



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

REINALDO DA SILVA ANTUNES

AS INOVAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

ARAXÁ-MG

2022

REINALDO DA SILVA ANTUNES

AS INOVAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador(a): Me. Fábio de São José.

Coorientador(a): Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva

ARAXÁ-MG

2022

REINALDO DA SILVA ANTUNES

AS INOVAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 10 de fevereiro de 2022.



Presidente e Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Co-orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Álvaro Francisco de Britto Júnior
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Assinatura Digital

Membro Titular: Prof. Me. Frederico Duarte Fagundes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
SISTEMA INTEGRADO DE PATRIMÔNIO,
ADMINISTRAÇÃO E CONTRATOS

FOLHA DE ASSINATURAS

Emitido em 18/02/2022

DECLARAÇÃO N° 1041/2022 - DMCAX (11.57.04)

(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 18/02/2022 10:14)

FREDERICO DUARTE FAGUNDES

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO

DELMAX (11.57.05)

Matrícula: 1107165

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número:
1041, ano: **2022**, tipo: **DECLARAÇÃO**, data de emissão: **18/02/2022** e o código de verificação: **2d648f33b1**

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais, irmãos e amigos, que
sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos e trabalharam muito para que eu
pudesse realizá-los.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por iluminar os meus caminhos com a presença de pessoas queridas, por proporcionar essa oportunidade, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e paciência para não me entregar ao desânimo diante das minhas fraquezas. Agradeço à minha esposa Bruna Cristina Fontes pelo apoio e compreensão e incentivo nos momentos difíceis. Agradeço também os demais familiares, amigos e professores que contribuíram para o meu aprendizado.

Ao meu orientador Fábio de São José e ao coorientador Fernando Brandão por me auxiliarem quando precisei de ajuda.

EPÍGRAFE

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.”

John Ruskin

RESUMO

A Indústria 4.0 surgiu em 2011, na Alemanha e tratava-se de um projeto de estratégias com foco em soluções tecnológicas. Posteriormente tal estratégia foi denominada de A Quarta Revolução Industrial, por utilizar alguns conceitos que se referem às inovações tecnológicas desenvolvidas recentemente com o objetivo de otimizar o processo industrial e potencializar os lucros das organizações. A principal justificativa para esse trabalho sobre a Indústria 4.0 é entender a maneira como ocorre a evolução da implantação de novas tecnologias nas empresas de mineração, conectando o mundo real ao mundo virtual, promovendo a troca de dados, em tempo real, entre máquinas e dados para possibilitar uma gestão mais eficiente de toda a cadeia produtiva. O objetivo principal deste trabalho trata-se da realização de uma revisão da literatura, onde será feita uma pesquisa bibliográfica sobre a Indústria 4.0. A metodologia utilizada nesse estudo consiste em um método de pesquisa exploratória e explicativa. O tema trouxe diversas inovações, com aplicabilidade em busca de melhorias envolvendo produtos e processos. As empresas de mineração tendem cada vez mais aderir a nova revolução industrial com o desafio de ser totalmente automatizada, proporcionando maior eficácia operacional, aumento de produtividade, crescimento econômico, melhoria da competitividade, bem como o desenvolvimento de novos modelos de negócios, serviços e produtos.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Inovações Tecnológicas, Mineração, Competitividade.

ABSTRACT

Industry 4.0 emerged in 2011 in Germany and was a strategy project focused on technological solutions. Subsequently, this strategy was called The Fourth Industrial Revolution, for using some concepts that refer to the technological innovations recently developed with the objective of optimizing the industrial process and enhancing the profits of organizations. The main justification for this work on Industry 4.0 is to understand the way in which the evolution of the implementation of new technologies in mining companies occurs, connecting the real world to the virtual world, promoting the exchange of data, in real time, between machines and data. to enable more efficient management of the entire production chain. The main objective of this work is to carry out a literature review, where a bibliographic research will be carried out on Industry 4.0. The methodology used in this study consists of an exploratory and explanatory research method. The theme brought several innovations, with applicability in search of improvements involving products and processes. Mining companies are increasingly joining the new industrial revolution with the challenge of being fully automated, providing greater operational efficiency, increased productivity, economic growth, improved competitiveness, as well as the development of new business models, services and products. .

Keywords: Industry 4.0, Technological Innovations, Mining, Competitiveness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução das Indústrias	16
Figura 2: Barco e trem movidos a vapor, século XIX.	18
Figura 3: Quadro do Painel do PLC.	20
Figura 4: Pilares Tecnológicos da Indústria 4.	23
Figura 5: Caminhão autônomo da Vale de Brucutu em Minas Gerais.....	39
Figura 6: Divisão da Pré-História.....	40
Figura 7: Ciclo do processo de carregamento e transporte por caminhão.....	42
Figura 8: Dados IBRAM	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ANM	Agência Nacional de Mineração
BCG	Boston Consulting Group
BI	Business Intelligence
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPS	Sistemas Cyber-Físico
IA	Inteligência Artificial
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	Internet das Coisas
MPI	MineLens Productivity Index
PLC	Controlador Lógico Programável
RFID	Identificação por Radiofrequência
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia
TI	Tecnologia da Informação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
	2.1 FASES DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS.....	16
	2.1.1 PRIMEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	17
	2.1.2 SEGUNDA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	18
	2.1.3 TERCEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	19
	2.1.4 QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	21
	2.2 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA APLICAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0	21
	2.3 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0	22
	2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PILARES DA INDÚSTRIA 4.	23
	2.4.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)	24
	2.4.2 ROBÔS INTELIGENTES.....	25
	2.4.3 MANUFATURA ADITIVA	26
	2.4.4 SIMULAÇÃO VIRTUAL	26
	2.4.5 INTERNET DAS COISAS OU IoT.....	26
	2.4.6 BIG DATA	28
	2.4.7 CLOUD COMPUTING.....	29
	2.4.8 SEGURANÇA CIBERNÉTICA (CPS)	30
	2.4.9 REALIDADE AUMENTADA	31
	2.5 A INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO.....	31
	2.6 A INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL.....	39
	2.6.1 BREVE ABORDAGEM SOBRE A MINERAÇÃO	39
	2.6.2 BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NAS EMPRESAS	43
	2.6.3 MINERAÇÃO 4.0.....	43
	2.7 DESAFIOS FUTUROS DA INDÚSTRIA 4.0	47
3	METODOLOGIA.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Lazonick (2003), uma empresa para transformar recursos produtivos em bens e serviço, para atender as necessidades dos clientes, precisa de uma boa estratégia, financiamento e organização. Ainda ressalta que as empresas:

- i. elaboram estratégias quando escolhem os mercados de produtos em que desejam competir e as tecnologias necessárias para se tornar competitivas.
- ii. financiam quando fazem investimentos para transformar tecnologias e acessar mercados que só podem gerar receitas em algum momento do futuro.
- iii. se organizam quando combinam recursos na tentativa de transformá-los em produtos vendáveis.

Para O'Sullivan (2000), o fato de elaborar estratégias, financiar e organizar não significa obrigatoriamente inovar. Por definição, a inovação depende do aprendizado para transformar tecnologias e acessar mercados de maneiras que geram produtos de maior qualidade e menor custo. O processo de inovação torna-se coletivo quando o aprendizado não pode ser feito sozinho, a aprendizagem requer a colaboração de diferentes pessoas e capacidades. Os investimentos em aprendizagem coletiva, portanto, necessitam da integração das atividades dessas pessoas em uma organização.

Penrose publicou seu livro, “A Teoria do Crescimento da Empresa”, em 1959 onde conceitua uma moderna empresa corporativa sendo uma organização que administra uma coleção de humanos e recursos físicos. Dessa forma, as pessoas contribuem com serviços de mão de obra para a empresa, não apenas como indivíduos, mas como membros de equipes que se empenham em aprender como fazer o melhor utilizando os recursos produtivos próprios da empresa.

A inovação não se baseia apenas no desenvolvimento de novos produtos, pois ajuda a promover novos modelos de negócios, oferece novos serviços e melhora os processos para tornar mais fácil a vida das pessoas (BAYER, 2021).

Segundo Deliotte (2017), a inovação está relacionada às novas tecnologias e gravada em nossos cérebros desde a primeira revolução industrial, quando as máquinas a vapor começaram a fazer parte do processo têxtil. Entretanto as tecnologias em si, não são responsáveis por nada. É necessário que haja espaço na cultura da empresa para as mudanças e realização de teste com as novas tecnologias para que a inovação ocorra por meios tecnológicos.

O fato de inovar é poder ajustar um processo para que ele apresente menos falhas, dispersões ou repetições humanas.

As inovações devem ser o principal motor das organizações, incorporado em seus sistemas de gestão e cultura organizacional, pois este é um fator que participa e interage diretamente com todos os processos da empresa. A participação pode ser positiva e negativa. A cultura organizacional pode apoiar os processos, mas também comprometê-los (Bak et.al. 2016).

Segundo Oliveira e Simões (2016), o ato de se adaptar, está relacionado ao cenário da globalização, no qual as empresas buscam a obtenção de vantagens competitivas e duradouras para se diferenciar diante seus concorrentes.

As três primeiras revoluções industriais ocorreram como resultado da mecanização, eletrificação e tecnologias de informação. Com o progresso da Internet e do satélite a navegação determinou uma nova época industrial - a quarta revolução industrial, denominada de Indústria 4.0.

Para Stock e Seliger (2016), o desenvolvimento da indústria 4.0 tem se tornado presente nas indústrias de transformação, otimizando suas atividades e garantindo resultados precisos quando comparados com as empresas que não se adaptaram ao novo modelo.

De acordo com Hermann, Pentek e Otto em suas análises de 50 estudos, identificaram quatro ferramentas básicas necessárias para implementar a Indústria 4.0 na empresa. Estes são os Sistemas Cyber-Físico (CPS), a Internet das Coisas (IoT), a Internet de Serviços e da Fábrica Inteligente.

A junção das novas tecnologias implantadas, entre indústria 4.0 e a mineração foi nomeada de Mineração 4.0, que está atrelada à elevada aplicação de tecnologia para o desenvolvimento de atividades no setor minerário. Esse conceito nada mais é que a união entre a área mineradora e a Indústria 4.0, incorporando a chamada Quarta Revolução Industrial.

A principal justificativa para esse trabalho sobre a Indústria 4.0 é entender a maneira como ocorre à revolução dos produtos e serviços que são gerados, conectando o mundo real ao mundo virtual, promovendo a troca de dados, em tempo real, entre máquinas e dados para possibilitar uma gestão mais eficiente de toda a cadeia produtiva da mineração. Essa produção inteligente possui alternativas que permitem conectar diferentes etapas de um processo e partes interessadas, como clientes, fornecedores e parceiros.

O objetivo geral desse trabalho trata-se da realização de uma pesquisa bibliográfica que permitiu entender os conceitos, impactos, desafios futuros, aplicação e implantação da indústria 4.0 na mineração.

Os objetivos específicos permitem maior estratificação de todo o embasamento da revisão da literatura da indústria 4.0.

- i. Apresentar um volume de informações atualizadas sobre a indústria 4.0
- ii. Obter dados sobre a aplicação do conceito de indústria 4.0 na mineração;
- iii. Identificar os possíveis impactos oriundos da implantação da Indústria 4.0;
- iv. Verificar os desafios para implantação da Indústria 4.0;
- v. Identificar os cenários futuros com as inovações da Indústria 4.0;
- vi. Caracterização dos pilares das tecnologias aplicada a Indústria 4.0.

Cabe ressaltar que antes da implantação de novas tecnologias existem estudos realizados pela empresa para tratar os principais gargalos do setor uma forma de analisar os pontos necessários, para buscar cada vez mais a melhoria continua do processo. Para isso, são utilizadas ferramentas de gestão de análise de processo, tais como: PDCA, Kaizen, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto, entre outras.

Este trabalho está estruturado pelos seguintes capítulos: introdução, referencial teórico, metodologia, resultados e discussões, considerações finais e referências.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para facilitar a compreensão e desenvolvimento das etapas que serão abordadas, o referencial teórico será dividido em seções. Os temas abordados serão descritos abaixo.

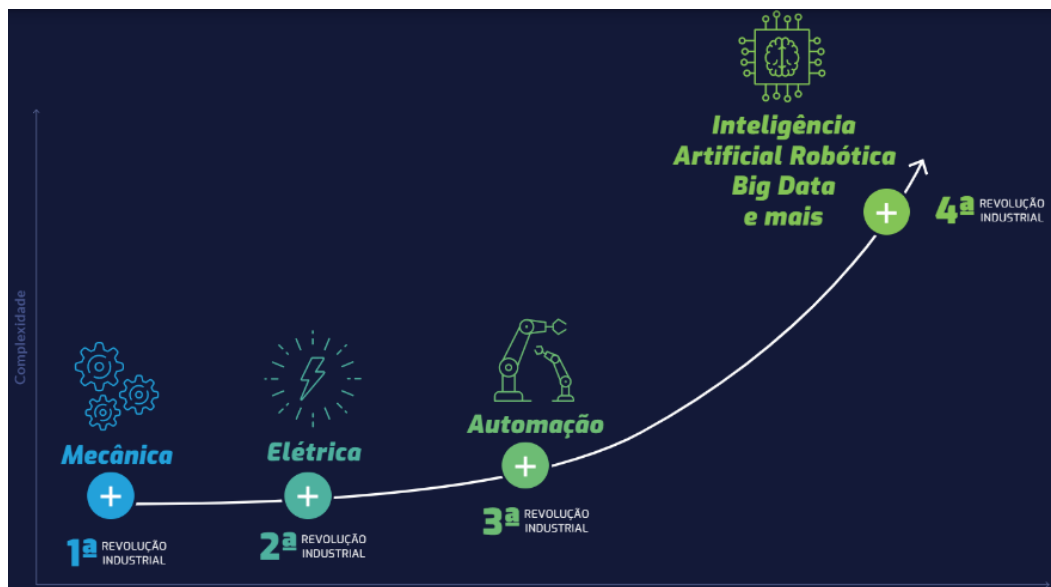
2.1 FASES DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Segundo Dombrowski e Wagner (2014), a revolução industrial foi um conjunto de evoluções e inovações tecnológicas acompanhadas de mudanças radicais que proporciona desdobramento nos âmbitos sociais, políticos e econômicos.

O desenvolvimento tecnológico associado ao avanço das relações trabalhistas no mercado de trabalho, impulsionaram relevantes transições, que contribuíram para diversas mudanças na era industrial.

A Figura 1 representa a evolução das três primeiras revoluções industriais que trouxeram novas tendências, fazendo da competição tecnológica o cerne do desenvolvimento econômico. A quarta revolução industrial proporcionará um impacto mais profundo de forma exponencial, se caracterizando como um conjunto de tecnologias que foram fundidas entre o mundo físico, digital e biológico (CARVALHO, 2019).

Figura 1: Evolução das Indústrias



Fonte: Faac Consultoria, 2021.

2.1.1 PRIMEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Ocorreu na Inglaterra por volta de 1760 até 1850, contribuindo para o processo de evolução tecnológica. A Inglaterra foi pioneira na Revolução Industrial por causa de fatores como: posição geográfica, acúmulo de capital, política de cercamentos, entre outros.

Esse processo estabeleceu uma nova relação entre a sociedade e o meio e possibilitou o surgimento de novas formas de produção que transformaram o setor industrial. As principais características do processo são:

- Substituição da energia produzida pelo homem por energias como a vapor, eólica e hidráulica;
- Substituição da produção artesanal (manufatura) pela indústria (maquinofatura);
- Existência de novas relações de trabalho.

As principais invenções que transformaram o cenário vivido na época da primeira revolução industrial foram:

- Utilização do carvão como fonte de energia;
- Desenvolvimento da máquina a vapor e da locomotiva;
- Desenvolvimento do telégrafo, um dos primeiros meios de comunicação quase instantânea.

A mineração do carvão e do ferro foi o eixo central para o progresso da tecnologia industrial. A aplicação das bombas e máquinas a vapor foi o marco principal do avanço da siderurgia, possibilitando a substituição da lenha pelo carvão mineral (AMARANTE, 2017).

A Figura 2, representa o surgimento do motor a vapor do engenheiro mecânico, James Watt, que impulsionou e caracterizou a primeira revolução industrial, transformando a energia térmica 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.

Figura 2: Barco e trem movidos a vapor, século XIX.



Fonte: UFS, 2021.

De acordo com Dathein (2003), o motor de Watt proporcionou a impulsão dos meios tecnológicos, possibilitando que as fábricas que eram fixas nas margens dos rios pudessem se deslocar para os centros comerciais trazendo consigo um aumento na produção e, conseqüentemente, no lucro dessas indústrias.

Segundo Costa (2008), um fator marcante ocorrido na primeira Revolução Industrial, foi a criação de máquinas programáveis, se destacando o tear programável de Joseph Jacquard, conhecido como primeira máquina programável, que revolucionou a indústria têxtil, possibilitando a criação de peças têxteis de forma rápida e com menos falhas.

2.1.2 SEGUNDA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Ocorreu entre o período da segunda metade do século XIX até o século XX, sendo finalizada durante a Segunda Guerra Mundial. Devido ao alto potencial de industrialização favoreceu o avanço além da Europa Ocidental, se espalhando por diversos países como: Estados Unidos, Japão e demais países da Europa.

Através do aperfeiçoamento de tecnologias que já existiam, foi possível maiores avanços tecnológicos que os da primeira fase. As novas criações mundiais aumentaram ainda

mais a produtividade e os lucros das indústrias. Cabe ressaltar que nesse período também houve um grande incentivo às pesquisas, principalmente no campo da medicina.

Cabe ressaltar que as invenções oriundas dessa época, teve destaque maior com o uso do petróleo como fonte de energia, utilizado no motor à combustão. A eletricidade começou a ser usada para o funcionamento de motores elétricos e à explosão. Para Almeida (2005), o maior impacto na economia ocorreu com o surgimento da eletricidade e da química. Estes, impulsionaram a criação dos novos tipos de motores (elétricos e à explosão), de novos materiais e processos de fabricação, de grandes empresas, do telégrafo sem fio e do rádio.

A fabricação de navios de aço movidos a vapor, o surgimento do avião, a produção em massa de bens de consumo, o enlatamento de comidas, refrigeração mecânica e outras técnicas de preservação e a invenção do telefone eletromagnético foram alguns progressos importantes da época.

2.1.3 TERCEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Este período teve início após a Segunda Guerra Mundial, na metade do século XX. Essa fase constitui uma revolução que se alastrou por todo o mundo, não somente no setor industrial, uma vez que passou a associar o desenvolvimento tecnológico voltado ao processo produtivo ao avanço científico.

As transformações oriundas da época com os avanços tecno-científicos são vivenciadas até os dias atuais, com isso, cada descoberta representa um novo patamar dentro dessa fase da revolução, consolidando o que ficou conhecido como Capitalismo Financeiro.

Essa revolução industrial trouxe um enorme avanço da eletrônica, nanotecnologia, informática e da robótica, gerando linhas de produção de automóveis, o desenvolvimento da engenharia genética e da biotecnologia.

De acordo com Almeida (2005), a Terceira Revolução Industrial propiciou o desenvolvimento dos microchips. Estes elementos, transformaram a forma como nos comunicamos e como as informações são compartilhadas devido a entrada da internet e do e-commerce. Os surgimentos de novos produtos marcaram a época, com a criação dos computadores, satélites de telecomunicações, caixa eletrônico, telefone celular, sistema de GPS, tecnologia automotiva e softwares.

Na década de 70, teve o início da revolução digital, nos Estados Unidos foi lançado o primeiro controlador lógico programável (PLC), o Modicon, permitindo a programação digital de sistemas de automação. O avanço da engenharia de sistemas de automação favoreceu o desenvolvimento de sistemas altamente flexíveis e eficientes, promovendo enormes ganhos no processo produtivo (DRATH & HORCH, 2014).

Segundo Petruzella (2014) os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) trata-se de uma tecnologia de controle de processos industriais mais utilizada. Um CLP é um tipo de computador industrial que pode ser programado para executar funções de controle que favoreceram a:

- Redução de fiação associada aos circuitos de controle a relé;
- possui facilidade de programação e instalação;
- controle de alta velocidade;
- compatibilidade de rede;
- verificação de defeitos e conveniência de teste;
- alta confiabilidade.

A Figura 3 representa um painel de PLC industrial que é projetado para arranjos de múltiplas entradas e saídas, sendo classificado como um sistema em tempo real, desde que a saída do sistema controlado por ele depende das condições da entrada. Trata-se de um computador digital projetado para uso no controle de máquinas. O uso do CLP eliminou os trabalhos com fiação, reduzidos os custos e suas dimensões além de apresentar maior confiabilidade e mais flexibilidade.

Figura 3: Quadro do Painei do PLC.



Fonte: Global Rus Trade, 2021.

2.1.4 QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Segundo Ortega (2019), a quarta revolução industrial ou Indústria 4.0, é um conceito desenvolvido pelo alemão Klaus Schwab, diretor e fundador do Fórum Econômico Mundial. Atualmente se tornou uma realidade defendida por diversos teóricos da área. Segundo Schwab, a industrialização atingiu uma quarta fase, que transformará a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. Dessa forma, trata-se de uma mudança de paradigma, não apenas mais uma etapa do desenvolvimento tecnológico.

A Indústria 4.0 pode ser considerada como um novo paradigma de produção desenvolvido nas empresas, resultado da quarta revolução industrial, a qual trouxe como marca um significativo avanço na relação entre homem e máquina, impulsionando uma série de avanços no processo produtivo. Segundo Caloi (2018), a quarta revolução industrial já começou e as empresas de todo o mundo correm contra o tempo para entrar na era da chamada Indústria 4.0.

De acordo com Schwab (2019), “A indústria 4.0 não se trata de um conjunto de tecnologias emergentes em si mesmas, mas a transição em direção a novos sistemas que foram construídos sobre a infraestrutura da revolução digital”.

2.2 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA APLICAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Em 2011, na Alemanha, os representantes da indústria alemã, políticos do país e vários acadêmicos, discutiram como abordar a modernização das indústrias, adequando às novas tecnologias emergentes para fortalecer e aprimorar todo o setor industrial e torná-lo competitivo (SACOMANO; SÁTYRO; 2018).

Essa nova tendência das indústrias, engloba inovações das áreas de controle, automação e tecnologia da informação. Dessa forma é possível integrar o mundo virtual e o mundo real, em que máquinas, produtos e componentes compartilham e processam informações de forma inteligente via internet, big data e computação cognitiva.

Na atual fase da revolução é possível utilizar novas tecnologias aplicadas diretamente aos processos industriais, como por exemplo a Internet das coisas (IoT). Em 1950 durante a guerra fria nos Estados Unidos eclodiu a internet, que se tornou uma forte aliada à globalização, interligando cidades, países e até continentes. Essa aliança oriunda de novas tecnologias permite

um amplo controle de todos os processos industriais, que vão desde o gerenciamento virtual a até rastreamento das fases de produção de qualquer local (MARK; FELIX, 2018).

A implementação de novas tecnologias na indústria proporciona mudança na manufatura da empresa e conforme a sua aplicação dos novos processos nas linhas de produção, agregando maior produtividade e confiabilidade dos processos.

Através da tecnologia denominada big data, as empresas podem ter disponível em nuvem, todos os dados de produção, características dos seus materiais, informações sobre programações de produção e receitas de todos os processos, bem como informações rastreáveis de clientes e fornecedores (COBBOS, 2018).

Para Silveira (2017), a nova transformação industrial não significa apenas agregar novas tecnologias e aguardar os resultados, pois a indústria necessita de planejamento a longo prazo, qualificação das pessoas, realização de treinamentos, aptidão das pessoas para multiplicar o conhecimento adquirido com novos colaboradores propiciando a inserção de todos nas novas tecnologias (SILVEIRA, 2017).

Segundo MAGNUS (2018) as indústrias encontrarão dificuldades em obter sucesso, caso não se adaptarem as novas tecnologias. Desde 2020, os investimentos em tecnologias passaram a ser a prioridade de investimentos na fase de adequação, utilizando a IoT, Inteligência Artificial, big data e robôs autônomos.

2.3 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0

De acordo com Silveira (2017) para o processo de implantação de novas tecnologias, existem alguns princípios, que definem a adaptação das empresas nos novos sistemas produtivos:

- **Adaptação da capacidade de operar em tempo real:** Permite um tratamento de dados instantâneo, possibilitando em tempo real, a troca de informações e ajudando na capacidade de tomar decisões garantindo maior assertividade.
- **Virtualidade e simulações:** Este novo conceito permite a simulação virtual em softwares do processo, fornece a identificação remota de erros, além de propor melhorias. Cabe ressaltar que o fato de criar uma cópia do mundo real possibilita ter todas as informações necessárias do CPS, permitindo a rastreabilidade e o acesso remoto dos processos por meio de sensores.

- **Rastreabilidade:** Nesta etapa utiliza sensores em locais específicos para o monitoramento remoto dos processos.
- **Tomada de Decisões:** A descentralização efetiva feita por CPS proporciona uma interação completa entre o sistema de produção e as necessidades de melhoria do processo necessárias nos ciclos usando as informações disponíveis em tempo real.
- **Orientação aos serviços:** Utiliza arquiteturas de softwares voltadas a permitir a operação de um processo conforme especificação do cliente.
- **Modularidade:** O sistema é dividido em interfaces de softwares e hardwares padronizadas. Devido a esse fato ocorre flexibilidade em alternar tarefas de acordo com as necessidades garantindo otimização na produção e economia de energia.

Os princípios mencionados anteriormente, favorece ao desenvolvimento e implantação da indústria 4.0, dessa forma, os sistemas de produção inteligentes tendem a crescer cada vez mais em futuros próximos.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PILARES DA INDÚSTRIA 4.0

A Figura 4 mostra os pilares da Indústria 4.0 interagindo entre si e apresenta um formato de um ciclo conforme classificação da BCG. De acordo com a Boston Consulting Group (BCG) a indústria 4.0 é dividida em nove pilares, que facilita a compreensão destes pilares e sintonia com a gestão da qualidade, durante a aplicabilidade de novas tecnologias nas empresas.

Figura 4: Pilares Tecnológicos da Indústria 4.



Fonte: Boston Consulting Group, 2021.

Os pilares da indústria 4.0 serão o seu apoio, estes são na realidade tecnologias que já estão em uso e a sua eclosão no sistema produtivo fará com que alcance o padrão 4.0 (ESTÉVEZ, 2016).

2.4.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Segundo Statista (2018) a mineração desempenha um papel importante na economia mundial. Em 2016, a receita das principais empresas de mineração do mundo foi de US \$ 496 bilhões, além de empregar cerca de 756.000 pessoas nos EUA em 2016. O setor de mineração pode se tornar mais lucrativo para os investidores com a aplicação de IA, aprendizado de máquina e automação para melhorar as perspectivas tecnológicas, econômicas e ambientais da indústria.

De acordo com a BSA (2018), a IA proporciona a otimização da máquina a partir de dados históricos de sua função e de outras máquinas ligada ao processo de produção.

Existem diversas aplicabilidades da IA na área de mineração, entre elas vale destacar algumas como:

- I. Detecção de gases e perigos – a inteligência artificial permite realizar a detecção de perigos, especialmente gases perigosos, poeiras tóxicas e radiações na mina e são desenvolvidos para inspecionar o local de trabalho à frente dos trabalhadores usando robôs, sensores e por coleta de dados de estações de monitoramento pré-instaladas. Em determinadas situações, pode ocorrer de disparar os alarmes, dar sinais de alerta e bloquear a área afetada para diminuir a expansão do perigo.
- II. Amostragem

Os amostradores autônomos coletam amostras de minerais, atmosfera, gases, poeiras e materiais tóxicos, mesmo em áreas de alta concentração.

Sistemas inteligentes de monitoramento contínuo podem fornecer alertas precoces, sugerir medidas preventivas e reduzir a necessidade de acesso de trabalhadores a áreas perigosas para amostragem.

- Iii. Aplicação no processamento mineral

Os sistemas baseados em IA podem ser projetados para separar minerais úteis e material de ganga da produção da mina. Esses sistemas, usa seleção de cores, transmissão de raio-x ou sensores de infravermelho próximo para remover resíduos de minerais úteis. De acordo com Jeswiet e Szekeres, (2016), a aplicação destes sistemas antes da britagem aumenta a eficiência do processo de cominuição e reduzir custo de energia, visto que nesta etapa possui alto consumo de energia e de menor eficiência.

Iv. Análise de acidentes

As técnicas de análise e visualização de dados podem ser usadas para analisar causas e fatores que levam a acidentes e ações preventivas medidas podem ser projetadas com mais foco na remoção das causas dos acidentes.

Sistemas inteligentes projetados com foco em remoção de potenciais situações de risco, diminuição ou remoção completa da presença humana de áreas perigosas, dos trabalhos como transporte, carregamento e detonação de explosivos, instalação de suportes de telhado e remoção de gases e poeiras perigosas pode ajudar na redução de acidentes e fatalidades.

2.4.2 ROBÔS INTELIGENTES

Nos últimos anos os robôs passaram por melhorias em suas características, tornando-se mais autônomo, flexível e cooperativo com maior interação para realizar trabalho com segurança ao lado dos humanos. Robôs autônomos podem completar determinada tarefa com precisão e inteligência dentro do tempo determinado além de focar na segurança, flexibilidade, versatilidade e colaboração (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

Para Vitalli (2018), os robôs interagem com as máquinas e seres humanos, atuando de maneira mais flexível e colaborativa. Segundo Bekey (2005), são definidos como máquinas que sentem, pensam e agem e sua autonomia sendo capazes de operar no ambiente real sem qualquer tipo de controle externo por longos períodos.

2.4.3 MANUFATURA ADITIVA

De acordo com Coan (2016), esta etapa permite entregar diversos produtos, com diferentes customizações, em vários lugares e uso de novas tecnologias como a impressão em 3D.

2.4.4 SIMULAÇÃO VIRTUAL

Segundo Vaidya (2018), as simulações são usadas nas operações da planta para aproveitar os dados em tempo real espelhando o mundo físico em um modelo virtual, que pode incluir máquinas, produtos e humanos, reduzindo assim a configuração da máquina e aumentar a qualidade de tempos de ciclo, consumo de energia ou aspectos ergonômicos de uma instalação de produção. O uso de simulações de produção tem como característica a redução do tempo de inatividade, nas falhas de produção durante a fase de inicialização além de possibilitar melhoria na qualidade de tomada de decisão de maneira mais prática e rápida.

Os softwares de simulação utilizam os dados do processo, possibilita que as fábricas testem os processos sem que a produção seja interrompida ou prejudicada. A simulação pode ser feita por meio de softwares específicos, onde captura os dados da produção e realizam as análises de variáveis e de intervalos de tempo. Estes indicadores possuem a capacidade de apontar os gargalos da produção e a melhor forma de solução dos mesmos (PERDENEIRAS, 2019).

2.4.5 INTERNET DAS COISAS ou IoT

A Internet das Coisas significa uma rede de objetos interconectados. O contexto, onipresença e otimização são os três principais recursos da IoT:

- i. o contexto se refere à possibilidade de interação do objeto com um ambiente existente e resposta imediata se alguma coisa mudar.
- ii. a onipresença fornece informações de localização, condições físicas ou atmosféricas de um objeto.
- iii. otimização ilustram os fatos que os objetos de hoje são mais do que apenas uma conexão à rede de operadores humanos na interface homem-máquina.

Os softwares e dados são elementos chave para o planejamento e controle inteligente de máquinas e fábricas do futuro, toda cadeia de valor deve ser inteligente, ágil e em rede, integrando objetos físicos, fatores humanos, máquinas inteligentes, sensores inteligentes, processo de produção e linhas de produção juntos através das fronteiras da organização (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

De acordo com Ashton (2009), o uso de IoT prevê a conexão de todos os objetos físicos conectados à Internet, com capacidade de capturar informações por meio de radiofrequência (RFID) e tecnologias de sensoriamento, pois permitem observar, identificar e compreender o mundo independentemente das pessoas e suas limitações de tempo, atenção e precisão.

Segundo Kang (2016), essa tecnologia de sistema conduz a conectividade entre o ambiente físico e o ambiente digital permitindo com que objetos e mecanismos sejam detectados em meio a produção e distribuição por mecanismos de rede infra, garantindo maior segurança e controle gerencial as empresas. Esse sistema pode ser descrito em quatro camadas, sendo elas: a detecção, a rede, o serviço e a interface de conexão.

Para Castells (2003) a internet é a base tecnológica da Era da Informação, denominada de rede e ressalta que a IoT se trata de vários sistemas, interligados entre si em diversas escalas, formando um ecossistema com componentes biológicos.

Estabilidade operacional, melhoria da produtividade e redução do impacto ambiental estão entre os ganhos proporcionados por meio do gerenciamento inteligente na mineração. Essa contabilidade vem se concretizando graças ao uso da digitalização e Internet das Coisas (IoT) embarcados em equipamentos de processamento mineral (ABM, 2018, p.31).

De acordo com Rothrock, Kaplan e Oord (2019), o grande risco de uso da IoT está relacionado a segurança cibernética, e para que o seu uso torne se mais difundido é necessário o desenvolvimento de melhores protocolos de acesso e expansão da área da Tecnologia da Informação (TI) das empresas.

2.4.6 BIG DATA

Para Sriramoju (2017), o termo big data apresenta diversas características e pode ser descrito pelo:

- i. **Volume:** A quantidade de dados gerados é muito importante, pois é o tamanho dos dados que determina o valor e potencial dos dados em consideração e se eles podem realmente ser considerados como big data ou não.
- ii. **Variedade:** significa que a categoria à qual pertence também é muito essencial, um fato que precisa ser conhecido pelo analista de dados, essa informação é muito importante para as pessoas, quem vão analisar esses dados.
- iii. **Velocidade:** se refere à velocidade de geração de dados e a rapidez com que os dados são gerados e processados para atender às demandas do negócio.
- iv. **Variabilidade:** a análise dos dados é muito difícil, se refere à inconsistência que pode estar presente em dado momento, devido a isso, o processo necessário para a análise deve gerenciar e lidar com big data de forma eficaz.
- v. **Complexidade:** Os dados coletados de fontes diferentes, esses dados precisam ser vinculados, coletados e correlacionados entre si então, por meio desses dados, seremos capazes de derivar as informações que os dados desejam representar.

De acordo com Vitalli (2018), trata-se de sistemas inteligentes que identificam as falhas nos processos, melhora a qualidade da produção em tempo real, economiza energia e aumenta a eficiência na utilização de todos os recursos produtivos.

O *big data* faz uma análise e interpretação de grandes volumes de dados de enorme variedade. Essa ferramenta possui grande importância na definição de estratégias de marketing, sendo possível aumentar a produtividade, reduzir custos e tomar decisões de negócios mais inteligentes (CANALTECH, 2021).

Para Wang (2016), refere a um sistema de análise de dados com características específicas em termos de volume, veracidade, velocidade, variedade e valor com base na relevância da capacidade de processamento e urgência com que os dados devem ser analisados.

Segundo a ABM (2019), com o avanço das tecnologias envolvendo *big data* e controladores inteligentes no setor de mineração, tem como principal objetivo a redução de

custos e eficiência energética integrando estratégias de transformação de dados em lucros, utilizando como suporte a engenharia de dados, ferramentas de monitoramento remoto e indicadores de tempo médio tem proporcionado ganhos em eficiência em torno de 15%, além na redução de paradas emergenciais

O uso do *big data* na cadeia produtiva da mineração busca o aprimoramento da eficiência da produção, por meio de previsibilidade do produto. Segundo Tiago (2019), a empresa Vale construiu um banco de dados com o objetivo de identificar possibilidades de melhoria e controle do processo para que após a identificação das melhores práticas pudesse divulgar em toda a empresa para garantir ganhos de eficiência e produtividade. Através da utilização de um algoritmo para reduzir o consumo de combustível otimizando os dados a partir de análises de indicadores de veículos e rotas pré direcionadas, permitiu uma economia de R\$ 1,8 milhões após cinco semanas do projeto.

Com o surgimento da *machine learning* na mineração tem facilitado a localização de depósitos minerais, uso de melhores padrões de disposição de explosivo, aumento na vida útil dos equipamentos. Segundo Klein (2018), a Empresa ThoroughTec Simulation através do *machine learning* desenvolveu uma tecnologia que coleta dados e analisa o desempenho em tempo real, onde consegue transformar dados em insumos, gerando relatórios e otimizando o processo.

O grupo de consultoria GE21 (2019), fornecedora de componentes para a área de mineração, adotou uma plataforma denominada de GV Mapper que realiza a captura de dados em campo de forma padronizada e permite a formatar e organizar dados que servem de base para modelos geológicos, reduzindo de 30% a 40 % o tempo gasto com análises de dados.

2.4.7 CLOUD COMPUTING

De acordo com Vitalli (2018), a nuvem é um acesso ao banco de dados e suporte de qualquer local do planeta, permitindo a integração de sistemas e plantas em locais distintos, mesmo que distantes fisicamente, da mesma forma o controle e o suporte podem ser efetuados de maneira global.

Com a eclosão da indústria 4.0, as organizações precisam de maior compartilhamento de dados, ou seja, atingindo os tempos de reação em milissegundos ou até mais rápido, para

compartilhar informações do conjunto de máquinas de um chão de fábrica, bem como para toda a fábrica.

2.4.8 SEGURANÇA CIBERNÉTICA (CPS)

Segundo Liu e Xun (2017), a CPS, deve ser compreendido como uma tecnologia constituída por computação, rede e processos físicos, sendo responsável pela conectividade do ambiente físico e tecnológico. Para Wang (2016) trata-se de tecnologias de gerenciamento entre as características informatizadas e os ativos físico de produtos e serviços, sendo realizado por meio de uma infraestrutura de dados, que permite maior controle e segurança diante das decisões.

O termo CPS foi definido como os sistemas em que os sistemas naturais e humanos (espaço físico) estão estreitamente integrados com sistemas de computação, comunicação e controle (ciberespaço). Descentralização e comportamento autônomo do processo de produção são as principais características do CPS. A evolução do CPS depende da adoção e reconfiguração de estruturas de produtos de Redes de Abastecimento consideradas colaborativas nos sistemas físicos do Cyber que são utilizados em sistemas de fabrico, bem como sistemas físicos diferentes como virtuais sistemas de controle de tráfego da cidade. O uso de sensores adequados no CPS deve descobrir a falha que ocorre em máquinas e se preparar automaticamente para ações de reparo de falhas no CPS. Também encontrar a melhor utilização de cada trabalho estação com o auxílio do tempo de ciclo necessário para a operação realizada naquela estação. A estrutura 5C usa computação em nuvem para se comunicar com as máquinas (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

Cuidados com a CPS devem ser tomados, pois com o aumento da conectividade e uso de protocolos de comunicação padrão surge a necessidade de proteger sistemas industriais contra ameaças. Dessa forma, as comunicações seguras e confiáveis, o gerenciamento de identidade e acesso de máquinas e os usuários são essenciais. A forte conexão do mundo físico, do serviço e do mundo digital pode melhorar a qualidade da informação necessária ao planejamento, otimização e operação dos sistemas de manufatura.

Com a quarta revolução industrial surgiram a preocupação em relação à segurança da informação, pois, ao mesmo tempo, que a tecnologia evoluiu a indústria, os números de crimes digitais também cresceram. Na indústria 4.0, todas as áreas e sistemas acabam interligados, seja pela internet, por um serviço de cloud ou até mesmo com alguma conexão com o mundo externo. Toda essa descentralização da informação abre brechas de segurança que antes não existiam. Assim, é necessário que os planos de ciber segurança também contemplem este cenário, onde várias pessoas têm acesso às áreas. Além disso, é preciso ter em mente que existem diversos caminhos para aumentar a proteção dos dados (SENIOR BLOG, 2020).

2.4.9 REALIDADE AUMENTADA

De acordo com Paiola (2019), essa tecnologia permite uma integração em tempo real com informações e dados obtidos de sistemas industriais, GPS, câmeras de vídeo e internet, através de projeção de cenários virtuais sobre o mundo físico.

Segundo Vaidya (2018), os sistemas baseados em realidade aumentada suportam uma variedade de serviços, como a seleção de peças em um depósito e enviar instruções de reparo em dispositivos móveis, além de fornecer aos trabalhadores informações de tempo para melhorar a tomada de decisão e os procedimentos de trabalho. Os trabalhadores podem receber instruções de reparo sobre como substituir uma peça específica, pois eles estão olhando para o sistema real que precisa de reparos (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

2.5 A INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

Segundo Dorin et al., 2014, o setor de mineração é um dos maiores contribuintes para o desenvolvimento socioeconômico e humano. Nos últimos anos, possui uma alta demanda global por matérias-primas, teores de minério reduzidos, mercado de trabalho restrito e elevados padrões de requisitos de produção tem tornado os principais desafios da indústria de mineração.

Para Lee (2013), as empresas visam alcançar excelência operacional, conformidade e gestão além de grande quantidade de capital investido. No entanto, a promessa de fácil integração de sistemas avançados, tecnologias em vários níveis no negócio de mineração para alcançar maior flexibilidade, melhor qualidade, resultados e controle de processos e lucros maiores tem sido difícil.

O setor de mineração desempenha um ótimo papel no desenvolvimento econômico e social e está no topo do espectro quando se trata de recursos da cadeia de abastecimento (Dorin et al., 2014 e Olakekan et al., 2016). A mineração traz ganhos econômicos diretos para países com renda nacional baixa ou média, através dos benefícios, como:

- i. Investimento estrangeiro direto;
- ii. Exportações;
- iii. Imposto do governo;
- iv. Renda nacional e bruta;
- v. Trabalhos e salários;
- vi. Desenvolvimento econômico.

Todas as mudanças perceptíveis na mineração 4.0 estão relacionadas com os resultados consolidados. Graças ao uso de tecnologia, é possível obter mais eficiência, diminuir os erros, ampliar o nível produtivo, maior segurança no ambiente de trabalho com número muito menor de pessoas expostas ao ambiente de risco e redução nos custos (METSO, 2021).

As empresas de grande porte na mineração têm investido nas centrais de operação remota, com frotas de caminhões e até mesmo escavadeiras autônomas que são controladas por um operador em uma base distante, através de monitoramento em tempo real e controle de distâncias (INOVAÇÃO INDUSTRIAL, 2021).

Para Eirich (2020), a mineração do futuro é moldada em um contexto em que necessita produzir a custos determinados pela competição internacional. A indústria de mineração conseguiu superar as adversidades com o surgimento de novas tecnologias. O setor de mineração aos poucos se aproxima das visões da indústria 4.0 com instalações de processamento de minério mais sofisticadas tecnologicamente.

A Indústria 4.0 no setor minerário ainda não é realidade na América Latina, mas será em breve. As inovações que as tecnologias promovem na mineração ajudam a diminuir o impacto ambiental, a reduzir os riscos expostos e a melhorar a produtividade nas operações (MIASKOV, 2017).

Através dos impactos gerados nas empresas, pode-se observar a relação existente entre o mercado de trabalho e a oferta da mão de obra. As indústrias têm que ser mais eficientes para ser competitivas, com isso cresce o medo da substituição da mão de obra humana por processos automatizados e tecnologias como o Machine Learning e a Inteligência Artificial.

No entanto, espera-se um desenvolvimento da força de trabalho para atuar em funções que exigem uma capacitação maior dos funcionários. Ou seja, a ideia não é substituir o profissional, e sim especializá-lo (ADBI, 2021).

Atualmente o avanço da tecnologia tornou-se indispensável, as empresas que acompanharem as evoluções tecnológicas possuem maior chance de prosperar. É por isso que o conceito da Indústria 4.0 vem sendo aplicada na mineração (RETTORE, 2021).

Segundo a BSA FOUNDATION, o Brasil, ocupa a sétima posição de maior PIB do mundo, sendo um país conhecido por sua economia baseada em petróleo, gás, mineração e agricultura, e vem migrando para a era em que o digital e o físico se unem. Algumas das principais empresas brasileiras se uniram para promover o uso dos recursos tecnológicos

disponíveis para aumentar a adoção e a posição do Brasil no ranking mundial. Hoje, através de ferramentas digitais utilizadas, o modelamento de processo e o comportamento da usina, proporciona maior produção com um menor custo de investimento.

Uma planta que possui tecnologias da indústria 4.0, possibilita o cliente a reduzir custos de operação, otimizar os ativos de produção e melhorar a automação nas plantas para reduzir os custos operacionais. Dessa forma, o custo de investimento tem que ser o mais baixo possível, porém sem deixar de lado os aspectos ambientais e de segurança. Este é um ponto importante na mineração: desde o início tentar reduzir ao máximo o custo de implantação e operações e ver que outras inovações são possíveis (ALVES, 2019).

Para obter um excelente desempenho de uma mina deve-se buscar o controle operacional de parâmetros tais como produção de minério e estéril, distância média de transporte do material, capacidade e “saúde” dos equipamentos, produtividade da operação e disponibilidade da frota, entre outros.

O sistema de gestão de frota de mina propiciou uma grande evolução, pois até a década passada a gestão de frotas tinha como foco o despacho de caminhões e equipamentos de carga, consequentemente aumentaria a utilização da frota e redução do custo de material lavrado, nos últimos anos a gestão de frota de mina inclui muito mais do que direcionar o caminhão à escavadeira certa.

Com o avanço das inovações tecnológicas pode-se incluir aspectos como alarmes anticolisão, análise preditiva de manutenção, lavra seletiva, gestão da qualidade do minério e o gerenciamento de equipamentos autônomos (PASSOS, 2019).

Hoje é possível ter informações da operação em tempo real e a tomada de decisão em centrais compartilhadas, pois a automação fornece grandes quantidades de dados, a existência da Internet das Coisas e sistemas baseados na nuvem que ampliaram a capacidade de captura e disponibilização de dados possibilitando a análise de comportamentos e tendências para apoio à tomada de decisão (TOMI, 2019).

Os esforços contínuos para a inovação contribuem para que as operações tenham custos de produção mais competitivos.

Segundo Alves (2019), a inovação tecnológica em uma mina de ferro de Minas Gerais, onde a massa transportada em caminhões era aferida em balanças rodoviárias e as informações utilizadas para adequar cada viagem conforme a densidade do material sendo lavrado. Foi

instalado um sistema de gestão de frota com controle automatizado de carga por viagem e feita a avaliação durante dois anos. “No primeiro ano, teve-se uma média de produção de 36,3 toneladas/ viagem e uma variância de 16,6. Ou seja, a carga do caminhão variou de 13,7 a 62,0. No segundo ano, a média foi para 35 t e a variância caiu para 5.

Então esse processo ficou muito mais sob controle. Continuou tendo diferença, mas o máximo passou para 48. Como resultado, conseguiu-se uma redução nos custos de manutenção, com 73,5% a menos de materiais em suspensão, menos 65,3% de troca de bombas de direção, redução de 46% na troca ou reforma de componentes de direção e de 40% em reformas de turbinas. Além disso, a produtividade média aumentou 9,1%.

Algumas empresas já estão utilizando uma *Start up* que desenvolveu um sistema de gestão de frota para pequena e média mineração utilizando conceitos da mineração 4.0, denominado SIGAM. O sistema possibilita identificar fatores de enchimento inadequado, carga descentralizada, granulometria e qualidade inadequada do minério e o controle de velocidade através do estabelecimento de pontos de controle.

À medida que vão se reduzindo os teores, como está acontecendo com a maior parte das jazidas, é preciso desenvolver e melhorar o tratamento dos materiais e otimizar o processo. A Metso propõe o uso da geometalurgia automatizada, que permite determinar se a planta está ou não operando bem em relação ao que se planejou extrair em termos de material útil de dentro da jazida.

De acordo com Souza (2019), este programa contribui muito para o controle de processo, porque permite:

- i. rastrear o minério da mina à usina usando *Smart Tags*;
- ii. avaliar o desempenho de cada tipo de minério e refinar as classificações de minério;
- iii. otimizar o processo (da mina até a flotação) para diferentes minérios;
- iv. rastrear, monitorar e atualizar continuamente o modelo de blocos com respostas geometalúrgicas da planta aos tipos de minério.

A empresa Metso possui outras ferramentas que auxiliam a área de geometalurgia, sendo: *Smart Tags*, o GeoMetso, Integração e Otimização de Processos, OCS-4D e os Sensores Avançados. O sistema *Smart Tag* acompanha o minério desde o desmonte até o processamento, permite que as propriedades físicas do minério na mina possam ser associadas com os dados de

desempenho da planta. O Tag tem um chip, que é colocado junto com o tampão do furo de detonação.

Os benefícios do uso do *Smart Tag* permitem: o rastreamento de minério da mina à usina, medição do tempo de residência de pilhas, resultados de *blending*, correlação entre desempenho da planta e origem do minério, efeito do desmonte sobre o desempenho da planta e reconciliação de teores e recuperações (DUTRA, 2019).

Os benefícios principais do GeoMetso são:

- i. o sistema utiliza o rastreamento de minério (*Smart Tag*) para conectar o desempenho da mina e planta com as propriedades físicas do minério e localização espacial no modelo de blocos; continuamente recolhe dados de desempenho da planta e atualiza automaticamente o modelo de blocos;
- ii. permite ajustar o plano de lavra da mina com o objetivo de manter o desempenho geral ideal;
- iii. reduz ou elimina a necessidade de ensaios de caracterização de minério adicionais;
- iv. avisa previamente o tipo de minério a ser processado, permitindo ajustar as condições de operação para maximizar produtividade, reduzir custos, e consumo de energia;
- v. e permite o planejamento estratégico e otimização do planejamento de lavra para otimizar a rentabilidade da operação sobre a vida útil da mina.

O Controle Avançado de Processos utiliza os sistemas *VisioRock Compact* e o *VisioFroth*. O primeiro controla o tamanho dos britadores com base no tamanho real do produto, a razão da alimentação da pilha para controlar o tamanho da alimentação para o SAG (moinho semi-autógeno) e monitora o desempenho das peneiras, enquanto o segundo, usado na flotação, monitora a velocidade de espuma, tamanho da bolha, textura, cor, estabilidade da espuma (ALVES, 2019).

A tecnologia de *Ore Sorting*, da *Redwave*, utiliza sensores para separar por cor, transparência/brilho e por tamanho e formato. Os sistemas são totalmente computadorizados, automatizados, e através de um painel pode se acompanhar o fluxo, para se obter as medidas de tamanho dos grãos, qualidade, temperatura etc. Os equipamentos são todos de acesso remoto,

ou seja, pode-se acessar diretamente via internet, entrar no equipamento e fazer as verificações, permitindo assim uma seleção de material bastante eficiente (A TECNOLOGIA, 2018).

A *Anglo American*, na planta de níquel de Barro Alto, utiliza o sistema *Bulk Ore Sorting*. Essa tecnologia consiste em um equipamento com sensores especiais capazes de detectar o teor do minério ainda na mina, permitindo a separação por teores e melhor blendagem antes de ser enviado à planta de beneficiamento. Com esta tecnologia, consegue-se extrair mais produto do que da forma convencional (BRUIJN, 2020).

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) vem se beneficiando com a utilização da tecnologia digital em suas operações localizadas na Zona da Mata mineira (municípios de Miraf e Itamarati de Minas), onde a empresa lavra bauxita. Através de drone está sendo realizado o acompanhamento de estoque e levantamento topográfico para uso e ocupação do solo. São usados registros fotográficos para o cumprimento das condicionantes ambientais. Antes do drone, a CBA usava imagens de satélite.

Outra tecnologia digital, o Nidar, que a empresa CBA está usando é o ecobatímetro para as duas barragens de rejeito que possui, assim permite acompanhar melhor o comportamento dos rejeitos no fundo da barragem através de radares (ANDRADE, 2019).

A empresa Serabi é uma mineradora que trabalha com carregadeiras de controle remoto, para evitar acidentes no processo de desmonte de rochas (REVISTA BRASIL MINERAL, 2017).

A empresa LafargeHolcim adotou o projeto Operação Remota das Moagens de Cimento nas plantas de Candeias (BA), Vitória (ES) e Cocalzinho de Goiás (GO). Com isso, a passou a ter o controle, totalmente integrado, realizado na sua planta de Pedro Leopoldo (MG), através de softwares conectados via Internet e monitorado por uma equipe da sala de controle, onde rastreia e monitora os dados das três unidades satélites.

Na implantação foi necessário a montagem de uma base de instrumentação com tecnologia IoT e AI, conectada via wi-fi, onde foram instaladas câmeras com inteligência artificial e sistemas para o monitoramento online da rede de automação e um sistema de gerenciamento online dos consumos e demandas de energia elétrica, que irá auxiliar a otimização da eficiência energética das moagens.

O uso de algoritmos de estimação e qualidade do cimento foi um dos benefícios gerados, e a partir dos sinais de campo, pode-se prever a qualidade dos produtos, usando

tecnologia de Redes Neurais, que fornecem informações em tempo real, que ajuda no controle automático dos moinhos, em um sistema que processa as informações na nuvem de dados.

A tecnologia na nuvem é usada no monitoramento de ativos (Online Asset Monitoring System) para monitoramento dos motores e equipamentos girantes, como motores e redutores. Com os dados coletados na nuvem, a LafargeHolcim gera os relatórios periodicamente que são analisados, pelos especialistas de manutenção da companhia (REVISTA BRASIL MINERAL, 2020).

De acordo com Caterpillar (2017), existem vários fabricantes de caminhões de transporte de mineração autônomos e a Caterpillar operou sua primeira frota de caminhões autônomos na Austrália. As empresas BHP e Rio Tinto utilizam essa tecnologia e tiveram uma redução de 15% nos custos de operação em comparação com caminhões operados manualmente (Dyson, 2017; Simonite, 2016).

Esses caminhões autônomos permitem operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem a necessidade de pausas para descanso e mudanças de turno devido aos locais de mineração fornecerem estradas praticamente livres, sem outros tráfegos, pode ser designado apenas para esses veículos. É por isso que além de caminhões de transporte autônomos, carregadeiras autônomas, trens e escavadeiras estão sendo desenvolvidos para atender às necessidades da indústria de mineração.

No intuito de otimizar os custos do carregamento e transporte, nos últimos anos, algumas empresas estão adquirindo caminhões autônomos, que permitem o controle através de AI com dados coletados por GPS e radares, fazendo com que os caminhões percorram o trajeto pré determinados.

Segundo Santhiago (2021), o sistema de segurança conta com sensores que detectam diversos tipos de objetos, como por exemplo:

- i. rochas grandes,
- ii. veículos de pequeno porte,
- iii. outros equipamentos tripulados,
- iv. bem como obstáculos nas proximidades da estrada de acesso.

Dessa forma, é possível gerenciar os riscos, como tombamento, atropelamento e colisão. Com o aumento da segurança dos trabalhadores, o uso de caminhões autônomos

possibilita maiores ganhos ambientais significativos à mineradora. Com os controles autônomos é possível obter maior vida útil dos equipamentos e seus componentes.

Segundo a *Mine Safety and Health Administration* (MSHA), em 2017, quase 40 % dos acidentes da mineração envolveram fatalidades e mais de 30 % dos ferimentos envolvido foram com equipamentos móvel. Devido a situações como essas, surge a necessidade de melhorar a segurança, buscando sempre a eficiência continua de forma vital na indústria de mineração.

Esses caminhões autônomos permitem operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem a necessidade de pausas para descanso e mudanças de turno devido aos locais de mineração fornecerem estradas praticamente livres, sem outros tráfegos, pode ser designado apenas para esses veículos. É por isso que além de caminhões de transporte autônomos, carregadeiras autônomas, trens e escavadeiras estão sendo desenvolvidos para atender às necessidades da indústria de mineração.

Segundo Santhiago (2021), o sistema de segurança conta com sensores que detectam diversos tipos de objetos, como por exemplo:

- i. rochas grandes;
- ii. veículos de pequeno porte;
- iii. outros equipamentos tripulados;
- iv. bem como obstáculos nas proximidades da estrada de acesso.

A Figura 5 mostra um caminhão autônomo utilizado na mineração, este possui alta capacidade de transporte de carga, onde foi implantado novas tecnologias envolvendo radar, gps, sensores e inteligência artificial que permita o seu deslocamento sem a necessidade de motorista.

Figura 5: Caminhão autônomo da Vale de Brucutu em Minas Gerais.



Fonte: Vale, 2018.

Segundo Matsuda (2020) esta nova tecnologia representa uma melhoria de 40% na vida útil dos pneus e freios, redução de 13% na manutenção geral e a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera. Na cidade de Parauapebas, no Pará, foi instalado um centro de treinamento pela mineradora, para realizar à capacitação de pessoas envolvidas na operação. Nos dias atuais, mais de 400 caminhões autônomos Komatsu são usados mundialmente.

Diante desses avanços tecnológicos e implementação da indústria 4.0 dentro das áreas de mineração algumas empresas adotaram o conceito de Mineração 4.0.

2.6 A INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL

2.6.1 BREVE ABORDAGEM SOBRE A MINERAÇÃO

Na antiguidade a história foi dividida em dois períodos: a Pré-História (anterior a escrita) e História (posterior a escrita). A mineração existe desde a Pré-História, uma época em que foi subdividida em: Paleolítico, Neolítico e Idade dos metais. A Figura 6, descreve cada característica de cada período. Nesta época a forma de minerar era bastante rudimentar, utilizavam ferramentas e utensílios oriundos da pedra lascada para realizar a caça e pesca, além de descoberta do fogo (Paleolítico). No período subsequente (Neolítico), houve alguns avanços que permitiram a utilizar a pedra polida, fabricação de cerâmicas e divisões de tarefas. Durante

a Idade dos Metais, surgiu a metalurgia, consequentemente o abandono de ferramentas utilizadas das pedras e surgimento dos primeiros comércios entre as civilizações.

Figura 6: Divisão da Pré-História



Fonte: Adaptado de Augusta 2020.

De acordo com Mesquita (2016), os bens minerais são divididos em dois grupos, sendo:

- 1) os minerais não metálicos
- 2) e os metálicos.

No entanto, os bens minerais não metálicos podem ser subdivididos em:

- i. rochas e minerais industriais: grafita, magnesita, crisotila, calcário, areia industrial, barita, bentonita e fluorita;
- ii. rochas ornamentais e de revestimento: granitos, mármore e ardósia;
- iii. materiais para construção civil: areia, brita e argila;
- iv. agro minerais: rochas fosfáticas e o calcário agrícola;
- v. minerais energéticos: carvão mineral;
- vi. pedras preciosas e semipreciosas;
- vii. água mineral.

Os bens minerais metálicos estão distribuídos em três categorias, sendo:

- a. metais ferrosos: ferro, nióbio, manganês e cromo;

- b. metais não ferrosos: alumínio, cobalto, cobre, chumbo, estanho, metais do grupo da platina, tálio, tântalo, terras-raras, titânio, vanádio, molibdênio e zinco
- c. metais preciosos: ouro e a prata.

Entende-se por mineração a extração e o beneficiamento de minerais que no seu estado natural, incluindo a exploração das minas subterrâneas e de superfície e todas as atividades complementares para preparar e beneficiar minérios em geral, na condição de torná-los comercializáveis, sem provocar alteração, em caráter irreversível, em sua condição primária.

Segundo Mesquita (2016) a mineração abrange um conjunto de atividades necessárias para a obtenção de um produto mineral bruto, de um concentrado ou de um aglomerado, destacando-se a:

- a lavra: extração mineral e transporte interno;
- o beneficiamento que consiste em etapas de cominuição (britagem e moagem), classificação, concentração e/ ou aglomeração.

Para Curi (2017), o conjunto de operações mineiras que visa o aproveitamento de uma jazida mineral é denominado de lavra, também podendo ser chamada de exploração, sendo que as fases anteriores são a prospecção, a exploração, desenvolvimento e fechamento de mina. Segundo Racia (2016), o ciclo de operações mineiras de lavra convencionais, se fundamenta em quatro operações unitárias: perfuração, detonação, carregamento e transporte.

Segundo HARTMAN (1996) na lavra a céu aberto é realizado uma escavação superficial para remoção de estéril e minerais de interesse econômico, tendo como principal tarefa a ser desenvolvida no projeto, o desenho da cava final, que depende dos fatores naturais e geológicos, econômicos e técnicos.

Para DE CARLI (2013) através da cava final pode se realizar o sequenciamento da lavra e planejamento da produção na mina, da planta de beneficiamento e dimensionamento dos equipamentos envolvidos na lavra e no transporte do minério.

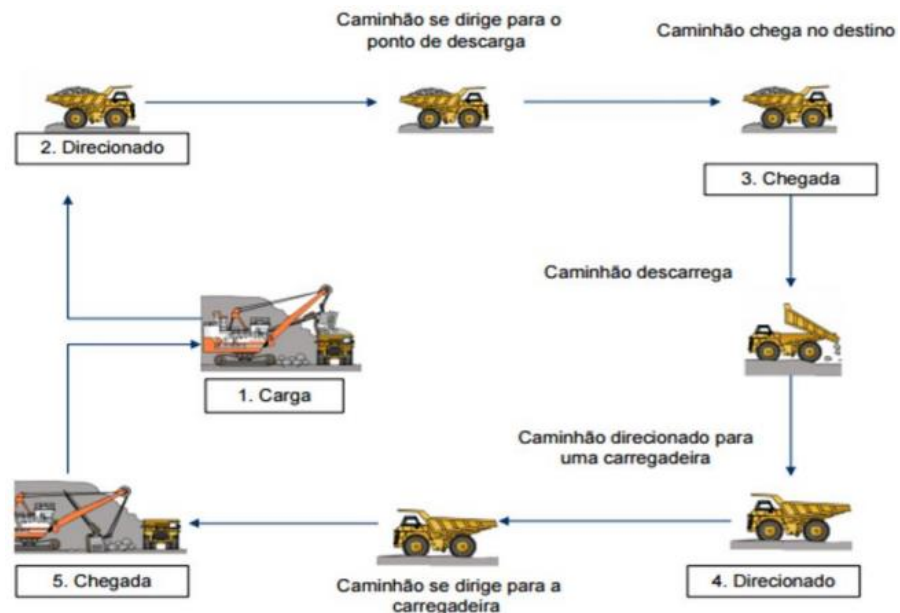
As operações de carregamento e transporte são etapas essenciais do processo de lavra de minas e os fatores como volume de produção e condições operacionais interferem diretamente nas escolhas de equipamentos e dimensionamento de frotas, visando os menores

custos de operação. O constante aumento de produtividade e redução de custos operacionais nas empresas exigem um bom planejamento e gerenciamento do processo.

Segundo Bernardi (2015), a operação de transporte consiste em transportar o material extraído da jazida (normalmente liberado por meio de desmonte com explosivos ou desmonte mecânico) e direcioná-lo até diferentes pontos de descarga, que podem ser a planta de beneficiamento, uma pilha pulmão ou uma pilha de estéril. Para garantir a produtividade dos equipamentos de transporte é necessário mantê-los sempre em produção, evitando filas e ociosidade, otimizando assim a operação.

A Figura 7 apresenta um exemplo do ciclo completo de carregamento e transporte através de conjunto escavadeira-caminhões em uma mina. De acordo com Coutinho (2017) o carregamento impacta nos custos de operação de mina influenciando em todo o ciclo de produção devido a operação estar conjugada com o transporte, sendo que, um carregamento ineficiente e com baixa produtividade irá reduzir a produção nas minas.

Figura 7: Ciclo do processo de carregamento e transporte por caminhão.



Fonte: adaptado de Bernardi, 2015.

2.6.2 BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NAS EMPRESAS

De acordo com Spricigo (2018), as empresas estão cada vez mais se adequando as novas tecnologias para se adaptar ao mercado e tornar-se mais competitiva. Com a chegada da indústria 4.0 alguns benefícios já se destacaram com o avanço tecnológico, sendo:

- i. Redução de custos;
- ii. Economia de energia;
- iii. Aumento da segurança;
- iv. Conservação ambiental;
- v. Redução de erros;
- vi. transparência nos negócios;
- vii. Customização em escala.

Segundo Totvs (2021), a quarta revolução industrial trouxe um aspecto mais elaborado em relação ao uso da tecnologia, utilizando os atributos como conectividade, inteligência artificial, data science, big data, IoT, machine learning e tantos outros, transformando a maneira como máquinas se comunicam e utilizam as informações para otimizar o processo de produção, tornando-o mais econômico, ágil e autônomo.

2.6.3 MINERAÇÃO 4.0

O conceito de Mineração 4.0 está diretamente interligado a Indústria 4.0 através de aplicação das ferramentas da Indústria 4.0 no setor de Mineração, utilizando como base tecnologia e segurança, com foco no aumento de produtividade a partir da gestão dos processos automatizado. Atualmente, grandes empresas de mineração têm aderido à essa realidade.

O surgimento das mudanças é perceptível, na Mineração 4.0, apresentando resultados consolidados, maior eficiência, diminuição dos erros, ampliação de nível, maior segurança no ambiente de trabalho e redução nos custos. A eclosão de novas carreiras ocasiona possibilidades inéditas e demonstram que no futuro necessite de profissionais mais qualificados em posições mais estratégicas. A Mineração 4.0 proporciona resultados importantes desde a etapa de planejamento até o produto final.

Segundo a empresa Metso a aplicação de novas tecnologia e dos recursos inteligentes tem transformado a maneira como ocorre o planejamento das mineradoras. Os elementos mais utilizados, como computação nas nuvens, sistemas de gestão e Business Intelligence (BI), possibilita reunir uma grande quantidade de dados inerentes.

Essas informações quando cruzadas podem proporcionar interseções importantes na tomada de decisão, podendo identificar as melhores áreas para extrair minério ou como efetuar uma britagem de alta qualidade.

As empresas que aderiram ao conceito de inovação, destacam algumas vantagens da Mineração 4.0, como:

Produtividade - é um fator fundamental nos processos de mineração, os resultados, da mineração 4.0, utilizando as novas tecnologias tem contribuído para o seu crescimento, juntamente com a otimização da performance de equipamentos por meio de plataformas digitais, as quais permitiram o aparecimento de sistemas de controle e monitoramento e até mesmo a conexão entre os meios de comunicação.

O uso dos novos recursos ocasiona aumento da produtividade pois os equipamentos ficam com um período maior de disponibilidade para utilização, diminuindo os custos e perdas.

Sustentabilidade - é um fato associado diretamente à responsabilidade social. Este, é um conceito que traz inúmeras vantagens pelo fato de deixar os processos menos agressivos para a natureza e identifica meios para reduzir os impactos e a geração de resíduos.

Torna-se visível ainda por meio de:

- menor consumo de água;
- áreas degradadas recuperadas;
- destinação adequada dos rejeitos.

Segurança - as atividades de mineração são enquadradas com fator de risco 4 quando se trata de segurança, os acidentes tem tornado comuns nas áreas. Porém a mineração 4.0 veio para otimizar a segurança nos trabalhos, visando a saúde dos trabalhadores até a redução de riscos com terceiros, comunidades de pessoas que possam se localizar nas imediações das minas. Não se deve medir esforços para zelar o bem-estar dos trabalhadores para que eles efetuem suas atividades em melhores condições.

Autodiagnóstico - é uma das vantagens que mais se destaca, pois, a revolução tecnológica contribui para que os equipamentos disponham de recursos que permitam analisar suas próprias condições, como por exemplo os painéis de controle com informações em tempo real, integrados aos demais sistemas industriais.

Quando se trata de operação da mina, existem algumas tecnologias que transformam em realidade o avanço da indústria 4.0, como por exemplo:

- drones:** mapeamento de pilhas e alvos de extração, gerenciam terrenos de exploração;
- inteligência artificial:** integra as máquinas de mineração, como caminhões autônomos, escavadeiras subterrâneas (funcionam por controle remoto);
- operações integradas:** sistemas projetados com ferramentas e dados que possibilitam o acompanhamento geral do panorama de uma mina, integrando os diferentes processos e operações na mineração);
- learn machine:** é uma ferramenta que permite uma análise de diversos dados através de algoritmos, identificando os melhores lugares para a exploração de minérios.

De acordo com o IBRAM (2021), no primeiro semestre, o setor mineral registrou alta de 98% no faturamento (R\$ 24,2 bilhões) em relação ao mesmo semestre do ano anterior (R\$ 12 bilhões), alcançando R\$ 149 bilhões (exceto petróleo e gás). A Figura 8 mostra todos impostos e recolhimento do IBRAM no ano de 2020. De acordo com O IBRAM, a arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) foi de (R\$ 4,48 bilhões) sendo 111,7% superior ao mesmo período de 2020. O faturamento das exportações minerais brasileiras, alcançaram o patamar de US\$ 27,65 bilhões.

Figura 8: Dados IBRAM



Fonte: IBRAM, 2020.

Atualmente a mineração integra-se à cadeia produtiva composta pelas indústrias de base e seu produto é também matéria-prima de diversas outras. Conforme apuração da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), em 2019, foram constatados 7.296 titulares recolhendo CFEM, incluindo as micro e pequenas empresas.

O setor mineral brasileiro apresentou uma grande evolução desde 2000, impulsionada pelo super ciclo de commodities minerais com o crescimento da China e, por consequência, da economia mundial.

Segundo a ANM (2017), havia no Brasil 135 minas de grande porte, 992 de médio porte e 2.750 de pequeno porte. Foram contabilizados 5.653 empreendimentos mineiros de micro porte. Em 2019, o número de minas/unidades produtoras em operação no Brasil foi de 18.040 unidades, sendo contabilizados as minas, pedreiras, garimpos legais e complexos de água mineral. O estado de Minas Gerais possui o maior número de registro, em 2019, de 3399 minas em operação.

De acordo com Pietrobella, Marinb e Olivari (2018), o setor de mineração é uma atividade muito importante para o Brasil, atingiu 1,9% do PIB, 46% das exportações em 2015 e teve uma taxa de emprego de 0,52% no Brasil. A produção mineira brasileira é extremamente concentrada em ferro, com volumes capazes também em nióbio, vermiculita, amianto, tântalo e bauxita.

O setor mineral aumentou sua participação no PIB brasileiro, subindo para aproximadamente 4%, conforme dados da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia (SGM) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). De acordo com dados do Ministério da Economia, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, em 2019 o setor Extrativo Mineral tinha 174.719 empregos diretos.

A atividade de mineração reflete de forma positiva na qualidade de vida das pessoas. Observa-se que as cidades que existem empresas de mineração apresentam Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) maiores do que as demais cidades dos mesmos estados.

Segundo a ADBI (2018), menos de 2% das empresas do país já estão inseridas nesse conceito, juntas possuem capacidade para movimentar US\$ 15 trilhões nos próximos 15 anos.

O Brasil necessita do amadurecimento das empresas quando se trata de aderência ao conceito da indústria 4.0 e futuramente essa tendência ganhará mais força quando se alinhar cada vez mais às novas tecnologias e inovações. A indústria 4.0 está impulsionando os avanços

no processo produtivo, elevando o ideal de automatização para um patamar superior aos costumes que a indústria está habituada (TOTVS, 2018).

A pesquisa realizada pela FIESP (2018) mostra que o grau de conhecimento das empresas com foco industrial sobre os novos conceitos de inovação está crescendo. Vários gestores já veem esse movimento como uma oportunidade, e não como risco.

Segundo especialistas da ADBI, a aderência à indústria 4.0 irá acontecer de maneira gradual, em 10 anos, estima-se que 15% das empresas do setor de manufatura já tenham esse conceito inserido em suas atividades (ADBI, 2021).

2.7 DESAFIOS FUTUROS DA INDÚSTRIA 4.0

Um dos maiores desafios está relacionado aos aspectos culturais da sociedade, que ainda não compreende a sua importância. É fundamental que haja investimento na educação e no capital intelectual, caso contrário, há o risco de termos uma sociedade despreparada para atuar em funções não substituíveis. Atualmente, já se encontra alguns cursos de capacitação profissional relacionado a transformação digital. É de extrema importância se adaptar à nova cultura em aumentar a formação técnica da sociedade, pois as mudanças trazidas pela Indústria 4.0 são não apenas benéficas, mas necessária. As alterações percebidas farão bem para a empresa, mas também para seus clientes (ADBI, 2021).

A economia brasileira enfrentará grandes desafios, entretanto a quarta revolução industrial será uma grande oportunidade para o país. Será necessário um Profissional 4.0 com capacitação adequada para determinada atividade, portanto, tendem a aumentar o número de pessoas com alta qualificação no mercado. O trabalho em equipe nas empresas também tende a ser valorizado, eis que é possível utilizar diversos profissionais qualificados, além de ter diversas soluções inteligentes propostas solucionadas de forma rápida (INDÚSTRIA 4.0, 2021).

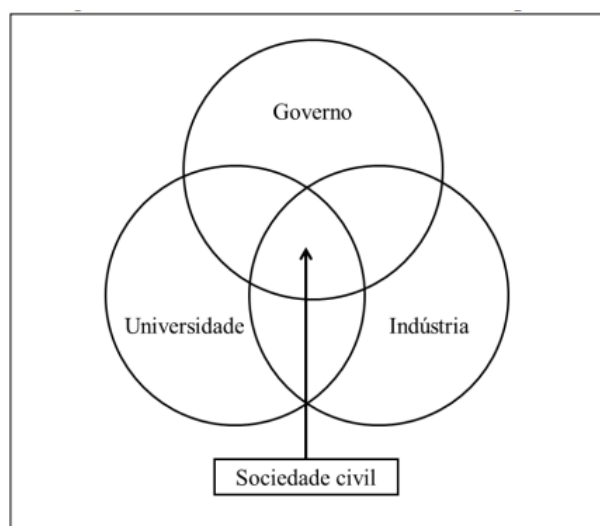
Nesse sentido surge o conceito da hélice tríplice um paradigma que deixa de ser centrado só na indústria, mas apoia em três elementos inter-relacionados: as empresas, as universidades e o governo. Todas as partes possuem um papel importante.

- as universidades tem suporte das empresas e do governo e se destacam como centros de excelência;

- as empresas, através da inovação produzida pelas universidades e os benefícios oferecidos pelo governo trona se competitiva no mercado;
- o governo, fortalece as universidades e empresas, cria um impacto positivo na educação e na economia do país.

Conforme mostra a Figura 8, a sociedade de modo geral é um ente interdependente que está associada a hélice tríplice, de certa forma se encontra inserida em todas as partes. A sociedade em si, atualmente pode ser considera como pessimista para adesão de novas tecnologias pois muitas pessoas só pensam na possibilidade de perder o emprego com as inovações que surgem.

Figura 8: Hélice Tríplice



Fonte: Etzkowitz, 2009.

Quando se trata de inovações no processo, é gerado impactos que influenciam diretamente nas relações trabalhistas e habilidades exigidas dos profissionais. Os gestores passam a exigir maiores capacitações, pois será necessária uma maior aptidão para enfrentar a transformação digital, multidisciplinaridade, criatividade e capacidade de inovar. Sendo assim, é necessário começar a agir o mais rápido para não perder tempo e prejudicar a competitividade da sua empresa.

Segundo a Agenda Brasileira para a Indústria 4.0, essa revolução industrial tornou-se uma excelente oportunidade para o Brasil, que ocupa o 62º lugar no ranking do índice global de inovação (ADBI, 2020). Segundo dados da CNI, houve um aumento do investimento em tecnologias pelas grandes empresas: passou de 63% em 2016 para 73% em 2018. Segundo dados da pesquisa realizada por Deloitte (2017) apenas 39% dos gestores brasileiros consideram o uso de novas tecnologias como um diferencial positivo. Em contrapartida, segundo a

Associação Brasileira de Automação, apenas 67% das fabricas entrevistadas já utilizam sistemas de gestão para auxiliar nos processos internos.

Para Hayashi (2020), existe cinco desafios que as indústrias brasileiras devem superar:

- **Segurança dos dados** - a combinação de sistemas físicos e digitais possibilita a interoperabilidade em tempo real, mas oferece o risco de ataque ao sistema pelo fato de ter inúmeras máquinas e dispositivos. As empresas devem antecipar as fragilidades do sistema corporativo e operacionais para evitar futuros problemas.
- **Falta de pessoal habilitado** - para alcançar sucesso da implementação das novas tecnologias e otimização das operações a empresa irá precisar de um profissional habilitado e capacitado para analisar as ferramentas digitais, auxiliar no desenvolvimento dos processos de fabricação, reduzindo os desperdícios e os gargalos, evitando falhas e aumentando a eficiência operacional da planta.

Segundo Macurova et al. (2017) nas organizações em transição para a Indústria 4.0 ocorrerá o risco de ter trabalhadores que não são qualificados e aptos para usar as tecnologias associadas, uma vez que as instituições de ensino superior ficam para trás em desenvolver programas educacionais adequados. Para Weber (2016) a Indústria 4.0 pode ter um impacto negativo de curto prazo na redução da demanda por trabalhadores qualificados. Um desafio futuro será reestruturar empregos e programas simultaneamente (Kane et al., 2015).

- **Integração e interoperabilidade de todas as tecnologias** - as empresas necessitam de inovação para desenvolver novos produtos e aumentar a sua produtividade, sem interoperabilidade, a sua capacidade de inovar é limitada. Dessa forma, realizar parceria com um fornecedor, torna-se capaz de trabalhar em conjunto para desenvolver e implementar soluções para novas ideias, favorecendo as melhorias ao longo do tempo e integrando as diversas soluções.
- **Criação de ecossistema** – a implantação de um ecossistema autônomo e altamente cognitivo, permite a utilização das tecnologias que envolve a AI, a acelerar mais a eficiência e além da criação de novos modelos de negócio, produtos e serviços a partir dos dados obtidos e analisados em toda a cadeia produtiva.
- **Conectividade** - permitir que a indústria 4.0 torne-se uma realidade, através da integração de sistemas, compartilhando dados e transformando a tecnologia em inteligência.

Com o avanço da indústria 4.0, Achenhagen e Zeller (2011) esperam que haja um aumento na operação da máquina, manutenção de software e trabalhos de manutenção de hardware, dessa forma, ocorrerá uma diminuição nos trabalhos repetitivos, rotineiros e fisicamente exigentes, enquanto aqueles que exigem um nível mais alto de educação, respostas flexíveis, resolução de problemas e complexidade verá um aumento (Lorenz et al., 2015).

O impacto da Indústria 4.0 no mercado de trabalho é um tema bastante polêmico. Para Weber (2016) as mudanças tecnológicas no passado que desencadeou o medo da perda do emprego enquanto as expectativas para o a indústria 4.0 oscila entre as otimistas visando aumento do emprego e condições de trabalho, aos pessimistas, que visam diminuição das oportunidades de emprego devido à substituição do trabalho humano por robôs.

De acordo com Schwab (2017), existem fatores que limitam o avanço do potencial da quarta revolução industrial devido ao baixo nível de liderança e de compreensão das mudanças, em diversos setores caracterizando um cenário que deve ser revisto pois depende dos sistemas econômico, social e político para corresponder à atual revolução.

Para implantação da indústria 4.0 existem diversos motivos que dificultam a aceleração do processo. Há pesquisas enfatizando o fato de que é mais difícil para as empresas de pequeno e médio porte (PMEs) atingirem os benefícios potenciais da Indústria 4.0 do que é para grandes empresas (Horváth e Szabó, 2019; Müller et al., 2018).

Segundo Ghobakhloo (2018) a transição para a Indústria 4.0 nas PME, requer:

- um gerenciamento de mudanças;
- uma cultura de apoio;
- a integração da cadeia de suprimentos;
- e transparência de dados em toda a cadeia de valor.

Isso deve ao fato de que muitas PME as vezes não reconhecem ou até mesmo nem tentar entender os benefícios estratégicos que podem ser alcançados se eles implementaram a Indústria 4.0 ou até mesmo por falta de recursos (Masood & Sonntag, 2020). Para Muller (2018) os recursos das PME são insuficientes e muitas vezes estão focados em ajustes operacionais ao invés de considerar novas formas de criação de valor, pois não se tem padronização de processos e muitas das vezes nem automação.

3 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica que tem como objetivo, examinar os impactos, desafios e cenários futuros da Indústria 4.0, dessa forma, foi empregado um método de pesquisa exploratória e explicativa. De modo geral, a pesquisa exploratória proporciona maior familiaridade com o problema, elevando as informações sobre o assunto investigado, enquanto os estudos exploratórios, analisa os fenômenos não conhecidos ou pouco investigados. De acordo com Mascarenhas (2012), o método é o caminho percorrido em um estudo através do qual se obtém uma resposta ou conclusão científica.

Durante a pesquisa por trabalhos acadêmicos, foi utilizado alguns termos presentes em documentos acadêmicos e técnicos, tais como: “Indústria 4.0”, “Quarta Revolução Industrial”, “Impact of Industry 4.0”, “Industry 4.0”, “Industrie 4.0”, “Intelligent Manufacturing” e “Smart Industry”. As bases de dados utilizadas foram Google Acadêmico e Science Direct. A busca foi feita nos bancos de dados, limitando os resultados a artigos, livros e revistas técnicas cujos termos apareçam no título, resumo ou nas palavras-chave em artigos de literatura científica. Os documentos foram selecionados sem limitação de ano de publicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os artigos pesquisados apresentaram diferentes abordagens a respeito da Indústria 4.0, que pode ser comparada com as três primeiras revoluções industriais passadas (SCHMIDT et al., 2015). A quarta revolução industrial envolve mudanças de forma rápida abrangendo a manufatura, comunicação em rede, tecnologias de computação e automação. As inovações trata-se de um novo paradigma industrial que permite melhorias na eficiência e produtividade entre as empresas que aderem as novas tecnologias (SCHMIDT et al., 2015).

Alguns autores ressaltam a sua importância não só no âmbito industrial, pois a tendência das inovações é expandir de forma global, proporcionando mudanças rápida no ambiente social e econômico. Segundo Schwab (2016), a sociedade está no início de uma revolução industrial que provocará mudanças que impactará em todos os âmbitos da vida individual e coletiva.

O tema Indústria 4.0 trouxe diversas inovações, com aplicabilidade em busca de melhorias envolvendo produtos e processos. As empresas mundiais tendem cada vez mais aderir a nova onda de inovações que possui um enorme desafio de ser totalmente automatizada e gerar renda. A quarta revolução possui um potencial de promover maior eficácia operacional, aumento de produtividade, crescimento econômico, e melhoria da competitividade, bem como o desenvolvimento de novos modelos de negócios, serviços e produtos (KAGERMANN et al., 2013). As empresas sempre visam a segurança do trabalhador em primeiro lugar, enquanto a produção aparece em segundo plano. Com a implementação de novas tecnologias é possível ter ganhos em segurança e produção, já que ocorrerá redução nos índices de acidentes envolvendo pessoas, pois os números de trabalhadores tendem a diminuir.

A internet das coisas associada a tecnologia do *Big Data* tem ocasionado grandes transformações no setor industrial e seus processos, tendo grande importância para Indústria 4.0, resultando em Fabricas Inteligentes. A falta de mão de obra qualificada é um fator preocupante para o futuro das inovações, percebe-se que a sociedade em geral é pessimista quanto ao avanço das inovações, pois possuem medo de perde a fonte de renda para as máquinas. Na mineração as implementações estão correndo de forma bastante lenta, conforme necessidade de melhoria no setor. As PME's, são as empresas mais afetadas e a tendência de inovar será mais lenta que nas outras empresas por diversos fatores, principalmente o econômico. A participação do governo, universidades e indústrias tendem a se evoluir cada vez mais futuramente, pois forma a tríplice hélice que estão inseridas entre si.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visa a contribuição com a literatura atual, que envolve os processos de inovação das novas tecnologias relacionadas a indústria 4.0 dentro da mineração. As pesquisas bibliográficas realizadas, favoreceram o entendimento dos novos conceitos que envolve a indústria 4.0, principalmente o fato de quanto é dependente da automação para o sucesso da inovação. Esta dependência permite uma integração de informações entre setores que possibilita um melhor planejamento para tomada de decisões rápidas com base no banco de dados obtidos do processo.

A implementação de novas tecnologias visa a melhoria continua do processo e observa-se que em termos de quantificação de dados sobre a aplicação do conceito de indústria 4.0 na mineração as inovações trouxeram enormes resultados significativos, relacionados segurança do trabalho, principalmente, com redução dos acidentes, custos, aumento de eficiência operacional consequentemente aumento da produtividade do setor.

Alguns impactos estão sujeitos a ocorrer com a implantação da Indústria 4.0, pois o fato de não existir uma capacitação de pessoas específica para as novas tecnologias, a tendência dos impactos é se tornarem mais perceptíveis nas relações trabalhistas e habilidades profissionais, tornando cada vez mais escassa a mão de obra. As empresas visam o aumento da produtividade e competitividade do setor, consequentemente será necessário criar novos modelos de negócios e criar alternativas, pesquisas e desenvolvimento nas áreas de segurança da tecnologia de informação.

As inovações proporcionam novos desafios futuros que deverão ser superados, envolvendo a segurança de dados onde as empresas integram sistemas físicos e digitais e necessitam antecipar as vulnerabilidades de possíveis ataques cibernéticos que possam vir ocorrer. A falta de habilidade dos profissionais, devem ser compensadas por treinamentos disponibilizados pela empresa. A prática de integração e interoperabilidade tem facilitado muito a visualizar o processo de forma mais ampla em tempo real e as tecnologias legadas devem ser integradas pois caso isso não ocorra, ocasiona uma limitação no processo. A conectividade tem sido um enorme desafio já que as novas tecnologias se encontram conectadas em redes, integrando diversos sistemas, compartilhando dados e transformando toda a tecnologia em inteligência.

Existe uma tendência para os cenários futuros da Indústria 4.0, de ocorrer a substituição da mão de obra humana, de forma que as máquinas substitua diversos mercados de

trabalho, consequentemente, novos postos de trabalhos deverão ser criados. O cenário da Indústria 4.0 no Brasil é pouco animador, pois a implementação de novas tecnologias vem ocorrendo de forma muito lenta, conforme as necessidades de melhorias da empresa, principalmente pelo fato de existir escassez de profissionais tecnicamente qualificados para trabalhar com as novas tecnologias de um sistema industrial inteligente.

As mineradoras em si para implantar uma nova tecnologia nem sempre terá recursos e mão de obra disponíveis de imediato, devido a esse fato, é necessário formar parcerias com outras empresas especializadas em inovações tecnológicas. Trata-se uma forma de demonstrar esforços no desenvolvimento das novas tecnologias em parceria com novos fornecedores. De modo geral, pode se dizer que a o avanço tecnológico se concentra em inteligência artificial, big data, IoT e produção conectada), através destes as empresas visam a interconectividade entre máquinas e equipamentos, consequentemente reduzirá a quantidade de trabalhadores nas áreas, como por exemplo na implantação de caminhões autônomos nas minas, onde todo o controle é feito através de uma central remotamente.

As novas tecnologias apresentadas para uma empresa, não significa que foram criadas dentro da mineradora, mas sim com trabalho conjunto entre funcionários e fornecedores. Com isso, gera um impacto interno deixando a empresa incapaz de exercer o domínio total da tecnologia implantada tendo numa escala de tempo uma limitação da sua capacidade de difusão.

A adequação das empresas de Mineração 4.0 tem se tornado inevitável. Devido as dificuldades de cada setor, tem ocorrido de forma lenta, no entanto, a transformação não será fácil. A cultura organizacional das empresas é um entrave desses planos, torna-se claro que as pessoas da empresa, trabalhando com as novas tecnologias e redefinindo os processos, pode se tornar a força motriz da mudança da Indústria 4.0. Deve se ter em mente que é um conceito onde humanos, máquinas e processos estão interligados. Portanto, os obstáculos e barreiras devem ser eliminados e superados pelas empresas para ter sucesso no novo cenário.

A inovação é impulsionada por pessoas, que tenha criatividade, inteligência e relações interpessoais, até porque as máquinas não substituem a capacidade humana de criar soluções, de inovar, de se reinventar. Nesse sentido, através do estudo apresentado abre-se possibilidade para trabalhos futuros, visto que ainda não há fábricas operando 100% no formato 4.0. Quando iniciarem as implantações muitos trabalhos de automação, simulação, integração de sistemas e desenvolvimento de software surgirão. Vale ressaltar que existe a possibilidade de mais três trabalhos futuros voltados para a relação da indústria 4 com: o meio ambiente; a qualificação dos trabalhadores e a sociedade.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTA, M. *De olho na história*. Disponível em: <<https://de-olho-na-historia9.webnode.com/>>. Acesso em: 11 fev. 2022.
- ADBI. *Agenda brasileira para a Indústria 4.0*. Ministério Da Indústria, Comércio e Serviços. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2021.
- ALVES, R. *A importância de se investir em tecnologia e inovação*. Revista Brasil Mineral. Ano XXXV, n.387, p.20-21. fev. 2019.
- ALMEIDA, P. R. *O Brasil e a nanotecnologia: rumo à quarta revolução industrial*. 2005. Espaço Acadêmico, Maringá, a. VI, n. 52, set. 2005.
- Bąk P., Sukiennik M., Kowal B. *Kultura korporacyjna w aspekcie procesów zarządczych w polskich przedsiębiorstwach wydobywczych*. Inżynieria Mineralna Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 17(2), pp. 135–144
- BARDALL, E. O. *Indústria 4.0: estudo da aplicação em centros de distribuição*. Brasil Escola, 2017. Disponível em: <<https://m.monografias.brasilecola.uol.com.br/amp/engenharia/industria-40-aplicacao-logistica.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- Boston Consulting Group. *Value creation in mining 2019: Return to Strategy*. 2019.
- BAYER, P. *A importância da inovação*. Disponível em: <<https://www.bayer.com/pt/pt/inovacao/a-importancia-da-inovacao>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- CALOI, L. *O papel do data center na Indústria 4.0*. Disponível em: <http://ecommercenews.com.br/artigos/dicas-artigos/o-papel-do-data-center-na-industria-4-0>. Acesso em: 01 de nov. 2021.
- CARVALHO, F. *A indústria 4.0*. Disponível em: A Indústria 4.0 (faacconsultoria.com.br). Acesso em: 10 de fev. 2022
- CNI. *Confederação Nacional da Indústria*. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br>>. Acesso em 02 jun. 2021.
- CARDOSO, M. O. *Indústria 4.0: a quarta revolução industrial*. Monografia de Especialização, Universidade Federal Do Paraná, 2016. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17086/1/CT_CEAUT_2015_08.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.
- CAVALCANTE, I. M. *Indústria 4.0 e suas perspectivas futuras para o brasil: Uma revisão sistemática da Literatura*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Da Paraíba, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15737/1/IMC17092019.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- COBBOS, M. *O que é computação em nuvem e como ela está inserida na indústria*. Disponível em: Acesso em: 20 mai. 2019.
- COELHO, P. M. N. *Rumo à Indústria*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e gestão Industrial, Universidade de Coimbra. Disponível em:

<<https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%c3%a0%20Industria%204.0.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

DATHEIN, R. *Inovação e Revoluções industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX*. Publicações DECON Textos Didáticos 02/2003. DECON/UFRGS, Porto Alegre, fevereiro 2003.

DELOITTE. A industria-4.0-estudo-da-deloitte.html. Industry 4.0 Challanges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. 2017 Accessory em 09 de novembro de 2018.

DOMBROWSKI, U.; WAGNER, T. *Mental strain as fiel of action in the 4th industrial revolutions*. Variety Management in Manufacturing Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 17, 100-105. 2014. Acesso em 18 jan. 2021.

DRATH, R.; HORCH, A. *Industrie 4.0: Hit or hype?* IEEE industrial electronics magazine, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

ETZKOWITZ, H. Hélice tríplice: universidade-indústria-governo: inovação em ação. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2009.

GE 21 incorpora tecnologias 4.0 ao mundo das Geociências. Revista Brasil Mineral. Ano XXXVI, n.394, p.18-20. set. 2019.

Ghobakhloo, M. *Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability*. Kaunas University of Technology, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338204494_Industry_40_Digitization_and_Opportunities_for_Sustainability>. Acesso em 10 dez. 2021.

GLOBAL RUS TRADE. *Quadro de PLC*. Disponível em: <https://globalrustrade.com/pt/products/programmable-logic-controller-plc-panel/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

GOLDBERG, S. *Setor de mineração traça estratégias para a retomada*. Valor Econômico. 09 de set. de 2019. Disponível em: Acesso em 10 de set. de 2021.

GOMES, G. P.; SANTOS, W. P.; CAMPOS, P. S. *Indústria 4.0: um novo conceito de gerenciamento nas indústrias*. Centro Universitário do Norte, 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_industria_4.0_-_revisao_em_29.11.2018.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2021.

HARADA, E. *Indústria 4.0: entenda quais são as tecnologias e os impactos da Quarta Revolução Industrial*. Profissionais de TI. Disponível em: <<https://www.profissionaisiti.com.br/industria-4-0-entenda-quais-sao-as-tecnologias-e-os-impactos-da-quarta-revolucaoindustrial/>>. Acesso em 20 dez. 2021

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review*. Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 49., 2016, Estados Unidos. Proceedings... Washington, DC: IEEE Computer Society, p. 3928– 393, 2016.

Hyder, Z.; Siau, K.; Nah, F. *Use of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Autonomous*. Missouri University of Science and Technology, 2018. Disponível em: <http://aisel.aisnet.org/mwais2018/43>. Acesso em: 30 nov. 2021.

GOVERNO DO BRASIL. *Industria 4.0*. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em 16 março 2021.

KAGERMANN, H. *Change Through Digitization - Value Creation in the Age of Industry 4.0. Management of Permanent Change*, p.23-45, 2014.

KLAUS, SCHWAB. *Começou a 4ª revolução industrial*, 2017 Disponível em: <http://www.revistahsm.com.br/inovacao/comecou-4a-revolucao-industrial/> Acesso em 25 de setembro de 2021.

KLEIN, P. *The frontier of analytics and artificial intelligence*. In: DELOITTE. *Tracking the trends 2019: The top 10 issues transforming the future of mining*. p.10-15. 2018.

Lazonick, W. *The innovative firm*. INSEAD and University of Massachusetts Lowell, 2003.

LIAO, Yongxin et al. *Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal*. *International Journal of Production Research*, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017

MAGNUS, T. *Indústria 4.0 no Brasil: quais os impactos para as empresas*, 2018. Disponível em: Acesso em: 12 Jun. 2021.

MARK, S.; FELIX, H. *The fourth industrial revolution: Responding to the Impact of Artificial Intelligence on Business*. Palgrave Macmillan, 2018

MASCARENHAS, S. A. *Metodologia científica*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

MOREIRA, L. D. *Indústria 4.0: estudo da cadeia produtiva da madeira no Paraná*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8493/1/ct_getic_2016_5.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

MÜLLER, J.M.; Kiel, D.; Voigt, K.-I. *What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability*. *Sustainability* 2018, 10, 247.

OLIVEIRA, T. F.; SIMÕES, W.L. *A indústria 4.0 e a produção no contexto dos estudantes da engenharia*. Simpósio de Engenharia de Produção.

ORTEGA, J. *Entenda o que é a quarta revolução industrial*. Disponível em: <https://www.startse.com/noticia/nova-economia/industria-4-0-entenda-o-que-e-quarta-revolucao-industrial?_escaped_fragment_>. Acesso em 23 dez. 2021.

O'Sullivan, M., 2000b, *The Innovative Enterprise and Corporate Governance*, *Cambridge Journal of Economics*, 24, 4: 393-416.

PENROSE, E. *The Theory of the Growth of the Firm, third edition*, Oxford University, 1995. Press [first published in 1959].

PIETROBELLIA, C.; MARINB, A; OLIVARI, J. *Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America*. Disponível em: https://ficpubs.uai.cl/files/920_Pietrobelli_et al2018.pdf. Acesso em: 16/12/2021.

REIS, A. *Indústria 4.0 no Brasil: Oportunidades, Perspectiva e desafios*. Firjan SENAI, 2019. Disponível em: <[estudo Indústria 4.0 no Brasil oportunidades_ perspectivas e desafios.pdf](#)>. Acesso em: 27 jan. 2021.

ROSIN, F.;PELLERIN, R.; LAMOURI, S. *Impacts of Industry 4.0 technologies*. *International Journal of Production Research*, October 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336450542>. Acesso em 01 dez. 2021.

ROTHROCK, R.; KAPLAN, J.; OORD, F. *The Board's Role in Managing Cybersecurity Risks*. In: MIT Sloan Management Review Special Collection: Cybersecurity Takes Center Stage. p.1-4, 2019.

SACOMANO, J. B.; SÁTYRO, W. C. *Indústria 4.0: conceitos fundamentais*. São Paulo: Blusher, 2018.

SILVEIRA, C. B. *O que é indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo*, 2017. Disponível em: Acesso em: 12 Jun 2021.

SRIRAMOJU, S. B. *Review on Big Data and Mining Algorithm*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Shoban-Sriramoju/publication/321155155_Review_on_Big_Data_and_Mining_Algorithm/links/5a1140790f7e9bd1b2bf3e85/Review-on-Big-Data-and-Mining-Algorithm.pdf>. Acesso em: 16/12/2021.

STHEFANINI, G. *Afinal, qual será o futuro da indústria 4.0*. Disponível em: <<https://stefanini.com/pt-br/trends/artigos/futuro-da-industria-4-0>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

SCHNEIDER, G. *O uso das ferramentas da indústria 4.0 no desempenho do processo de desenvolvimento de produtos: indústria de elétrico e eletrônicos no Paraná*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Do Paraná, 2019. Disponível em: <<https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=58300&idprograma=40001016070P1&anobase=2019&idtc=5>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SMITH, A. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. 1776 Lazonick, W., 2002b, "Innovative Enterprise, The Theory of", em M. Warner, ed., Enciclopédia Internacional de Negócios e Gestão, segunda edição, Thomson Aprendizagem: 3055-76.

STOCK, T.; SELIGER, G. *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0*. Institute of Machine Tools and Factory Management, Technische Universität Berlin. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711600144X>>. Acesso em: 16 dez. 2021.

VITALLI, R. *Os 10 pilares de indústria 4.0. IND4.0*, 2018. Disponível em: <<http://www.industria40.ind.br/artigo/16751-os-10-pilares-de-industria-40.amp>>. Acesso em: 16 jan. 2021.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S.P. *Industry 4.0 – A Glimpse*. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300672>>. Acesso em: 17/12/2021.

XVIII MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, PÓS GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO – UCS, 2018. *Indústria 4.0: Mudanças e Perspectiva*. Disponível em: <<http://ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucsppga/xviiimostrappga/paper/viewFile/5886/2032>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. ENEGEP, 2017. *Etapas para implantação da indústria 4.0: uma visão sob aspectos estratégicos e operacionais*. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_244_413_33991.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2021.

Walker, J. (2017). *AI in Mining – Mineral Exploration, Autonomous Drills, and More*. Tracking the trends 2017. Retrieved from <https://www.techemergence.com/ai-in-mining-mineral-exploration-autonomous-drills/>

WEBER, A. *Industry 4.0: myths vs. reality*. Assembly Magazine, 2016. Disponível em: Acesso em: 12 mar. de 2017.

YAMADA, V. Y.; MARTINS L. M. *Indústria 4.0: um comparativo da indústria brasileira perante o mundo*. Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa, v. 34, n. especial, 2018.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges*. 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015, p. 2147–2152, 2016.