informação e comunicação, processamento de informações de imagens de computador, gerenciamento de dados e sistemas de controle automatizados.

Segundo o Instituto Minerale (2019) a mineradora, Rio Tinto utiliza a IloT, que criou uma frota de caminhões sem motoristas para transportar minério entre minas e plantas de processamento, utilizando assim uma forma mais eficiente e segura, evitando falhas humanas. Um dos principais projetos da mineradora, *Mine of the Future*, que possui um centro de operação que controla todas as máquinas autônomas em todos os locais de mineração, o que fornece à companhia uma visão completa com painéis de controle. Além disso, há também a possibilidade de colaboração entre os diversos times de mineração, em tempo real. Isso ajuda os

gerentes a otimizar a logística e a manutenção de todas as minas, através de uma localização central. O uso da IIoT aumentou a segurança e simplificou a logística.

Segundo Bartnitzki (2017), *Mine of the Future* é a criação de um centro de operações remotas na Austrália Ocidental para melhorar a produtividade dos trabalhadores e alcançar operações de minas eficazes. Além disso, o país se concentra no estabelecimento de redes de banda larga para coletar, monitorar e processar dados para otimização de processos. A rede permite o uso eficiente de recursos e facilita o uso eficiente de água e eletricidade para manter a sustentabilidade ambiental e econômica.

A empresa também está desenvolvendo soluções digitais para melhorar a cadeia de suprimentos e a logística. Alguns exemplos incluem o uso de drones para inspeção de equipamentos, análise de dados em tempo real para otimização de processos e a utilização de realidade virtual para treinamento e simulação de operações.

3.3.2.1 Casos de Sucesso da Rio Tinto: Hunter Valley

A mina de Hunter Valley da Rio Tinto é uma operação de mineração a céu aberto que se estende por uma área de cerca de 2.500 hectares. A mina está localizada no vale do rio Hunter, na região de New South Wales, na Austrália. A mina produz carvão térmico de alta qualidade usado para gerar eletricidade em usinas de energia em todo o mundo. O carvão é extraído por meio de escavação e perfuração de explosivos em camadas de rocha e carvão. As operações de mineração utilizam grandes equipamentos de mineração, como caminhões basculantes e escavadeiras, para extrair e transportar o carvão até a área de processamento.

Nessa mina a Rio Tinto fornece aos trabalhadores de campo e motoristas de caminhões nas minas, capacetes inteligentes no formato de boné para controlar a fadiga por meio do monitoramento das suas ondas cerebrais apelidados de SmartCap que usa um eletroencefalograma (EEG) e algoritmos proprietários para calcular uma avaliação de risco. As informações são analisadas por IA para determinar o estado de alerta da pessoa que usa o boné e retransmitidas imediatamente, como parte dos esforços para reduzir os acidentes de trabalho relacionados à fadiga. O SmartCap é usado para fornecer um aviso antecipado

quando um motorista ou trabalhador está se aproximando de um micro-sono, o que pode impedir um acidente de trabalho.



Figura 3: “SmartCap” sendo utilizado por motorista de caminhão de mina de carvão da Rio Tinto. Foto de SMH Austrália.

3.3.2.2 Casos de Sucesso da Rio Tinto: West Angelas

Na mina de West Angelas da Rio Tinto na Austrália que produz minério de ferro é utilizada uma tecnologia chamada RTVis 3D que identifica o tamanho, localização e a qualidade do minério, o que reduz os custos e melhora a produção.

Segundo a NMB (Notícias de Mineração Brasil) o RTVis 3D fornece um mapeamento preciso que garante separar o minério de alto valor e, assim, reduzir o desperdício e os custos operacionais. O software cria ainda imagens 3D da mina que antes não podiam ser alcançadas.

Segundo a Rio Tinto, a tecnologia levou a uma maior recuperação do minério, além de sondagens mais precisas, redução do uso de explosivos, melhora na classificação de resíduos e aumento das taxas de escavação. O RTVis também pode fornecer informações rápidas sobre impacto em equipamentos. Outro benefício do software é obtido durante o planejamento de um projeto, pois fornece informações confiáveis sobre a natureza do depósito em uma fase anterior ao processo de exploração.

3.3.3 BHP

A BHP é uma das maiores empresas de mineração do mundo, com sede em Melbourne, Austrália. Fundada em 1885, a BHP tem operações em mais de 90 locais em todo o mundo, incluindo minas de carvão, ferro, cobre, níquel e petróleo. A BHP é uma das empresas líderes em sustentabilidade na indústria de mineração e tem estabelecido metas ambiciosas para reduzir suas emissões de carbono e contribuir para o combate às mudanças climáticas. A empresa está empenhada em atingir a neutralidade de carbono em suas operações até 2050 e em trabalhar com seus parceiros da cadeia de suprimentos para alcançar a mesma meta. A empresa é um dos maiores fornecedores mundiais de minério de ferro, e também é uma das maiores produtoras de cobre e níquel.

Para Jang (2020) a BHP também continuou investindo em automação e digitalização de mineração. Ela está trabalhando para otimizar toda a cadeia de valor da mineração com base na automação e digitalização integradas do processo de mineração. Entre as várias áreas de negócios da BHP, as melhorias no setor de minério de ferro na Austrália Ocidental aceleraram com a abertura do Centro Integrado de Operações Remotas (IROC) em Perth em 2013. O IROC gestão integrada do AHS, ADS, quatro centros de processamento, uma ferrovia automática sistema de operação de 1.000 km e operação portuária em cinco minas de minério de ferro na região de Pilbara, o que reduziu muito os custos e melhorou não só a produtividade, mas também a segurança das operações de mineração.

A empresa também tem um forte compromisso com a segurança de seus funcionários e contratados, bem como com a sustentabilidade social e ambiental das comunidades em que opera. A BHP tem investido em projetos de desenvolvimento comunitário e trabalhado para melhorar o acesso à educação, saúde e outras necessidades básicas nas áreas onde opera.

3.3.3.1 Casos de Sucesso da BHP: Mina de Escondida

Segundo a BHP (2017), seu projeto de mineração de precisão está explorando oportunidades para maximizar a produção de cobre e estender a vida útil da mina Escondida, no Chile, por meio do uso de tecnologias de sensores nos

equipamentos de mineração em massa para analisar rapidamente e com precisão os teores de cobre. Além disso, foi testado a utilização de cápsulas inteligentes nessa mina, que, como a Rio Tinto, essa tecnologia de sensores mede a fadiga do motorista analisando as ondas cerebrais, hoje, essa tecnologia está integrada em mais de 150 caminhões. Sendo assim, o uso de sensores avançados e controle de processo em tempo real também pode melhorar a qualidade e o teor dos minérios entregues às plantas de processamento, além de reduzir o consumo de energia e água.

Além disso, a BHP (2017) diz que os benefícios dessas tecnologias serão totalmente aproveitados quando for integrado e gerenciado as operações como um único sistema que vai desde a mina até o mercado. E com operações mais previsíveis, é possível reduzir a capacidade ociosa, aproveitar ao máximo o uso do equipamento, otimizar a produção e reduzir a necessidade de estoques. Isso reduzirá o custo, o desperdício e as emissões de carbono associadas a cada tonelada que produzimos.

3.3.3.2 Casos de Sucesso da BHP: Mina de Jimblebar

Segundo a BHP (2017), a frota de caminhões autoguiados na mina de Jimblebar, localizada na Austrália reduziu os incidentes potenciais de segurança envolvendo veículos, aumentou a utilização dos caminhões e reduziu os custos de transporte em cerca de 20%. Além disso, a empresa cita também que o uso dos caminhões e perfuratrizes autônomos protegem os funcionários de situações perigosas, e colaborando assim com a prevenção de acidentes.

Além disso, na BHP foi implementado o uso de perfuratrizes autônomas que melhoram a segurança e a produtividade nos locais de mineração. O que causou um aumento na produtividade geral das perfuratrizes e uma redução nos custos de manutenção relacionados ao desgaste.

3.3.4. Fortescue Metal Group

A Fortescue Metal Group foi fundada em 2003 na Austrália e é uma das principais empresas de mineração de minério de ferro do mundo. A empresa é conhecida por sua produção em grande escala, tendo se tornado uma das maiores exportadoras de minério de ferro da Austrália. A sustentabilidade é um aspecto fundamental das operações da Fortescue Metal Group. A empresa está empenhada em práticas responsáveis de mineração e na redução de seu impacto ambiental. A Fortescue investe em tecnologias avançadas para melhorar a eficiência operacional e reduzir as emissões de carbono. Além disso, a empresa realiza programas de reabilitação de terras e gestão da água para mitigar os efeitos da mineração.

Segundo a Revista Capital Reset, a Fortescue Metals Group (FMG) assumiu o “mais ousado” compromisso de redução de emissões de uma mineradora até agora. A empresa anunciou a intenção de produzir ferro inteiramente “verde” até 2040. Sendo assim, a FMG pretende zerar suas emissões de escopo 3, ou seja, as de sua cadeia de valor, incluindo seus clientes. Isso quer dizer que as siderúrgicas que utilizarem o minério de ferro da Fortescue Metals também terão que produzir aço sem despejar CO2 na atmosfera, certamente o maior desafio da cadeia da mineração.

3.3.4.1 Casos de Sucesso da FMG: Mineração de Pilbara

Segundo o site da própria empresa, a Fortescue Metal Group possui três centros de mineração na região de Pilbara, na Austrália Ocidental, que estão conectados ao porto Herb Elliott, com cinco ancoradouros, e à infraestrutura de reboque de Judith Street Harbour em Port Hedland, por meio de 760 quilômetros da ferrovia de carga pesada mais rápida do mundo. A empresa possui uma cadeia de valor do minério de ferro que se estende à frota inovadora de rebocadores e oito navios-carregadores de minério Fortescue com capacidade de 260.000 toneladas, projetados para complementar a eficiência do porto e maximizar a segurança e produtividade das operações da empresa.

Através da estratégia de descarbonização, a empresa está trabalhando para eliminar o uso de combustíveis fósseis e alcançar emissões reais zero em suas operações de minério de ferro. Essa estratégia tem como peça-chave a Fortescue Future Industries (FFI). A equipe da FFI está criando soluções de energia verde e

tecnologia para descarbonizar nossas operações de metais e permitir que setores difíceis de descarbonizar em todo o mundo sigam o exemplo.

4. DISCUSSÕES

Com base nas informações contidas nesse trabalho de conclusão de curso, vamos responder aos questionamentos já mencionados na introdução, como por exemplo:

1- As tecnologias da indústria 4.0 foram benéficas no tempo de covid?

O período de pandemia de Covid-19 começou no final de 2019 na cidade de Wuhan, na China, e se espalhou rapidamente pelo mundo todo. O Brasil registrou seu primeiro caso em fevereiro de 2020 e desde então enfrentou altos índices de contágio e mortes. No setor de mineração, a pandemia trouxe uma série de desafios. Muitas empresas de mineração foram obrigadas a reduzir a produção ou interromper completamente as operações para proteger seus funcionários e cumprir as diretrizes dos governos locais.

Desse modo, o período de pandemia de Covid-19 afetou profundamente a economia mundial e o setor de mineração não foi exceção. No início da pandemia, muitas empresas de mineração reduziram a produção ou interromperam completamente as operações para proteger seus funcionários e cumprir as diretrizes dos governos locais. No entanto, à medida que a pandemia se estendeu, as empresas de mineração foram forçadas a encontrar novas maneiras de operar de forma segura e eficiente.

Uma das principais soluções encontradas pelas empresas de mineração foi a adoção de tecnologias de mineração 4.0. Essas tecnologias foram particularmente úteis durante a pandemia, pois permitiram que as empresas de mineração continuassem operando de forma segura e eficiente, sem colocar os funcionários em risco. Além disso, essas tecnologias permitiram que os trabalhadores evitassem deslocamentos desnecessários, reduzindo o risco de contágio.

Sendo assim, as tecnologias de IoT, drones e IA e outras foram benéficas para as empresas de mineração durante a pandemia de Covid-19, permitindo que os trabalhadores pudessem continuar a trabalhar com segurança e sem precisar se colocar em risco.

2- Quais as maiores mineradoras do mundo e por quê elas estão se preocupando cada vez mais com a sustentabilidade

Primeiramente, informamos que segundo a S&P Capital, PwC Mine 2021 as maiores mineradoras do mundo em 2021 são:

Top 40 global mining companies						
2021 rank	2020 rank	Change from 2020 rank	Company	Country	Year end	Commodity focus
1	1	-	BHP Group Limited	Australia/UK	30 Jun	Diversified
2	2	-	Rio Tinto Limited	Australia/UK	31 Dec	Diversified
3	3	-	Vale S.A.	Brazil	31 Dec	Diversified
4	10	▲ 6	Fortescue Metals Group Limited	Australia	30 Jun	Iron ore
5	4	▼ 1	China Shenhua Energy Company Limited	China	31 Dec	Coal
6	5	▼ 1	MMC Norilsk Nickel	Russia	31 Dec	Nickel
7	7	-	Newmont Corporation	US	31 Dec	Gold
8	6	▼ 2	Glencore Plc	Switzerland	31 Dec	Diversified
9	8	▼ 1	Anglo American plc	UK/South Africa	31 Dec	Diversified
10	9	▼ 1	Barrick Gold Corporation	Canada	31 Dec	Gold
11	12	▲ 1	Freeport-McMoRan Inc.	US	31 Dec	Copper
12	15	▲ 3	Zijin Mining Group Company Limited	China	31 Dec	Diversified
13	11	▼ 2	Grupo México, S.A.B. de C.V.	Mexico	31 Dec	Copper
14	16	▲ 2	Public Joint Stock Company (Polyus)	Russia	31 Dec	Gold
15	20	▲ 5	China Molybdenum Co., Ltd.	China	31 Dec	Diversified

Tabela 2. As 15 maiores empresas mineradoras do mundo em 2021. Fonte: S&P Capital, PwC Mine 2021.

As empresas mineradoras estão se preocupando cada vez mais com a sustentabilidade por diversos motivos, são alguns deles:

O Acordo de Paris é um acordo internacional assinado por muitos países em 2015, com o objetivo de combater as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Sendo assim as mineradoras estão cada vez mais

conscientes e pressionadas da importância de contribuir para as metas estabelecidas no Acordo de Paris e assim reduzir sua pegada de carbono.

Diminuição da poluição pois a indústria de mineração é conhecida por ter um impacto significativo no meio ambiente, incluindo a poluição do ar, água e solo. As empresas mineradoras estão se esforçando para reduzir a poluição gerada por suas operações, implementando tecnologias mais limpas, práticas de gestão ambiental adequadas e adotando processos mais eficientes.

Outros acordos internacionais e regulamentações, existem várias regulamentações e acordos internacionais que estão impulsionando as empresas a adotarem práticas mais sustentáveis. Essas regulamentações incluem restrições ao uso de produtos químicos perigosos, requisitos de reabilitação de áreas mineradas e a obrigação de cumprir normas ambientais mais rígidas.

Além disso, vale ressaltar que as empresas estão cada vez mais conscientes da importância de construir uma reputação positiva perante a sociedade. Uma abordagem sustentável pode melhorar a imagem pública das empresas mineradoras, demonstrando compromisso com a proteção ambiental, a saúde e segurança dos trabalhadores e as comunidades locais, por isso muitas vem investindo nas tecnologias da Mineração 4.0.

Existe um ranking de empresas em que muitas instituições e organizações desenvolvem rankings e índices que avaliam o desempenho das empresas em termos de sustentabilidade e responsabilidade social. As mineradoras estão buscando melhorar suas classificações nesses rankings, o que pode resultar em benefícios financeiros, acesso a investidores responsáveis e outros benefícios.

Sendo assim, no geral, as empresas mineradoras estão reconhecendo que a sustentabilidade e o investimento em Mineração 4.0 não é apenas uma responsabilidade social, mas também um fator crítico para a sua própria longevidade e sucesso. A adoção de práticas sustentáveis pode levar a benefícios econômicos, minimização de riscos e garantia de uma operação mais resiliente em um contexto de crescente preocupação ambiental e regulamentações mais rigorosas.

3- Quais países estão na frente da aplicação da Mineração 4.0 e qual sua relação com o desenvolvimento tecnológico e econômico.

Segundo o gráfico 2 deste artigo os países com maior quantidade de artigos publicados sobre as tecnologias da mineração 4.0 são a China, Alemanha, África do Sul e Rússia.

A China é o maior produtor e consumidor de minerais do mundo, e tem investido significativamente em desenvolvimento tecnológico na indústria de mineração. O país tem se destacado em tecnologias de extração, processamento e utilização eficiente de recursos minerais. Além disso, a China tem uma economia em rápido crescimento, impulsionada por setores industriais avançados e uma forte demanda por minerais. O desenvolvimento tecnológico na mineração tem sido uma prioridade para o governo chinês, visando aumentar a eficiência, reduzir impactos ambientais e melhorar a segurança nas operações.

A Alemanha é reconhecida por seu desenvolvimento tecnológico avançado em várias indústrias, incluindo a indústria de mineração. O país é líder em tecnologias como automação, digitalização e inteligência artificial, que estão sendo aplicadas para melhorar a eficiência e a segurança das operações de mineração. Além disso, a Alemanha tem uma economia robusta e diversificada, com um setor industrial altamente desenvolvido, que inclui empresas especializadas em equipamentos e tecnologias para a indústria de mineração.

A África do Sul é um importante produtor de minerais, incluindo ouro, platina, carvão e diamantes. O país possui um setor de mineração estabelecido e tem se esforçado para impulsionar o desenvolvimento tecnológico na indústria. A África do Sul tem investido em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de mineração, como automação, sistemas de monitoramento avançados e digitalização de processos. Essas tecnologias visam aumentar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade das operações de mineração no país.

A Rússia é um dos principais produtores mundiais de recursos minerais, como petróleo, gás, minério de ferro e metais preciosos. O país tem uma indústria de mineração significativa e tem investido em tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e a segurança na extração e processamento de minerais. Além disso, a Rússia tem uma economia diversificada, impulsionada por setores como energia, indústria de defesa e manufatura. O desenvolvimento tecnológico na mineração desempenha um papel importante na economia russa, contribuindo para a produtividade e a competitividade do setor.

5. CONCLUSÕES

Concluimos então que a indústria de mineração está passando por uma evolução significativa com a adoção da Mineração 4.0 desde o surgimento da Indústria 4.0 de Klaus Schwab tendo trazido uma série de benefícios para o setor.

A Mineração 4.0 traz consigo uma série de avanços tecnológicos, como a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA), o Machine Learning (ML), a Realidade Aumentada (AR) e a Realidade Virtual (VR), que permitem a automação, a digitalização e a integração de processos em toda a cadeia de valor da mineração. Isso resulta em operações mais eficientes, seguras e sustentáveis.

É fundamental que os países e empresas e mineradoras invistam e adotem as tecnologias da Mineração 4.0. Os países que já adotaram essas tecnologias na sua mineração têm se beneficiado do aumento da eficiência operacional, redução de custos, melhoria da segurança e redução do impacto ambiental. Além disso, a adoção da Mineração 4.0 fortalece a competitividade das empresas no mercado global, permitindo a maximização do retorno sobre o investimento e a garantia da sustentabilidade a longo prazo.

No entanto, é importante destacar que a adoção da Mineração 4.0 requer investimentos significativos em infraestrutura, tecnologia e capacitação de pessoal. Os países e empresas que reconhecem a importância desses investimentos e estão dispostos a fazê-los estão na vanguarda do desenvolvimento tecnológico e econômico da indústria de mineração.

Portanto, diante dos benefícios que a Mineração 4.0 traz para o setor, é crucial que os países e empresas estejam dispostos a investir e adotar as tecnologias dessa nova era da mineração. Aqueles que se comprometerem com essa transformação estarão melhor posicionados para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades que surgem no cenário da mineração global, garantindo um futuro mais eficiente, seguro e sustentável para a indústria.

Referências Bibliográficas

ALLEN, Robert C. The Industrial Revolution: A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2017.

AQUIM, T. Vale embarca na transformação digital. Data Center Dynamics, 12 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/br/opini%C3%B5es/vale-embarca-na-transforma%C3%A7%C3%A3o-digital/>. Acesso em 13 de março de 2023.

BARLETTA, I. et al. Fostering sustainable electronic waste management through intelligent sorting equipment. In: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015-Octob. Páginas 459–461. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CoASE.2015.7294122>.

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.

BERTAYEVA, K. et al. Industry 4.0 in the Mining Industry: Global Trends and Innovative Development. In: E3S Web of Conferences 135, EDP Sciences, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504026>.

BOETTCHER, M. Revolução Industrial - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0. LinkedIn. 26 nov. 2015. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-dehist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>. Acesso em: 05 de janeiro de 2023.

CAVALCANTI, Z. V.; SILVA, M. L. S. A importância da Revolução Industrial no mundo da tecnologia. Anais Eletrônico, VII EPCC, CESUMAR, 2011. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf. Acessado em: 27 de fevereiro de 2023.

CAVALCANTI, Z. V.; SILVA, M. L. S. A importância da Revolução Industrial no mundo da tecnologia. Anais Eletrônico, VII EPCC, CESUMAR, 2011. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf

CIPOLLA, Carlo M. Before the Industrial Revolution: European Society and Economy, 1000-1700. New York: W. W. Norton & Company, 1994.

CONEXÃO MINERAL. Vale economizará US\$ 26 milhões em 2018 com uso de inteligência artificial. Conexão Mineral, 29 de março de 2018. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/966/vale-economizara-us-26-milhoes-em-2018-com-uso-de-inteligencia-artificial.html>. Acesso em 13 de março de 2023.

DECICINO, Ronaldo. Terceira Revolução Industrial: Atividades empregam alta tecnologia. Acesso em 07.07.2012. Disponível em: <http://educacao.uol.com.br/geografia/terceira-revolucao-industrialtecnologia.jhtm>

DE LIMA, E. C, NETO, C. R. O. Revolução Industrial: Considerações sobre o pioneirismo industrial ingles, Revista Espaço Acadêmico número 194. Julho de 2017.

DEMARTINI, F. Vale começa a operar frota de caminhões autônomos em suas minas. CANALTECH 13 de setembro de 2018. Disponível em: <https://canaltech.com.br/inovacao/vale-comeca-a-operar-frota-de-caminhoes-autonomos-em-suas-minas-122480/>. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

DICKEY, J.P.; EGER, T.R.; FRAYNE, R.J.; DELGADO, G.P.; JI, X. Research Using Virtual Reality: Mobile Machinery Safety in the 21st Century. Minerals, v. 3, p. 145-164, 2013.

FMG, We are Fortescue: Transitioning to a global green energy and resources company. Fortescue Metal Group. Disponível em:

<https://www.fmgil.com.au/about-fortescue/who-we-are>. Acesso em 18 de abril de 2023.

FRENZ, W. Industry 4.0 in Mining. In: FRENZ, W.; PREUSSE, A. (Eds.). Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy. New York, NY, USA: Springer, 2022. p. 13-22.

FREY, C. B.; OSBORNE, M. A. The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? Oxford Martin School, University of Oxford, 2013.

GONÇALVES, E., ARAKAKI, M., COSTA, C. Transformação digital e inovação no setor de mineração. Bip Brasil. Disponível em: <https://bipbrasil.com.br/transformacao-digital-e-inovacao-no-setor-de-mineracao/>. Acesso em 20 de março de 2023.

GREEN 4T. Mineração 4.0 e os desafios para ter operações mais sustentáveis. Green 4T, 31 de março de 2022. Disponível em <https://www.green4t.com/insights/mineracao-4-0-e-os-desafios-para-ter-operacoes-mais-sustentaveis/>. Acesso em 13 de março de 2023.

GRIGGS, D. et al. Sustainable development goals for people and planet. Nature, v. 495, n. 7441, p. 305–307, 2013.

GRIFFIN, E. Liberty's Dawn: A People's History of the Industrial Revolution. 2014.

HASSANI, H.; KOMENDANTOVA, N.; KROOS, D.; UNGER, S.; YEGANEGI, M.R. Big Data and Energy Security: Impacts on Private Companies; National Economies and Societies. Internet Things, v. 3, p. 29-59, 2022.

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.

HODGKINSON, Jane H.; SMITH, Michael H. Climate change and sustainability as drivers for the next mining and metals boom: The need for climate-smart mining and recycling. Resources Policy, v. 57, p. 203-211, 2018. 10.1016/j.resourpol.2018.05.016.

IBRAM. Posicionamento da mineração sobre a agenda de mudança do clima no Brasil. Instituto Brasileiro de Mineração, 1 de outubro de 2021. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/10/Posicionamento-Setorial-da-Mineracao-sobre-a-Agenda-Climatica-no-Brasil_Out2021-versao-final-aprovada-1.pdf.

Acesso em 03 de abril de 2023.

INDUSTRIALL HEAD OFFICE. The Challenge of Industry 4.0 and the Demand for New Answers. Geneva, Switzerland: IndustriALL Head Office, 2020. 36 p.

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: 14 abr. 2023.

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: 14 abr. 2020.

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 02 abril de 2023.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa, 2012.

JANG, Hyongdoo; TOPAL, Erkan. Transformação da indústria de mineração australiana e perspectivas futuras. Tecnologia de Mineração, 2020. DOI: 10.1080/25726668.2020.1786298.

JURGENS, D. Which technologies will boost mining safety and productivity? BHP, 01 de novembro de 2017. Disponível em [bhp.com/news/prospects/2017/11/which-technologies-will-boost-mining-safety-and-productivity](https://www.bhp.com/news/prospects/2017/11/which-technologies-will-boost-mining-safety-and-productivity). Acesso em 15 de abril de 2023.

JURGENS, D. Creating the future of mining - integration and automation. BHP, 31 de outubro de 2017. Disponível em: <https://www.bhp.com/news/media-centre/reports-presentations/2017/10/creating-the-future-of-mining-integration-and-automation>. Acesso em 15 de abril de 2023.

KER, P. Australian workers are starting to have their brains monitored in the workplace. The Sydney Morning Herald, 3 de julho de 2015. Disponível em <https://www.smh.com.au/business/companies/australian-workers-are-starting-to-have-their-brains-monitored-in-the-workplace-20150701-gi292b.html>. Acesso em 20 de março de 2023.

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.

MALTA, R. S. V. O drone na indústria 4.0. Instituto Minere, 23 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/o-drone-na-industria-4-0>. Acesso em 20 de março de 2023.

MEDEIROS, S, M.; ROCHA, S. M. M. Considerações sobre a terceira Revolução Industrial e a força de trabalho em saúde em Natal. *Ciência & Saúde Coletiva*.

MENDOZA, A. F. Intelligent process in the context of Mining 4.0: Trends, research, challenges and opportunities. In: 2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA). DOI: 10.1109/DASA51403.2020.9317095.

MOTA, J. A. et al. A new proposal for sustainability indicators in mining. *Sustainability in Debate*, v. 8, n. 2, p. 15-29, 2017. DOI: 10.18472/SustDeb.v8n2.2017.21795.

MOWERY, D. C. Plus ça change: Industrial R&D in the “third industrial revolution.” *Industrial and Corporate Change*, 18(1), 1–50. 2009. <https://doi.org/10.1093/icc/dtn049>

NOBRE, G. C., RODRIGUES E. M. T., DIAS, A. R. L. The Role of Industry 4.0 on the Transition to Circular Economy: a Perspective from the Practice. *Anpad Online*. Outubro de 2021.

NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO BRASIL. Vale desenvolve primeira locomotiva 100% elétrica da mineração brasileira. *Notícias de Mineração Brasil*. Disponível em <https://www.noticiasdemineracao.com/empresas/news/1391911/vale-desenvolve-primeira-locomotiva-100-eletrica-da-minera%C3%A7%C3%A3o-brasileira>. Acesso em 12 de março de 2023.

NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO BRASIL. Rio Tinto usa tecnologia 3D para reduzir custos e aumentar desempenho. Disponível em: <https://www.noticiasdemineracao.com/inova%C3%A7%C3%A3o/news/1127592/rio-tinto-usa-tecnologia-3d-para-reduzir-custos-aumentar-desempenho>. Acesso em 14 de abril de 2023.

O'ROUKE, K. H. (2014). The Environmental Costs of the Industrial Revolution. *Economic History Review*.

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.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). Mineração de metais e minerais: implicações ambientais e sociais. Nairóbi: PNUMA, 2019.

REIS, Daniella Clare Smith. Mining 4.0 - Aplicação a uma exploração de massa mineral a céu aberto. 2021. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2021.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1): 1-11. 1994.

REVISTA MINERAÇÃO E SUSTENTABILIDADE. Vale inicia operação de caminhões autônomos no Complexo de Carajás. *Revista Mineração e Sustentabilidade*, 3 de setembro de 2021. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2021/09/03/vale-inicia-operacao-de-caminhoes-autonomos-no-complexo-de-carajas/>. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

SARTORI, A. Mina Digital: 6 tecnologias para opera-lá na era da Transformação Digital. *Indústria 4.0 Manufatura Avançada*, 5 de novembro de 2020. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/20546-mina-digital-6-tecnologias-para-opera-la-na-era-da-transformacao-digital>. Acesso em 02 de abril de 2023.

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.

SCHWAB, Klaus. "Die Vierte Industrielle Revolution". Pantheon. 15, Janeiro 2016.

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.

SIMI. Vale começa a operar caminhões autônomos em MG. Sistema Mineiro de Inovação, 17 de setembro de 2018. Disponível em: <https://simi.mg.gov.br/vale-comeca-a-operar-com-caminhoes-autonomos-em-mg/> Acesso em 10 de janeiro de 2023.

SISHI, M.; TELUKDARIE, A. Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry—A case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, v. 11, p. 10027477, 2020.

SILVA, M. C. A. da.; GASPARIN, J. L. A Segunda Revolução Industrial e suas influências sobre a Educação Escolar Brasileira. 2015. Disponível em: <[http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Ma rcia%20CA%20Silva%20e%20%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf](http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Ma%20rcia%20CA%20Silva%20e%20%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf)>. Acesso em: 05 de janeiro de 2023.

STACHOWIAK, M. et al. Procedures of Detecting Damage to a Conveyor Belt with Use of an Inspection Legged Robot for Deep Mine Infrastructure. *Minerals*, v. 11, n. 9, p. 1040, 2021.

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.

TEIXEIRA, S. Mineradora australiana anuncia emissões zero de sua cadeia a partir de 2040. *Capital Reset*, 05 de outubro de 2021. Disponível em: <https://www.capitalreset.com/mineradora-australiana-anuncia-emissoes-zero-de-sua-cadeia-a-partir-de-2040/>. Acesso em 15 de abril de 2023.

THE WORLD BANK: Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Growing Demand. Infographic, 26, January 2019.

TYLECKOVA, E.; NOSKIEVICOVA, D. The role of big data in Industry 4.0 in mining industry in Serbia. CzOTO, v. 2, p. 166-173, 2020.

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.

VALOR ECONÔMICO. Uso de caminhões autônomos na mineração aumenta segurança e reduz emissões de carbono. Valor Econômico, 30 de agosto de 2022. Disponível em: <https://valor.globo.com/conteudo-de-marca/fiemg/noticia/2022/08/30/uso-de-caminho-es-autonomos-na-mineracao-aumenta-seguranca-e-reduz-emissoes-de-carbono.ghtml>. Acesso em: 12 de janeiro de 2023.

VALE. Vale iniciará testes para implantação da operação autônoma em caminhões fora da estrada em Carajás. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/vale-iniciara-testes-para-implantacao-da-operacao-autonoma-em-caminhoes-fora-de-estrada-em-carajas/-/categories/64919>. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

VALE. Relato Integrado 2021. Maio de 2022. Disponível em https://www.vale.com/documents/d/guest/vale_relato_integrado_2021_pt. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

ZHIRONKINA, O.; 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>.

ZHIRONKIN, S.; SZURGACZ, D. Tecnologias de Mineração Desenvolvimento Inovador: Industrial, Perspectivas Ambientais e Econômicas. *Energias*, v. 15, p. 1756, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15051756>.