

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE ECONOMIA  
MONOGRAFIA DE BACHARELADO

# **Indústria 4.0: A transformação digital na cadeia produtiva da indústria mineradora**

Carolina Victor Vicente Ferreira

Matrícula: 113039166

Orientador: Prof. Caetano Christophe Rosado Penna

JUNHO 2020

## RESUMO

Com o objetivo de entender o panorama da indústria 4.0 e as suas principais tecnologias e também de averiguar como essas tecnologias estão influenciando a cadeia produtiva e se estão alterando a produtividade dos processos da cadeia de produção das mineradoras, este trabalho aborda a temática das revoluções industriais e a sua contribuição para o desenvolvimento da humanidade, ao mesmo tempo que procura, por meio da explicação de Schumpeter, identificar como as revoluções *tecnológicas* influenciaram o desenvolvimento econômico das sociedades. Utilizando como procedimento metodológico a pesquisa bibliográfica, foi possível identificar, de acordo com a apresentação das diversas inovações tecnológicas da indústria 4.0, como estas influenciam o setor da mineração e os seus processos produtivos. Verificou-se que a implementação de algumas das inovações tecnológicas quando aplicadas na mineração, promovem maior eficácia na cadeia produtiva, aumento da capacidade de planejamento, bem como diminuição dos custos e riscos em relação a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente.

**Palavras-Chaves:** Indústria 4.0. Indústria Mineradora. Tecnologias. Inovações

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI	Confederação Nacional da Indústria
COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
EFVM	Estrada de Ferro Vitória-Minas
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
MEI	Mobilização Empresarial pela Inovação
SAMITRI	Sociedade Anônima de Mineração Trindade
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro "Iron and Coal" de 1855-60 (óleo sobre tela por William Bell Scott)..	25
Figura 2 – Mina subterrânea New Ravenswood, Queensland, Austrália, em 1905.....	29
Figura 3 - A Big Hog, uma carregadeira cuja pá tinha o tamanho de uma garagem para dois carros (por Michael IBNA).....	32
Figura 4 – Os 4 períodos da Revolução Industrial .....	34
Figura 5 – Fluxograma de tratamento de minério.....	42
Figura 6 – <i>Machine Learning</i> e o valor gerado na cadeia produtiva da mineração .....	53
Figura 7 – Temas Digitais e Iniciativas em Mineração e Metais .....	72
Figura 8 – Valor cumulativo em jogo pela digitalização em mineração e metais (2016-2025) .....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Indicadores da exportação de minério de ferro entre 2009 e 2019 .....	40
---	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Revoluções Tecnológicas .....	19
Quadro 2 – Percepção das empresas consultadas quanto a difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na mineração em 2027 .....	47
Quadro 3 – Sínteses dos Resultados.....	73

## ÍNDICE

INTRODUÇÃO .....	8
<b>CAPÍTULO I – OS FUNDAMENTOS NA ECONOMIA DA TECNOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
I.1    A economia da tecnologia e da inovação no pensamento de Schumpeter e dos Neo-Schumpeterianos.....	11
I. 2    Revoluções tecnológicas .....	16
<b>CAPÍTULO II – A INDÚSTRIA 4.0 .....</b>	<b>22</b>
II.1    Conceito e contexto.....	22
II.1.1    Primeira revolução industrial .....	23
II.1.2    Segunda revolução industrial .....	26
II.1.3    Terceira revolução industrial.....	29
II.1.4    A Indústria 4.0 .....	31
<b>CAPÍTULO III – INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO.....</b>	<b>36</b>
III.1.    Indústria brasileira de mineração .....	38
III.2    A cadeia produtiva na mineração .....	40
<b>CAPÍTULO IV – INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SEUS CASOS DE USO NO SETOR DE MINERAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
IV.1.    Aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 utilizáveis setor na mineração ....	46
IV.1.1    Inteligência artificial e <i>Machine Learning</i> .....	49
IV.1.2    Big Data e Advanced Analytics .....	54
IV.1.3    Blockchain.....	57
IV.1.4    Internet das Coisas (IoT) .....	60
IV.1.5    Produção Inteligente e redes de comunicação .....	63
IV.1.6    Nanotecnologia, Biotecnologia e Materiais Avançados.....	67

IV.1.7	Novas tecnologias de armazenamento de energia.....	70
IV.2	O potencial valor das novas tecnologias.....	71
CONCLUSÕES .....		75
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>77</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de Indústria 4.0 é uma tendência em discussão que conecta máquinas, sistemas e redes inteligentes aos processos de produção, armazenamento e distribuição das empresas.

A indústria de mineração está dentro desse panorama e busca através dessas novas tecnologias melhorar a produtividade das operações existentes. A incorporação de sensores viabiliza as empresas de mineração produzirem grandes quantidades de dados e extrair dados relevantes sobre máquinas, processos e corpos de minério.

Tarefas complexas de mineração como geomodelagem, agendamento diário e manutenção preditiva são cada vez mais tratadas por pacotes de *software* de análise inteligente. Implantação de máquinas controladas remotamente, como veículos aéreos não tripulados (VANT), veículos subterrâneos com tecnologias de varredura a laser são adotados em maior escala. Através da compreensão da base de recursos e integração das informações geológicas em um banco de dados universal permite-se a otimização das operações de perfuração e detonação, planos de mineração mais efetivos e prevenção de problemas de qualidade de recursos.

A pesquisa aborda a questão de como a adoção de tais tecnologias podem causar uma mudança na forma de que mineração é feita e como isso influencia em sua produtividade. Apresenta-se a forma como o processo de uma mineradora é realizado e quais são as tecnologias da indústria 4.0 que são consideradas mais promissoras em termos de produtividade para a mineração.

As tecnologias e transformações digitais são temas responsáveis por mudanças de paradigmas. As empresas estão vivendo um momento aonde surgem grandes oportunidades de criação e captura de valor. Dentro da indústria de mineração e metais, a digitalização tem o potencial de modificar processos da exploração de vendas a distribuição (WEF, 2017), revolucionando linhas tradicionais da indústria e modelos de negócios do passado.

O objetivo geral da pesquisa é entender o panorama da indústria 4.0, suas principais tecnologias e implementações.

Já em relação ao objetivo específico, a pesquisa propõe-se averiguar como essas tecnologias estão influenciando a cadeia produtiva e se estão alterando a produtividade dos processos da cadeia de produção das mineradoras.

A justificativa para a abordagem deste tema remete para o fato de que a mineração é um dos maiores contribuintes para o desenvolvimento econômico e humano. No entanto, o setor está passando por desafios significativos de mercado, como competição internacional, limites técnicos economias de escala e queda de preços das commodities. Além disso suas taxas de reposição de minério estão em declínio e os tempos de desenvolvimento de minas novas estão aumentando (TRM,2019). O potencial para enfrentar os desafios da mineração chega ao alcance do setor por meio de inovações digitais e tecnológicas que podem transformar os principais aspectos da mineração (WEF, 2017).

Apesar de ser um debate acadêmico e técnico relativamente novo, a questão da indústria 4.0 no setor de mineração possui uma quantidade de artigos científicos e revistas técnicas significativas, de âmbito nacional e internacional. Há também publicações associadas a grandes projetos de pesquisa, como o *Indústria 2027*, iniciativa da Confederação Nacional da Indústria (CNI) e da Mobilização Empresarial pela Inovação (MEI) com apoio de universidades como UFRJ e Unicamp.

Considerando que a característica implícita a uma ciência está ligada a utilização de métodos científicos, pelo que “não há ciência sem o emprego de métodos científicos” (LAKATOS; MARCONI, 2003, p. 83), apresentam-se aqui os procedimentos metodológicos adotados.

Assim, o método de procedimento utilizado é o histórico, uma vez que são investigados processos e acontecimentos anteriores, procurando verificar qual a sua influência no momento atual.

Considerando ainda que as metodologias de pesquisa se dividem quanto aos meios e quanto aos fins, já que os trabalhos científicos devem obedecer a normas pré-estabelecidas e de acordo com os fins a que se destinam, adotou-se a pesquisa exploratória, já que esta tem como principal finalidade esclarecer ou “proporcionar uma

visão geral, de tipo aproximativo acerca de determinado fenômeno” (MOREIRA; CALEFFE, 2008, p. 69).

Por sua vez, quanto aos meios, esta pesquisa se classifica em pesquisa bibliográfica, a qual é composta de fontes secundárias que:

[...] abrange toda a bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, etc., até meios de comunicação orais: rádio, gravações em fita magnética e audiovisuais: filmes e televisão (LAKATOS; MARCONI, 2003, p. 183).

Ou seja, a informação que permite fundamentar teoricamente a pesquisa encontra-se disponível ao público em diferentes plataformas, sobretudo na internet.

Em relação à forma como a monografia se encontra organizada, a estrutura está dividida em capítulos, onde o primeiro capítulo aborda remete para os fundamentos da economia na tecnologia. O segundo capítulo, a questão da indústria 4.0 e revisão das principais revoluções industriais, enquanto que o capítulo três aborda o setor de mineração no contexto brasileiro e e a forma como a indústria 4.0 impacta essa importante atividade econômica. No capítulo quatro, são apresentadas os principais clusters e casos de uso. Ao final, são apresentadas ainda breves conclusões do estudo e as referências bibliográficas consultadas.

## CAPÍTULO I – OS FUNDAMENTOS NA ECONOMIA DA TECNOLOGIA

### I. 1 A economia da tecnologia e da inovação no pensamento de Schumpeter e dos Neo-Schumpeterianos

De uma forma geral, as teorias que abordam a questão das determinantes do desenvolvimento econômico acabam por colocar alguma ênfase na importância da inovação tecnológica como um fundamento da promoção do desenvolvimento sustentável de uma nação, no longo prazo. É Joseph Schumpeter que, na sua “Teoria do Desenvolvimento Econômico”, em 1912 (SCHUMPETER, 1912) indica a inovação tecnológica como um motor econômico, que permite gerar novos meios e formas de produção, permitindo assim que a economia se desenvolva.

As teorias de Schumpeter são uma contribuição no sentido de entender as questões sobre o desenvolvimento, já que o autor é considerado de grande relevância na temática da inovação tecnológica, ao atribuí-la ao desenvolvimento econômico (COSTA, 2006).

Antes de Schumpeter, já Adam Smith ou Karl Marx haviam mencionado e dado importância a processos geradores de aumento da produtividade como é o caso da divisão do trabalho no caso de Smith, bem como a constante revolução da base técnica do capitalismo, tal como defendia Marx.

Schumpeter viria a herdar de Marx essa noção de dinamismo do processo de desenvolvimento, ainda que se posicionasse de forma contrária em muitos outros pontos defendidos por Marx. Na prática, o que Schumpeter visava era dar uma explicação para o caráter geral do desenvolvimento e, por meio desta, analisar o desenvolvimento tecnológico voltado à produção, caracterizar o processo produtivo como um conjunto de elementos, no nível imaterial e material (MORICOCCHI; GONÇALVES, 1994).

No entendimento de Schumpeter (1997) e demonstrado nas suas teorias, existe a necessidade de introduzir inovação, ou seja, mudar a função produtiva

visando romper com o fluxo circular da renda e do estado de equilíbrio, significando por isso que o desenvolvimento não se encontra presente neste cenário estático.

Schumpeter (1997) explica que o desenvolvimento, na forma como é entendido, é um fenômeno distinto e completamente estranho àquilo que é possível observar na tendência para o equilíbrio ou no fluxo circular. É algo espontâneo e descontínuo nos canais do fluxo, na perturbação do equilíbrio e que vai sempre sendo alterado e deslocado para o estado de equilíbrio que já existe.

O que Schumpeter procura entender, na perspectiva de Neutzling e Pedrozo (2009), são os motivos que geram crises no modelo econômico, uma vez que estas poderiam ser resolvidas no longo prazo, tal como preconiza o modelo clássico. Schumpeter acreditava que era através de mudanças contínuas no modelo produtivo utilizado, que o processo de desenvolvimento econômico acontecia. Na sua concepção, existiam ciclos econômicos finitos, ou seja, sempre que ocorria uma crise no sistema econômico, a forma como este era ultrapassado era por meio da inovação e da quebra do modelo produtivo utilizado até então.

Neutzling e Pedroso (2009, p. 3) observam que:

Schumpeter afirmava que os processos inovadores surgiam em função das crises, pelo fato de ser criada a necessidade de se introduzir novas combinações de fatores produtivos, para poder alavancar o crescimento econômico. Os responsáveis por estas inovações seriam os empresários empreendedores que tornavam viáveis as transformações do meio produtivo. No entanto, estas inovações geravam uma desordem que, inicialmente instaurada, obrigava a que outros empresários se adequassem, de acordo com estes novos parâmetros, ocorrendo assim uma organização que, aos poucos, ia se transformando em ordem novamente.

Costa (2006) explica que Schumpeter, quando falando em inovação, apresenta dois argumentos considerados muito importantes: os lucros de

monopólio e a destruição criadora. Os lucros de monopólio são apresentados como ganhos excepcionais por meio da inovação, até que sejam copiados por outros, diminuindo assim o excedente até ser encontrado novo estado de equilíbrio. Por sua vez, a destruição criadora remete para a busca incessante por algo novo, procurando estabelecer novas regras e rompendo com as antigas, buscando a lucratividade.

O que Schumpeter defendia era que o processo de instabilidade e incerteza são características da dinâmica do capitalismo. A ideia de destruição criadora era o exemplo de como após a destruição, seria instaurado o novo, uma lógica de prosperidade capitalista. McCraw (2012, p. 18) explica a ideia de Schumpeter afirmando:

Ele descrevia o capitalismo da maneira como a maioria das pessoas o vivencia: desejos de consumos insuflados pelo constante martelar da propaganda; violentos solavancos para cima e para baixo na ordem social; metas alcançadas, destroçadas, revistas e novamente alcançadas, num infindável processo de tentativa e erro. Para o capitalismo, e para o próprio Schumpeter, em caráter pessoal, nada podia ser considerado estável. Sabia que a destruição criativa fomenta o crescimento econômico mas também solapa preciosos valores humanos. Entendia que a pobreza causa sofrimento, mas também que a prosperidade não garante a paz de espírito.

Significa, portanto que a destruição da ordem econômica existente decorre da introdução de novos bens no mercado, pela criação de novas formas de organização e pela utilização de novos materiais. O processo de destruição criadora é essencial no capitalismo, já que a inovação permite revelar novas tecnologias e estabelecer novos padrões de consumo e, por outro lado, enterra as tecnologias anteriores e também as organizações que não se mostram capacidade de seguir em frente (SCHUMPETER, 1984).

As inovações transformadoras “disruptivas” não podem ser previstas, ainda assim e segundo Schumpeter, essas inovações que são originadas no próprio

sistema e não exógenas, tal como na teoria Neoclássica, uma vez introduzidas na atividade econômica, acabam por produzir alterações que são, em termos de qualidade, diferentes daqueles que acontecem no dia-a-dia e que levam a romper o equilíbrio que foi conseguido no fluxo circular. Nesse sentido, a evolução econômica é caracterizada por descontinuidades e por rupturas com a situação que existe no presente e que são o resultado da introdução de novidades na forma como o sistema funciona (COSTA, 2006).

A inovação resulta da introdução de novos bens ou técnicas de produção, bem como do surgimento de novos mercados e da oferta de matérias primas. Ao mencionar a teoria de Schumpeter, Neutzling e Pedrozo (2009) apresentam cinco tipos de inovação originalmente identificados por Schumpeter, a saber:

- a) a introdução de um novo bem;
- b) a introdução de um novo método produtivo;
- c) a abertura de um novo mercado;
- d) a conquista de uma nova fonte de matéria prima; e
- e) o estabelecimento de uma nova organização.

Verifica-se assim que na teoria elaborada por Schumpeter, existe um papel diferenciado que é atribuído aos agentes econômicos na análise que é feita da inovação no âmbito da firma. O processo de inovação tecnológica, segundo o autor, é feito com base em três períodos de análise, sendo que estes são determinados endogenamente e contêm a fase de invenção, inovação e difusão do processo (KUPFER; HASENCLEVER, 2002).

A inovação surge como base de uma vantagem competitiva no mercado e que provoca mudanças no processo econômico. Apesar dos aspectos que determinam o processo inovativo, é atribuído um papel relevante à lógica econômica em relação à lógica tecnológica e que condiz com a utilização de máquinas tecnológicas (SCHUMPETER, 1997).

Rosenberg (2006) explica que o processo de difusão é feito com base na adequação e no melhoramento das inovações em relação a necessidades específicas, bem como na implementação de insumos que complementem as inovações originais, tornando esse processo muito importante no sentido de disseminar as inovações nos locais tidos como apropriados.

Já em relação ao processo de desenvolvimento no âmbito da produção, o seu início é gerado, quase sempre, por uma alteração econômica e para que essa seja superada, inicia-se o processo de inovação das tecnologias de produção, garantindo dessa forma a reativação do sistema econômico (SCHUMPETER, 1997).

Ainda em relação à importância das inovações tecnológicas, existe outro aspecto bastante relevante na teoria schumpeteriana, mencionada por Moricochi e Gonçalves (1994), que é a importância do crédito nesse processo e que é completamente distinta da teoria clássica, onde o crédito e a moeda não eram consideradas variáveis influenciados da economia. Schumpeter evidencia que o capital investido em inovações tecnológicas (o crédito) é fundamental para o processo de “destruição criadora”.

Num segundo período da sua teoria, Schumpeter apresenta a importância do empresário inovador mas não só. É dado destaque à escala industrial que a grande empresa cria, na promulgação da inovação. O autor considera que o porte das empresas se reflete de uma forma direta, no grau de competição que ocorre entre elas. No conceito de grandes empresas do autor, fica claro que, em determinado mercado, quanto maior for a capacidade de inovar e de resistir, em relação às pequenas empresas, maior será o ritmo na introdução das inovações (SCHUMPETER, 1961).

As inovações são meios para quebrar paradigmas, de resolver crises utilizando novos métodos, novos produtos e serviços, proporcionando ao sistema econômico a possibilidade de efetuar revoluções benéficas. Segundo Schumpeter (1988) são necessários alguns elementos que, bem administrados, proporcionam o desenvolvimento de uma nação e apresenta dois fatores para que tal aconteça.



Um primeiro fato é o empresário inovador ou empreendedor, aquele que cria inovação, que é responsável por destruir a existente ordem econômica, que não está limitado por uma hierarquia ou classe social da empresa, que assume os riscos e busca novas oportunidades, criando assim novos mercados; o segundo fato são os agentes difusores, a abundância de capital e cujo objetivo é proporcionar condições de demanda aos serviços ou aos produtos inovados (SCHUMPETER, 1988).

Rosenberg (2006) explica que a introdução das inovações vem sempre atrelada à ideia do aprendizado tecnológico, que se adquire por meio do processo de destruição criadora. Esse processo de aprendizado baseado nas inovações, surge vinculado à atividade de pesquisar e ao desenvolvimento que consiste na procura e na descoberta das características de projeto de um produto que sejam ótimas. Daí que é extremamente importante saber quais as combinações de características dos produtos que são utilizados no mercado, visando aperfeiçoar a produtividade. Existe neste processo uma relação com a ciência, que vai determinando o ritmo do progresso técnico.

Verifica-se assim que, no âmbito da temática deste trabalho as inovações tecnológicas estão fortemente ligadas ao desenvolvimento econômico e à dinâmica de mercado, uma vez que a introdução de novas tecnologias permite melhorias nos processos produtivos, nas estruturas organizacionais das empresas dos mais diversos setores de atividade, tornando as indústrias mais competitivas e, aspecto importante na sociedade atual, com maior sustentabilidade.

### **I. 1.2 Revoluções tecnológicas**

A análise das revoluções industriais geralmente apresentadas remete para a apresentação das épocas em que as mesmas ocorrem, relacionando-as com períodos econômicos e seus reflexos na sociedade e no tecido industrial. Na análise de Perez, as revoluções industriais são apresentadas de uma forma mais aprofundada e acadêmica e sempre relacionadas com descobertas importantes,

que vão gerando novas oportunidades, novos contextos econômicos e que se refletem no mercado e nas indústrias.

Segundo Perez (2002), desde o advento da revolução industrial, o sistema econômico capitalista atravessou aquilo que é considerado como as cinco ondas de destruição criadora, decorrentes da emergência e da propagação das revoluções tecnológicas.

Tais evoluções passam por ser o elemento fulcral para a transformação estrutural das economias capitalistas, sendo a base para a criação de empresas, indústrias, setores, produtos e serviços completamente inovadores e que são capazes de definir o padrão de crescimento de um determinado período ou fase na história do desenvolvimento.

Freeman e Louçã (2001) afirmam, a partir destas observações históricas, que as revoluções tecnológicas vão surgindo nos países industrializados, sendo depois absorvidas também nos países menos desenvolvidos. De acordo com esta perspectiva evolucionária, em cada revolução tecnológica assiste-se a uma substituição massiva do conjunto de tecnologias existentes por outras tecnologias superiores, o que ajudam a revitalizar os setores industriais e que se trata, justamente, do processo de *destruição criadora*.

Embora a inovação possa estar no centro da discussão teórica da economia evolucionária sobre o processo de crescimento econômico e de desenvolvimento, inicialmente a teoria e análise de Schumpeter não abordava a origem das inovações ou como estas surgiam a nível microeconômico. No entender de Freeman (2011), os ciclos econômicos estudados por Schumpeter são uma consequência do surgimento dos clusters de inovações mas não existe uma explicação para que esse surgimento seja de forma agrupada em clusters e com tipos particulares de periodicidade. Na análise inicial (talvez superficial) de Schumpeter, o que provoca e induz a inovação, explicando assim a forma como elas se agrupam temporalmente e em determinados setores, decorre do aparecimento de indivíduos especiais (empreendedores), que apresentam uma inteligência e uma energia excepcional. Este tema foi mais aprofundado pelos economistas “Neo-Schumpeterianos”.

Tanto Perez (1983) como Freeman (2011) mencionam a necessidade de, a partir das teorias de Schumpeter, avançar e reconhecer que a função do empresário pode ser desempenhada de diferentes formas, entre as diferentes firmas, tecnologias, países e períodos na história. Ou seja, o contexto histórico-geográfico de onde surgem as inovações tem importância. Daqui surge o conceito de “sistemas nacionais de inovação”, como explica Freeman (1995), incorporando a dimensão institucional ao processo de inovação.

As instituições técnicas e científicas, as infraestruturas, o ambiente social, econômico, cultural servem para explicar o crescimento e a difusão das inovações. A compreensão do avanço tecnológico e da influência que este apresenta sobre o sistema econômico originou uma explicação particular da teoria do desenvolvimento e que foi apresentada por Perez (1983) e Freeman (1988), explicando a diversidade de trajetórias de desenvolvimento dos diferentes países, num período histórico, ao associar a dinâmica microeconômica com os padrões de crescimento macroeconômico (NELSON, 2011).

Segundo Perez (2004) o surgimento de um conjunto de indústrias novas, com dinamismo e acompanhadas por infraestruturas novas vai, de forma natural, proporcionar efeitos notáveis na estrutura industrial e nas direções preferenciais do investimento. As novas possibilidades de investimento que se abrem, bem como os seus requerimentos, acabam por provocar uma transformação clara na forma de executar as coisas em toda a economia.

Assim, cada revolução tecnológica provoca uma mudança de paradigma tecnoeconômico (PEREZ, 2004) definido como um modelo de ótimas práticas, que se constitui por um conjunto de princípios tecnológicos e de organização, genéricos e gerais e que indicia qual a forma mais efetiva e adequada de utilizar a revolução tecnológica que ocorre no momento e aplica-la para a modernização e rejuvenescimento da economia. Uma vez que os novos princípios tecnológicos e organizacionais estejam assimilados e generalizados, então eles se convertem em senso comum, isto é, um novo paradigma tecnoeconômico, no desenrolar de qualquer atividade da organização, bem como para a sua reestruturação (PEREZ, 2004).

Proporcionando um contexto histórico, Perez e Freeman (1988) explicam a existência de cinco revoluções tecnológicas, que são instituídas a partir de valiosas descobertas e de inovações tecnológicas, que acabam originando um novo universo de oportunidades para novos investimentos e permitindo o surgimento de novas indústrias dentro do sistema econômico.

Perez (2004) apresenta um resumo das cinco revoluções tecnológicas que mudaram paradigmas na economia.

**Quadro 1 – Revoluções Tecnológicas**

<b>Revolução Tecnológica (Data de Início)</b>	<b>Nome da Época</b>	<b>País originário</b>	<b>Inovações</b>	<b>Infraestruturas novas ou redefinição</b>
<i>Primeira (1771)</i>	Revolução Industrial	Inglaterra	Abertura fábrica algodão	Canais e vias fluviais, energia hidráulica
<i>Segunda (1829)</i>	Era das ferrovias e vapor	Inglaterra, Europa e EUA	Prova do motor a vapor para rodovia	Ferrovias, telegrafo, gás urbano, grandes navios de navegação mundial, grandes depósitos
<i>Terceira (1875)</i>	Era da eletricidade, aço e engenharia pesada	Alemanha, EUA	Inauguração fábrica de aço	Navegação mundial em velozes barcos de ali, redes transnacionais de ferrovias, grandes túneis e pontes, redes elétricas, telefones
<i>Quarta (1908)</i>	Era do petróleo, automóvel e produção em massa	EUA e Alemanha (Europa)	Saída do primeiro modelo T da fábrica da Ford	Portos, aeroportos e autopistas, redes de oleodutos, telecomunicação analógica mundial, eletricidade de plena cobertura, incluindo domicílios
<i>Quinta (1971)</i>	Era da informática e telecomunicações	EUA (Europa e Ásia)	Anúncio do microprocessador Intel	Comunicação digital mundial ,utilização de fibra ótica, satélite e rádio, internet, redes elétricas de fontes múltiplas, transportes de elevada velocidade

Fonte: Perez (2004)

Efetuando a distinção entre uma revolução tecnológica e uma coleção aleatória de sistemas tecnológicos pode afirmar-se que uma revolução tem por base duas características centrais e que são recorrentes no processo histórico. São elas

“a forte interconectividade e interdependência dos sistemas, tecnologias e mercados e a grande capacidade em transformar profundamente toda a economia e, eventualmente, a sociedade” (PEREZ, 2010, p. 189).

Nesta situação, a quebra de paradigmas acaba por servir como um fator de impulso da difusão das tecnologias, já que apresenta um modelo que todos podem seguir e adotar. No entender de Perez (2004) as Revoluções Tecnológicas apresentam quatro fases, que articulam o capital produtivo com o capital financeiro. A primeira fase é composta pela gestação da nova tecnologia, um período experimental onde as novidades vão surgindo e é gerado um crescimento repentino associado a essa nova tecnologia. A segunda fase corresponde à expansão da tecnologia em diversos produtos novos e indústrias, à qual é dado o nome de constelação completa. Por sua vez, a terceira fase relaciona-se com a exaustão da expansão, onde a tecnologia atinge o seu potencial, atingindo todos os mercados possíveis. A quarta e última fase, que implica a maturidade da produção, reflete também a saturação do mercado consumidor e nos últimos produtos que são lançados por essa revolução tecnológica.

A relação temporal com os paradigmas gerados pelas mudanças refletem as mudanças ao longo do tempo. Segundo Perez (2004) a questão temporal é colocada de forma a gerar surtos de desenvolvimento através do grau de difusão das tecnologias do novo paradigma resultantes da revolução tecnológica. Este aspecto está relacionado com o fato de que o paradigma está em construção e como tal, existe uma ruptura com as tecnologias existentes e o surgimento de novas funções na sociedade em questão. O ponto inicial do surto é também chamado de *big bang*, representando a explosão da nova tecnologia que vinha sendo criada e é iniciada a difusão do novo conhecimento. O surto é dividido por dois momentos principais: o período de instalação e o período de desdobramento.

O período inicial pode ainda ser subdividido em irrupção (momento em que a Revolução Tecnológica tem o seu início e onde existe elevado grau de desemprego e declínio da indústria dominante, havendo por isso uma relação forte entre a situação econômica existente e o início de um novo paradigma); e frenesi, representado pela acelerada expansão de crescimento relacionado com a nova

tecnologia. O segundo período é composto pela sinergia e pela maturidade. Enquanto que na sinergia, o crescimento econômico corresponde aos investimentos que são efetuados e não existe especulação e descolamento, assiste-se também à expansão produtiva e ao aumento de renda; já na maturidade, existe a saturação do mercado e a consolidação das indústrias, com poucos produtos a serem lançados (PEREZ, 2004).

Dizer que a tecnologia evolui por meio de revoluções significa que estas, em função do seu paradigma específico e com as suas inter-relações necessita de uma adaptação social profunda, em relação às suas características, até se converter em algo do senso comum.

Uma vez que a sociedade se encontra em plena quinta revolução, representado pelo período de sinergia, onde as inovações tecnológicas são difundidas de forma rápida e assimiladas por todos os setores industriais, o mesmo acontece com o setor de mineração, onde as tecnologias disruptivas são adotadas numa perspectiva de otimização de processos produtivos e econômicos, aliadas à questão ambiental e de proteção dos recursos humanos.

## CAPÍTULO II – A INDÚSTRIA 4.0

### *II.1 Conceito e contexto*

Atribui-se o termo Indústria 4.0 ao conceito inovador e visionário da quarta revolução industrial, surgido na Alemanha e que resultou de diversas iniciativas estratégicas tomadas pelo governo e cujo objetivo era demonstrar que o país liderava nos aspectos relacionados com as tecnologias industriais, promovendo a tecnologia na manufatura (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

O desenvolvimento de novas tecnologias e processos é orgânico e gradual, daí que em 2006, o governo alemão lança o programa *High Tech Strategy*, um programa que tinha como objetivo levar a Alemanha à liderança no setor de pesquisa e inovação, efetuando enormes investimentos desde 2006 até 2013 (GTAI, 2014). A partir de 2014, esse programa é atualizado, introduzindo a vertente relacionada com a Economia Digital, envolvendo diretrizes especificamente relacionadas com a automação e o gerenciamento de dados. São esses elementos que hoje integram o movimento iniciado em 2006 e ao qual se designou por Indústria 4.0 (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016).

Segundo Almeida (2005), o mundo encontra-se inserido na Quarta Revolução Industrial, que está relacionada com o desenvolvimento de tecnologias nanoestruturadas<sup>1</sup>, envolvendo *big data* e que interfere na transformação da economia. Como tal, essa revolução é marcada pela união e convergência de tecnologias digitais, biológicas e físicas que provocam transformações globais e com uma enorme velocidade.

Este conceito que caracteriza a Indústria 4.0 vem crescendo mais a cada dia e apresenta relevância considerável para os diversos setores de atividade econômica, em especial na indústria, que enfrentam desafios relacionados com o

---

<sup>1</sup> Tecnologias com materiais nanoestruturados, ou seja, materiais com dimensões reduzidas ou na forma de nanopartículas (MACIEL et al., 2003).

aumento da produtividade e com a personalização dos produtos (RODRIGUES; JESUS; SCHUTZER, 2016).

Tendo esses aspectos em mente, e de acordo com Monteiro e Morais (2016), o conjunto de inovações resultantes da Indústria 4.0, apresentam impactos consideráveis no conceito de operações e de processos produtivos. Trata-se de uma revolução caracterizada pela digitalização progressiva e pela interconexão de objetos, modelos de negócio, cadeias de valor, cujo foco é o desenvolvimento inteligente de métodos, processos e produtos.

Mas para que a humanidade chegasse neste ponto de evolução tecnológica, foi necessário ultrapassar algumas fases de desenvolvimento e que começa a contar com o advento da Primeira Revolução Industrial, na Inglaterra.

### **II.1.1 Primeira revolução industrial**

Ocorrida na Inglaterra do século XVIII (1780-1830), a primeira revolução industrial tem por palco um período em que a principal indústria era a têxtil, responsável pelos principais resultados produtivos, não apenas na Inglaterra, mas também em outros países mais desenvolvidos. Tal como explica Conceição (2012) é neste contexto que uma série de inovações veio a transformar a indústria de algodão, modificando o processo produtivo, mais manual e introduzindo o sistema fabril.

É neste período da Primeira Revolução Industrial que as atividades que não estavam vinculadas à alimentação e à produção de alimentos proporcionaram à Inglaterra a hegemonia no contexto internacional, já que se tornou um núcleo dinâmico do processo de industrialização. Tal situação aconteceu em função da transformação da energia em força mecânica, com a utilização das máquinas a vapor e das caldeiras, fazendo com que as indústrias manufatureiras, sobretudo a têxtil e também o setor dos transportes, ganhasse grande desenvolvimento (FADEL; MORAES, 2008).



Segundo Freitas (2017) a invenção do tear mecânico (máquinas de fiar) permitiu a evolução da indústria têxtil, enquanto que as máquinas a vapor contribuíram para o desenvolvimento do setor dos transportes. Até então, o comércio era dinamizado pela tecelagem de lã, mas em uma escala artesanal. Com estas novas tecnologias, a produção de tecido de algodão foi alavancada em função da mecanização da tarefa. Esta mecanização foi depois aplicada em outras áreas de atividade, como a agricultura, a metalurgia, os transportes e outros setores da economia.

Ainda segundo o autor, foi a invenção destas máquinas que proporcionou enorme avanço nas técnicas utilizadas para a fabricação das mercadorias e que resultou no aumento da produção. Além disso, o desenvolvimento da indústria permitiu o surgimento de outras alternativas de trabalho e com isso, o deslocamento de pessoas que trabalhavam no campo, para as cidades.

Almeida (2005) acrescenta que no decorrer deste período, começa a funcionar o telégrafo, unanimemente considerado como o primeiro instrumento de comunicação universal.

A mecanização da produção de produtos diversificados tornou-se extremamente importante para a economia no decorrer deste período, que passaram a laborar com base na máquina a vapor, tais como o papel, o vidro, os tijolos, o couro e o ferro. Neste tipo de produtos, verificou-se igualmente um processo de aumento de velocidade, volume, custo e preço tal como tinha acontecido com os têxteis (DRUCKER; 2000).

Ao apresentar um resumo das principais transformações ocorridas no processo produtivo em função da primeira revolução industrial, Conceição (2012) indica:

- a) a introdução das máquinas, que permite transformar calor em trabalho e com isso, aumentar o fornecimento de energia;
- b) a substituição do trabalho manual e esforço humano, pela trabalho mecanizado; e

- c) a utilização de matérias primas, mais inovadoras e com maior abundância, sobretudo a substituição de substâncias vegetais e animais por minerais.

Figura 1: Quadro "Iron and Coal" de 1855-60 (óleo sobre tela por William Bell Scott)



Fonte: NOTASGEO (2018)

Estes aspectos , segundo Cavalcante e Silva (2011) permitiram aumentar a produtividade das indústrias e o rendimento per capita. É no decorrer deste período que surge o capitalismo, que até então era comercial e que passou a ser industrial. Nesse sentido, a Revolução Industrial veio mudar, de forma considerável, a vida dos indivíduos e da sociedade, uma vez que os seus reflexos se fazem sentir até hoje, influenciando no processo de transformação (CAVALCANTE; SILVA, 2011).

Em relação às novas tecnologias proporcionadas pela revolução industrial, Drucker (2000) considera que a estrada de ferro, foi o aspecto mais revolucionário e aquele que mais transformou a economia, a política e a sociedade, uma vez que pessoas e mercadorias passaram a poder circular com maior facilidade.

No contexto da mineração, as minas de carvão foram aspectos essenciais da Primeira Revolução Industrial, viabilizando inovações que caracterizaram aqueles tempos. As formas de acesso as minas ainda eram viabilizados por força motriz animal. Até o final do século XIX, o método de perfuração das rochas brasileiras

era por meio de ponteiros e marretadas e desmontadas com pólvora caseira. Ao longo do século XIX, foram surgindo tecnologias como a perfuratriz rotativa a vapor projetada pelo inglês Richard Trevithick e perfuratrizes mecânicas, também inglesas, atacavam as rochas com brocas movendo-se como um pistão em um cilindro. (GONZALES; MARCO, 2018)

A máquina a vapor foi introduzida no processo de mineração e modernizou diferentes processos como a retirada da água e materiais das minas de carvão.

Em 1781, a máquina a vapor de Watt permitiu o aumento do tamanho dos fornos impulsionando a produção de ferro fundido. Em 1783, Henry Cort desenvolveu técnicas para a retirada das impurezas e permitiu a produção de ferro com maior rapidez e em larga escala. A máquina ganhou um condensador para minimizar as perdas de calor e passou a ser usada para finalidades diversas, desde a fundição até a propulsão de moinhos, além de continuar operando nas minas de carvão. (GONZALES; MARCO, 2018, p. 36)

Todas estas mudanças e evoluções tecnológicas foram decorrendo, acabando por surgir, em consequência, uma Segunda Revolução Industrial.

## **II.1.2 Segunda revolução industrial**

No final do século XIX, início do século XX, uma onda de inovações e avanços no conhecimento científico provocou uma ruptura tecnológica com a época anterior. As novas tecnologias surgidas no decorrer da Primeira Revolução Industrial foram um fator determinante para o crescimento e modernização da sociedade, que passou a demandar maior envolvimento tecnológico e inovação, promovendo o aparecimento da Segunda Revolução Industrial (BOETTCHER, 2015).

Segundo Silva e Gasparin (2013), na Segunda Revolução Industrial ou Indústria 2.0, a inovação tecnológica apresenta novas características. Descobertas como a eletricidade, a transformação do ferro em aço, o desenvolvimento e modernização de meios de transporte, os avanços ocorridos nas comunicações e o

desenvolvimento da indústria química, por exemplo. Também em destaque neste período está a busca pelo aumento dos lucros, o aumento da produção e a especialização do trabalho (*idem*).

No início do século XX, o engenheiro americano Frederick Taylor é o precursor da utilização de um método de organização mais objetiva do trabalho e que viria a ser conhecido como Taylorismo (RIBEIRO, 2015). Os princípios básicos do taylorismo são a produção em massa, a repartição de tarefas e a separação entre os trabalhos de concepção e execução e também do trabalho individualizado (RIBEIRO; CUNHA, 2005).

Um dos aspectos mais marcantes da Revolução 2.0 é o surgimento do Fordismo, cujo precursor foi Henry Ford, no ano de 1914 e considerado um desenvolvimento do taylorismo. A teoria do fordismo defendia a necessidade de alterar os processos produtivos a partir do momento em que o capitalismo atinge o limite da racionalização do trabalho enquanto elemento isolado. Segundo Thiry-Cherques (2004) era imprescindível que se instalasse uma nova forma de otimizar o trabalho efetuado pelo operário e a forma encontrada por Ford foi a racionalização do processo produtivo com um conjunto.

O Fordismo dá os seus primeiros passos quando a *Ford Motor Company* lança o carro do modelo T, que se tornou um sucesso de mercado e a demanda tornou necessária a reformulação dos métodos de produção que eram aplicados até então. Braverman (1980) indica que o elemento chave dessa nova forma de organizar o trabalho era uma interminável esteira transportadora, onde os componentes do automóvel eram transportados até aos funcionários que executavam operações simples.

Essa foi uma revolução na indústria automotiva, a partir do momento em que Ford criou o processo de semi-automação, introduzindo também a primeira linha de montagem automatizada, utilizando esteiras rolantes. Este modelo aprofundava o princípio de divisão do trabalho: o trabalhador era fixado no seu posto de trabalho e os objetos eram levados até ele, o que diminuía o tempo de produção e o aumento da produtividade através da especialização (FRAGA; 2005).

Acontece uma mudança radical na divisão do trabalho e que coincidiu com a descoberta de novos materiais como o petróleo, o aço, o motor a combustão, a energia elétrica, o telefone, o telégrafo. É também no decorrer deste período que acontece um aprofundar nas várias descobertas científicas e técnicas e onde as inovações em áreas como a biotecnologia, a telemática e a informática deram um impulso para a transformação do padrão trabalhista e produtivo, em termos organizacionais (MORAES; FADEL, 2008).

A segunda revolução industrial destacou-se pelo desenvolvimento da eletricidade, do motor de combustão interna, de produtos químicos com base científica, da fundição eficiente do aço e o início das tecnologias de comunicação (CASTELS, 2006, p. 71)

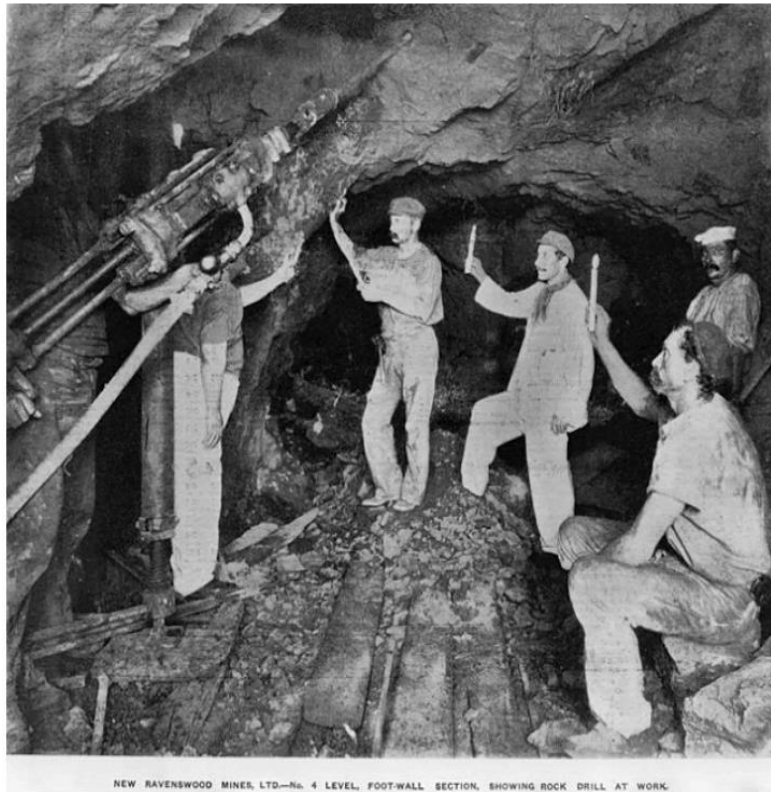
Este crescimento permitiu a aceleração econômica em países como os Estados Unidos, Alemanha, França e Japão que se tornaram economicamente mais desenvolvidos e na liderança tecnológica, a nível mundial.

No panorama da indústria da mineração, em meados do século XIX duas importantes invenções foram criadas. A perfuratriz que se assemelha as de ar comprimido modernas e a dinamite, amplamente utilizada na extração mineral. A partir da década de 1890, foram introduzidos o gás de acetileno e um sistema de faísca usando sílex que tornava as lâmpadas de carbureto fáceis de acender. Na década de 1930, lâmpadas com bateria foram adotadas nas minas, modernizando os sistemas de iluminação. (NOTAS GEO;2018)

Ainda em meados do século XIX, o processo de flotação inicia a sua aderência na mineração. Em 1869, foi patenteado um processo de enriquecimento de minério baseado na aderência das partículas na interface óleo-água. Em 1877, patentearam um processo com todas as características técnicas da flotação moderna. No final do século XIX, foi criada a Stanley Header, primeira carregadeira de carvão. No início do século XX, em 1914, a Joy foi introduzida no mercado e determinaria o padrão das carregadeiras modernas. O surgimento de veículos

elétricos e o uso dos pneus de borracha, assumiriam o papel de transporte do carvão desde as carregadeiras até o elevador da mina. (NOTAS GEO, 2018)

**Figura 2: Mina subterrânea New Ravenswood, Queensland, Austrália, em 1905 (por Queenslander)**



Fonte: NOTASGEO, 2018

O final do século XIX e início do século XX, foram importantes no aspecto de mecanização e produção em massa da mineração.

Grandes desenvolvimentos na área do beneficiamento de minérios, tendo a utilização industrial da flotação, como a inovação mais importante. Em 1900, a primeira correia transportadora foi criada e em 1940 o primeiro equipamento chamado de "*continuous miner*" deu início à era da mineração sem explosivos. A lavra mecanizada desenvolveu-se a partir de 1950 com esses equipamentos substituindo outros métodos principalmente na mineração de carvão. (NOTAS GEO;2018).

Os avanços industriais obtidos na Segunda Revolução foram transferidos e aperfeiçoados na Terceira Revolução Industrial.

### II.1.3 Terceira revolução industrial

Tal como aconteceu com a Revolução Industrial 2.0, a Terceira revolução industrial foi uma consequência do desenvolvimento tecnológico na era anterior, durante o século XX e início do século XXI. A chamada Indústria 3.0 trouxe uma renovação do processo econômico, social e político, exibindo elevada complexidade e grande dinamismo (SILVA et al., 2002).

Como explica Boettcher (2005), perante inovações tecnológicas e enormes descobertas, a Terceira Revolução Industrial é também apelidada de Revolução Técnico-Científica e Informacional, uma vez que esses novos processos de inovação tecnológica envolvem avanços em áreas tão diversas como a informática, as telecomunicações, a robótica, os transportes, a biotecnologia, a química e a nanotecnologia.

Neste período, assiste-se ao impulso no desenvolvimento de circuitos eletrônicos e, posteriormente, os circuitos integrados, mais conhecidos como *microchips*. Estes elementos vieram revolucionar, de forma diferenciada e abrupta, a comunicação e os meios de informação, com a explosão da internet (ALMEIDA, 2005).

O surgimento e desenvolvimento do computador, bem como a sua associação aos meios de comunicação que já existiam, como o telefone e a televisão, veio confirmar a passagem para um estágio mais elevado no que diz respeito à produção de informações e de comunicações (MORAES; FADEL, 2008, p. 2).

A combinação de diferentes componentes específicos em um único circuito possibilitou, segundo Conceição (2012), uma drástica redução nos custos de produção, de armazenamento, no processamento e transmissão de informações, além de uma evidente melhoria no desempenho dos processos produtivos.

Segundo Silva et al. (2002) as características principais da Terceira Revolução Industrial estão associadas à utilização de diferentes fontes de energia, ao uso crescente da informática, ao aumento da consciência ambiental, a mão de obra passa a ser substituída por maquinário cada vez mais moderno, à globalização, ampliação dos direitos trabalhistas, à massificação de produtos tecnológicos e ao surgimento de novas potências industriais.

O desenvolvimento das comunicações por satélite e da informática potenciaram as relações comerciais e o acesso a um número grande de fornecedores. Daí Singer (2004) afirmar que ocorreu o enxugamento de serviços com menor importância e expressão, como os de limpeza, vigilância, fornecimento de refeições, estendendo-se depois a serviços como seguros, contabilidade, seleção de pessoal e os processos produtivos, propriamente ditos.

Com o advento da Indústria 3.0, alguns princípios da teoria fordista foram reformulados, tornando-se parte das antigas estruturas hierárquicas das grandes empresas que os adotaram e onde passam a existir novos métodos de produção, sustentados na microeletrônica e em práticas de trabalho mais flexibilizadas, maior diversidade social e maior individualismo e uma predominância do consumo em relação à produção (CONCEIÇÃO, 2012).

Este novo modelo de gerenciamento dos processos de trabalho veio aumentar a produtividade na indústria automobilística do Japão e começou a ser percebido como um modelo que permitia a adequação a um sistema de produção flexível (FRAGA, 2005), que veio a ser conhecido como Toyotismo.

No cenário da mineração esta vivenciou uma grande mudança com a terceira revolução industrial, quando os computadores e automação chegaram aos sistemas de operação e beneficiamento de minérios. Os sistemas de informação iniciaram a agilizar o processo localização e classificação dos depósitos minerais. O desenvolvimento do banco de dados revitalizou a organização da quantidade crescente de exploração e dados de mineração. (NOTAS GEO;2018). Dois momentos foram de grande importância para demanda dos minerais, o fim da Primeira e Segunda Guerra Mundial. Cobre, ferro, bauxita-alumínio, platina, cromo e titânio estavam associados à aeronáutica, à energia nuclear, à exploração



espacial e aos equipamentos eletrônicos. Após a Segunda Guerra Mundial com o aperfeiçoamento da geoquímica e geofísica, as descobertas de depósitos subterrâneos tornou-se o padrão comparado as descobertas superficiais. (NOTAS GEO, 2018)

**Figura 3: A Big Hog, uma carregadeira cuja pá tinha o tamanho de uma garagem para dois carros (por Michael IBNA)**



Fonte: NOTASGEO (2018)

A utilização dos métodos de geofísica e geoquímica provocou um pico nas taxas de descobertas minerais. Em 1965, nasce o primeiro microscópio eletrônico, o “*Stereoscan*”, gerando grande avanço na metalografia. A partir do século XX diversas inovações foram criadas ou aperfeiçoadas. O aumento da utilização do GPS em campo e análises do ICP – MS no laboratório aumentaram a qualidade e velocidade da obtenção dos dados. O desmonte com *boulder buster*, as câmeras de inspeção, os dutos de polímeros, a geração de modelo 3D através de software para desenvolvimento integrado e para simulação de mineração e perfuratrizes móveis, além de máquinas com controle remoto e sensores de movimento. (NOTAS GEO;2018)

A Internet se tornou a dominante meios para acesso à informação e comunicação. As alterações ocorridas, a intensa modernização, as mudanças sociais econômicas e culturais que foram acontecendo ao longo dos anos, levou a que se continuasse o investimento no desenvolvimento tecnológico.

#### **II.1.4 A Indústria 4.0**

Ao longo dos anos, o processo produtivo passou por inúmeras mudanças tecnológicas, procurando ajustar-se às necessidades de cada revolução industrial. Isso aconteceu com a mecanização do processo produtivo, da utilização do vapor e da água, que ocorreu já no final do século XVIII e que ficou conhecida como a Primeira Revolução Industrial (SIMON, 2013).

Essa evolução passaria depois pelo uso intensivo da energia elétrica, decorrente da sua descoberta e da produção em massa e divisão do trabalho, originada pelas correntes Taylor e Ford. Posteriormente, com a introdução da automação e da digitalização, a Terceira Revolução Industrial se desenvolve, por meio da eletrônica e dos sistemas informáticos, com maior presença a partir dos anos 1970 (KERSTEN, 2014).

A Indústria 4.0 é o resultado das evoluções registradas, em especial da utilização da internet enquanto infraestrutura e no Sistema Ciber-Físico que é interconectado.

A figura 4 permite ter uma ideia global de todo esse processo evolutivo, desde a Primeira Revolução Industrial, até à Indústria 4.0.

Figura 4- Os 4 períodos da Revolução Industrial

			
Primeira máquina a vapor (1784)	Primeira linha de produção (1870)	Primeiro Controlador Lógico Programável (1969)	Interconectividade de Equipamentos
<b>1ª revolução industrial</b> fábricas mecanizadas pela utilização da força da água e do vapor.	<b>2ª revolução industrial</b> introdução da energia elétrica, produção em massa e divisão do trabalho.	<b>3ª revolução industrial</b> uso da eletrônica e T.I. para automatizar a produção.	<b>4ª revolução industrial</b> baseado em sistemas Ciber-físicos.
Final do século 18	Início do século 20	Início dos anos 1970	Hoje

Fonte: Kagermann, 2013

Segundo Schwab (2016), este paradigma da Indústria 4.0 tem vindo a ganhar popularidade traduzindo uma forma de descrever uma tendência da digitalização e da automação do ambiente de manufatura.

Existem inúmeros trabalhos que mencionam a Indústria 4.0 procurando, de alguma forma, conceituar e definir o que tal período representa e significa. Por exemplo, Weiss et al. (2016) indicam que a Indústria 4.0 vislumbra as fábricas inteligentes, onde os seres humanos e os robôs poderão coexistir e trabalhar de uma forma muito próxima.

Por sua vez, Pfohl et al. (2017) define a quarta revolução industrial como um acontecimento cuja tendência tecnológica de digitalização, autonomização, transparência e disponibilidade de informação acontece em tempo real e em colaboração.

O conceito de Indústria 4.0 permite combinar as conquistas tecnológicas ocorridas nos últimos anos, com uma visão de futuro onde convivem sistemas automatizados e de produção inteligente, onde o mundo real está conectado ao mundo virtual e que permite uma utilização mais eficiente da informação que se encontra disponível (ZAWADZKI; ZYWYCKI, 2016).

Segundo Coelho (2016) a indústria 4.0 é constituída por três principais tecnologias:

- a) *internet of things* (IoT) ou internet das coisas, que compreende a integração de objetos virtuais e físicos que são ligados à internet, partindo da tecnologia wireless e que possibilita a comunicação de um objeto para o outro, sem intervenção humana;
- b) *cyber physical systems* ou sistemas ciber-físicos, tal como explica Kagermann (2013), são constituídos por máquinas, por sistemas de armazenagem e de produção, que tem a capacidade de trocar informações e de se manterem controlados, de uma forma autônoma; e
- c) *big data*, como explicam Braga e Gomes (2017) é definido como sendo ativos de informação e que são baseados em 4V's: volume (enorme quantidade de dados que são gerados); variedade, onde existem dados estruturados e não estruturados que são oriundos de e-mails, mídias sociais, sensores e outros; velocidade, que é constituída por um fluxo constante de dados e que necessitam de uma velocidade maior de processamento; e veracidade (onde existem dados que possuem variados níveis de confiança e de incerteza, que exigem técnicas inovadoras que possibilitam perspectivas mais consistentes).

Outra classificação elencada por Schwab (2016) tem a ver com aquilo que o autor denomina de impulsionadores tecnológicos e que são divididas em três categorias: a digital, a física e a biológica, todas elas relacionadas entre si. Enquanto que na categoria física se incluem os veículos autônomos e a impressão em 3D (manufatura aditiva), a robótica avançada e novos materiais, que são mais leves, mais fortes, adaptáveis e recicláveis; já na categoria digital, está inserida a internet das coisas e os sensores. No caso da característica biológica, está incluído o sequenciamento genético e a biologia sintética.

A Indústria 4.0 implica transformações profundas a nível social, político e econômico, com destaque para as alterações nos processos produtivos e na distribuição de bens e serviços, com o desenvolvimento de novos padrões de consumo, com novas necessidades dos clientes, bem como a aplicação de novos modelos de negócio e o inevitável incremento da pesquisa e incremento de tecnologias da informação e de comunicação. Apesar da transição total para a Indústria 4.0 pode demorar até vinte anos, é bem possível que diversos avanços no contexto da Quarta Revolução Industrial aconteçam num período próximo de cinco a dez anos (AMORIM, 2017).

Em resumo, embora as sucessivas revoluções industriais sejam apresentadas por período, em função da época em que ocorrem e vistas como momentos históricos separados e compartimentados, o fato é que todos eles apresentam uma continuidade e evolução em termos de descobertas e utilização das tecnologias e inovações que foram surgindo ao longo dos tempos. Significa que matérias primas, invenções e tecnologias foram sendo descobertas, desenvolvidas e adotadas em sequência e como consequência natural de descobertas e desenvolvimentos anteriores.

Também por isso as inovações e revoluções tecnológicas surgem associadas a momentos importantes, em termos econômicos, com o objetivo de desenvolverem e melhorarem a economia e o mercado, em todas as áreas de produção. Em análise dos principais conceitos referentes a mudanças de paradigmas dos novos ciclos tecnológicos, entende-se que não estamos inseridos em um novo ciclo e sim no processo de consolidação da quinta onda ou revolução das TICS.

### CAPÍTULO III - INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

Segundo Nery (2010) a indústria de mineração é uma das mais importantes áreas para a economia mundial, uma vez que ocupa uma posição primária na cadeia de suprimentos e, em função disso, fornece recursos básicos para uma grande diversidade de produtos. Possui ainda um papel importante a nível social já que atende as necessidades da sociedade no que diz respeito a produtos que são originários do minério, potenciam o desenvolvimento local e regional, geram emprego e renda.

A mineração é uma atividade que não alcança o potencial máximo de seus resultados em curto prazo. Entre a descoberta de uma ocorrência mineral e o início da produção da mina decorre normalmente mais de oito anos, não sendo incomum que depósitos minerais complexos demandem décadas até se tornarem produtivos. Por esta razão, a indústria mineral opera em cenários futuros de longo prazo e depende de regras estáveis para ser bem sucedida e produzir os benefícios econômicos e sociais que dela se exige (NETTO, SANTOS, 2009).

Para Chaves (2002), na atividade mineradora, o objetivo é a descoberta, a lavra e o beneficiamento de minérios. Assim, as atividades que são executadas no processo de mineração são constituídas por:

- a) descoberta dos recursos minerais existentes no subsolo;
- b) transportar os minerais do subsolo até à superfície;
- c) colocação desse bem mineral em condições para poder ser utilizado pelas diferentes indústrias, como a indústria metalúrgica, química e cerâmica.

Adicionalmente, Luz et al. (2004) explicam que:

- a) o mineral é todo o corpo inorgânico de composição química e com propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre;

- b) o minério é toda a rocha que é constituída de mineral ou de um conjunto de minerais, contendo um ou mais minerais valiosos e que são passíveis de serem denominados, economicamente, de minerais-minério. Aquele mineral ou conjunto de minerais de um minério que não são aproveitáveis, é denominado de ganga;
- c) outra denominação utilizada na mineração é o termo estéril, que remete para todo o material sem valor econômico que é extraído para permitir a lavra do mineral útil, o minério (DIAS, 2001).

Além disso, por possuir características especiais que dificultam o aumento da atividade, onde se destaca o fato de que os recursos minerais são finitos e não são renováveis, a necessidade de envolver equipes multidisciplinares para efetuarem a avaliação das reservas, exigindo grandes investimentos de capital e sendo considerado um investimento de risco, havendo a necessidade de estudos de viabilidade econômica, legislações que dificultam o negócio, dentre outros obstáculos (NERY, 2010).

Verifica-se, assim, que os bens minerais são componentes essenciais da maior parte dos produtos que são utilizados na sociedade moderna, executando um papel fundamental, seja em termos econômicos, seja socialmente. Como exemplo que permita entender a sua importância, Araújo (2017) explica que para que a sociedade possa manter o seu padrão de vida, cada brasileiro consome, por ano, mais de 5 toneladas de insumos de origem mineral, ou seja, o padrão de consumo atual é extremamente dependente da atividade mineral e quanto maior for a renda per capita desse país, maior é a dependência em relação a esse setor.

### **III.1 Indústria brasileira de mineração**

Segundo explica Fernandes (2014) o Brasil é uma potência mundial, em termos de exploração e de produção mineral, já que produz 72 substâncias minerais, sendo que dessas 43 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas. O

minério de ferro é aquele que mais se destaca, sobretudo em termos econômicos, já que representa mais de 60% do valor da produção mineral brasileira. No geral, o setor de mineração representou, em 2017, 30% do saldo da balança comercial brasileira (BRASIL, 2018).

Em volume de reservas dos vários tipos de minerais, como o minério de ferro e bauxita, o Brasil é superado apenas pela Austrália (ANM, 2017). No entanto, as reservas brasileiras, além de vultosas, têm características tecnológicas naturais que apresentam vantagem em relação a outros países.

São reservas minerais de classe mundial, que permitem a oferta de produtos minerais e metálicos de alta qualidade e a custos competitivos, como o minério de ferro, o nióbio, ouro, cobre, alumínio, grafita e terras raras. O rico potencial mineral brasileiro é um importante fator de competitividade para o setor de metais e para a siderurgia, a qual se beneficia da qualidade e do custo da carga metálica composta pelo minério de ferro nacional (MESQUITA; MEIRELIS; PEREIRA, 2018, p. 33).

No Brasil, as jazidas são de fácil lavra e possibilitam a produção de grandes volumes a custos baixos. (NETTO, SANTOS, 2009) As reservas brasileiras situam-se, principalmente, no Estado de Minas Gerais e na Serra dos Carajás, no Estado do Pará. Nos anos 40, a siderurgia brasileira começou a se desenvolver chegando a produzir 1 milhão de toneladas em 1947. Com a criação da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) em 1942, a companhia, por acordo e solidariedade para com os aliados da 2ª Grande Guerra, exportou entre 1943 e 1945 perto de 300 mil toneladas anuais. O consumo interno, nesta época, era praticamente atendido pela Sociedade Anônima de Mineração Trindade (SAMITRI) e pela Belgo-Mineira, que abasteciam os fornos de gusa existentes no país (QUARESMA, 1987).

O processo de exportação, a partir de 1950, começa a ter um aumento da porcentagem em relação a produção brasileira. A CVRD, após a estabilização como empresa, principalmente a após a conclusão da Estrada de Ferro Vitória-Minas



(EFVM), a mecanização das minas e o aparelhamento do cais de embarque do minério em Vitória, Espírito Santo, transforma-se na principal empresa mineral exportadora do mundo (NETTO, SANTOS, 2009).

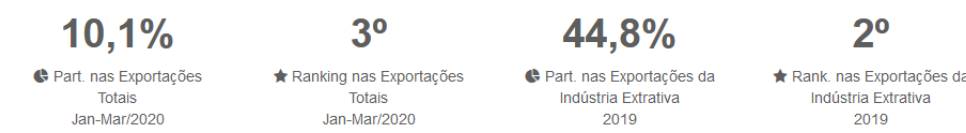
Nas décadas de 50 e 60, fatos importantes contribuíram para o aumento da produção em relação ao mercado interno. O consumo de minério aumentou consideravelmente com a demanda das grandes usinas siderúrgicas inauguradas: Manesmann (1954), Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (USIMINAS) (1962), a Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) (1965) e com a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) atingindo o seu 1º milhão de toneladas de aço em lingotes (1960) (NETTO, SANTOS, 2009).

As exportações ampliaram com a SAMITRI e FERTECO, associando-se a CVRD, para utilização da estrada de ferro. Os anos setenta posicionaram de vez o Brasil no contexto mundial, como grande produtor e exportador de minério de ferro. (NETTO, SANTOS, 2009)

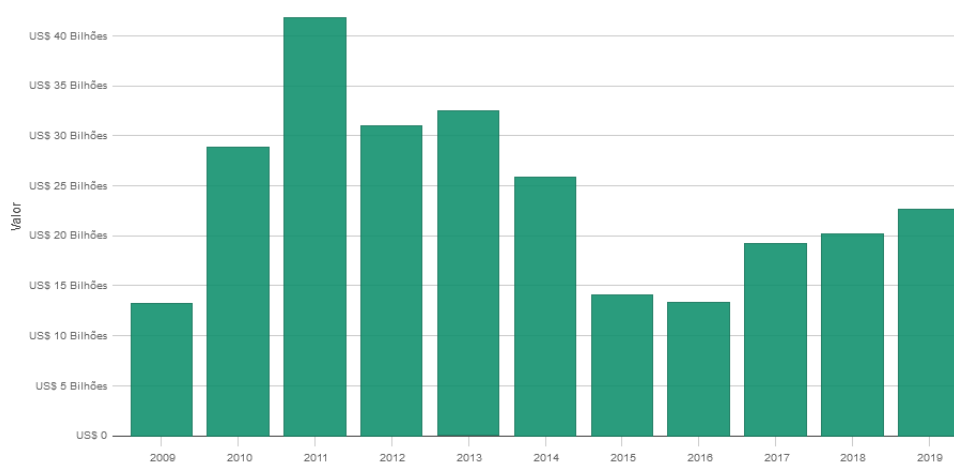
O setor brasileiro de mineração tem enorme potencial geológico, sendo que a maioria do país ainda não foi explorado. Em 2009, o Brasil recebeu apenas 3% do orçamento mundial para mineração. Até agora, apenas 30% do seu território foi sistematicamente explorado através de mapeamento geológico. Apesar de sua área total ser quase sete vezes maior do que o Peru, o Brasil investiu apenas metade da quantia que o Peru investiu em pesquisas geológicas (EMJ, 2009, p. 3).

A indústria de mineração do ferro vem ganhando uma importância cada vez maior na economia brasileira tal como indicado no gráfico 1.

**Gráfico 1 – Indicadores da exportação de minério de ferro entre 2009 e 2019**



### Série histórica



Fonte: Brasil, 2020.

O minério de ferro representou quase 50% de participação nas exportações da indústria extrativa no ano de 2019, o que diz bem da sua importância para o setor.

### III 2. A cadeia produtiva na mineração

A cadeia produtiva caracteriza-se por ser um conjunto de componentes interativos, dos quais fazem parte os produtores, os fornecedores de insumos e serviços, as indústrias de processamento e de transformação, os agentes de distribuição e de comercialização, para além dos consumidores finais que atuam no contexto de um produto específico, dependendo da atividade (CASTRO et al., 1998).

Prochnick (2002) explica que a cadeia produtiva inclui um conjunto de etapas sequenciais onde os diversos insumos passam e são transformados e depois,

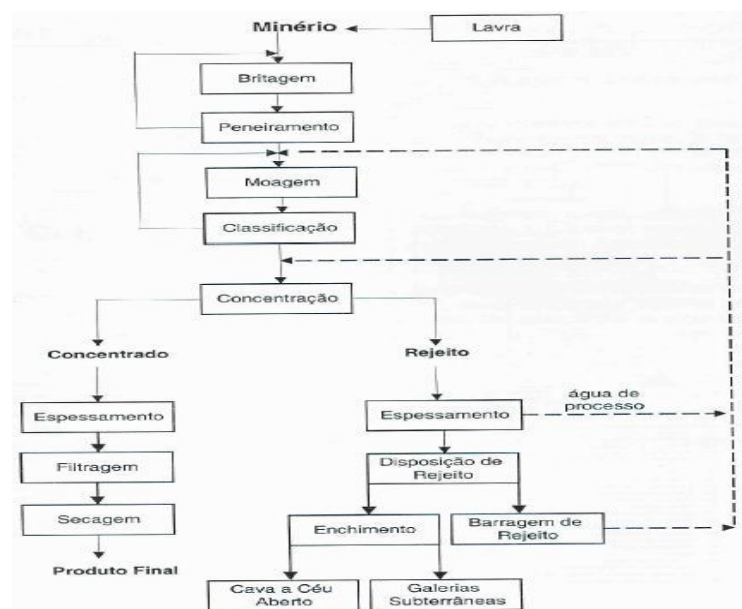
transferidos. Esta é uma definição algo abrangente e que permite incorporar diversas formas.

Segundo Mello (2004) a cadeia produtiva dos minerais inclui, no decorrer da atividade da mineração, as seguintes atividades: a extração, o transporte, o processamento de minérios, a transformação mineral e a comercialização do produto final.

Já para Colpo, Weise e Neto (2015) existe um diferencial no setor mineral no que diz respeito à cadeia produtiva, que é o fato de produzir diversos itens a partir do processamento de matérias primas naturais e também por ser parte integrante de diversas cadeias de produção, tais como agricultura, construção civil e siderurgia, dentre outras.

A figura 5 apresenta um exemplo da cadeia produtiva de minério com a classificação das operações unitárias.

**Figura 5 - Fluxograma de tratamento de minério**



Fonte: Luz et al. (2004)

Em relação ao processamento de minério, existe uma série sequencial de operações industriais denominadas operações unitárias e que são assim chamadas em função do fato de apenas a combinação e a sequência dessas operações ter a combinação variada para poder corresponder a um determinado objetivo ou para

se adaptar às características específicas de um determinado minério tal como exibido na Figura 5 (CHAVES, 2002).

Ainda segundo Chaves (2002) as operações unitárias, per si, não são suficientes para produzir um produto final já que, por norma, são necessárias várias operações unitárias que, quando combinadas, se transformam em processos que abrangem desde o minério inicial até o produto final.

Assim, as operações unitárias são classificadas por:

- a) cominuição: inclui a moagem e britagem;
- b) classificação: peneiramento, ciclonação e classificador espiral;
- c) concentração: gravítica, eletrostática, por flotação e outros;
- d) desaguamento: espessamento e filtração; e
- e) secagem: secador rotativo e secador de leito fluidizado, disposição de rejeitos.

Importa referir que, tal como explica Chaves (2002) existe uma cadeia produtiva específica para cada minério, que é adequada ao melhor método extrativo e de beneficiamento.

A mineração abrange, portanto, todo o conjunto de atividades necessárias para que se obtenha um produto mineral bruto, concentrado ou aglomerado e de onde se destacam (MESQUITA; CARVALHO; OGANDO, 2016):

- a) a lavra, composta pela extração mineral e pelo transporte interno;
- b) o beneficiamento, que é constituído pelas etapas de cominuição (moagem e britagem), pela classificação, pela concentração e/ou aglomeração.

Em relação ao processo de beneficiamento mineral, este envolve apenas mudanças físicas no minério.

## CAPÍTULO IV - INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SEUS CASOS DE USO NO SETOR DE MINERAÇÃO

O setor da mineração enfrenta enormes desafios, que são colocados em evidência em função de movimentos estruturais e também de conjuntura adversa e que, inevitavelmente, levam à promoção de mudanças da sua dinâmica, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento e também à adoção de novas tecnologias.

Tal como explicam Mesquita, Carvalho e Ogando (2016, p. 326):

As novas tecnologias estão sendo adotadas para otimização, controle e automação de operações e viabilização de novos empreendimentos de lavra e transformação mineral. Tecnologias de big data, impressão 3 D e novos materiais têm permitido, também, uma redução expressiva do ciclo de desenvolvimento de novos produtos, impulsionando o desenvolvimento de novas ligas metálicas customizadas, em parceria com indústrias consumidoras.

Atualmente, o setor mineral vive, por isso, um período importante de mudanças, cujas implicações podem passar pela reorganização da sua estrutura produtiva decorrente da introdução de tecnologias visando o desenvolvimento e melhoria dos seus processos produtivos, buscando o diferencial que permita ao setor ser competitivo no mercado global.

Na atualidade, com a difusão de tecnologias como a internet das coisas, big data, manufatura aditiva e outras, têm sido utilizadas para desenvolver e inovar os sistemas e tornar os processos produtivos mais eficientes (MESQUITA; CARVALHO; OGANDO, 2016).

Uma das possibilidades mais relevantes para sociedade das inovações tecnológicas inseridas na Indústria 4.0 é o fato das mesmas poderem contribuir

para uma atividade mais segura e menos prejudicial em termos ambientais e com maior sustentabilidade.

Como explica Azapagic (2006), a indústria de mineração tem, pela frente, desafios complicados no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável. Partindo do princípio que os minerais se apresentam como essenciais para a vida cotidiana, já que são utilizados como matéria-prima em diversas indústrias e transformados em inúmeros produtos que são utilizados pela sociedade, por outro lado a sua extração e o seu processamento são geralmente associados a diversos impactos socioambientais e que necessitam ser geridos por forma a que o setor possa desenvolver-se de uma forma mais sustentável.

A agenda do setor de mineração deverá contemplar principalmente soluções para minimizar o volume material movimentado da mina e de efluentes não aproveitados; o consumo de água, os riscos decorrentes dos processos de beneficiamento e da deposição de rejeitos e os impactos da mina, para além de aumentar os níveis de benefícios e satisfação social decorrentes das operações mineiras, com processos de fechamento de mina e de reabilitação das áreas degradadas (BNDES, 2017, s/p).

Os acidentes ocorridos nos anos de 2015 e 2019, nos municípios de Mariana e Brumadinho, ambos no Estado de Minas Gerais, viram lançar ainda maiores preocupações e a necessidade de tratar a segurança e a proteção ambiental na indústria mineradora com toda a celeridade. Nesse sentido, o investimento em pesquisa, na difusão de novas tecnologias e de processos relacionados com algumas atividades no processo produtivo como a recuperação de minérios e o seu aproveitamento; a recuperação e o reaproveitamento de resíduos e de elementos dispersos, a aplicação de tecnologias que produzam baixo risco ambiental na deposição de resíduos; a recuperação e a reutilização da água que é utilizada nos processos produtivos, o monitoramento e o controle das barragens e dos riscos ambientais causados pela atividade (BNDES, 2017).

A utilização das inovações tecnológicas nesta área pode permitir identificar e alertar para movimentos irregulares das superfícies das barragens e poder agir de forma a prevenir ou evitar acidentes; diminuir a utilização de barragens ao desenvolver processos de concentração sem que seja necessária a adição de água ou relacionados à deposição de rejeitos.

Estes são alguns exemplos do que a indústria 4.0 pode beneficiar a indústria de mineração, sobretudo em relação à preservação socioambiental e à segurança das populações e das próprias empresas e seus funcionários. Na próxima sessão iremos analisar cada um dos clusters, tendo como base o Projeto Indústria 2027, e entender mais profundamente como cada uma das tecnologias estão sendo implementadas, utilizando casos de uso das principais minerados do mundo.

#### **IV. 1 Aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 utilizáveis na mineração**

O projeto Indústria 2027, tem como objetivo avaliar as expectativas em relação aos eventuais impactos da inovação na indústria brasileira e busca identificar quais as tecnologias resultantes da **Indústria 4.0** seriam mais relevantes para os diferentes sistemas produtivos, como impactariam esses setores, que riscos e que oportunidades trariam e qual o melhor aproveitamento poderiam retirar das mesmas.

Nesse projeto, foram identificadas oito tecnologias com esse potencial, organizadas da seguinte forma (IEL, 2018):

- a) inteligência artificial (IA), big data e computação em nuvem;
- b) Internet das Coisas;
- c) Produção inteligente e conectada ou manufatura avançada;
- d) Redes de comunicação;
- e) Nanotecnologia;
- f) Biotecnologias avançadas;
- g) Materiais avançados;

#### h) Novas tecnologias de armazenamento de energia

Dentro desses oito tecnologias, foram analisadas os impactos e a difusão das mesmas em 2027, baseado na percepção das mineradoras (IEL, 2018):

**Quadro 2 – Percepção das empresas consultadas quanto a difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na mineração em 2027**

Tecnologias	Difusão	Impacto
Internet das Coisas	Alta	Alto
Redes de comunicação rápidas e seguras	Alta	Alto
Inteligência artificial, <i>big data</i> e computação em nuvem	Alta	Alto
Produção inteligente e conectada	Alta	Alto
Materiais avançados na mineração	Baixa	Baixo
Materiais avançados nos consumidores	Moderada	Moderado
Materiais nanoestruturados	Baixa	Baixo
Armazenamento de energia	Baixa	Baixo

Fonte: IEL, 2018

No setor da mineração, a aplicação da digitalização tem um grande potencial de benefícios devido à alta variabilidade de sua matéria-prima, que poderá ser melhor compreendida e antecipada pela análise dos dados. Todos os aspectos e tipos de operação, como operações de plantas e lavras a céu aberto podem ser monitoradas e beneficiadas pelo uso do *IoT*. Um fator decisivo para o aumento da sua difusão é o barateamento da mesma. (IEL, 2018):

Em relação as redes de comunicação na mineração, predominam as redes de comunicação baseadas em cabos coaxiais, que não possuem grande capacidade para transmissão de dados. As redes de comunicação estruturadas em fibra ótica são mais eficientes mas sua aplicação ainda é restrita em minas subterrâneas, uma segunda opção seria as transmissões via rede elétrica. A infraestrutura urbana é um ponto de restrição para a transmissão rápida de dados entre unidades e empresas, fator que afeta hoje e ainda afetará a eficiências das redes até 2027. (IEL, 2018):



As tecnologias de IA, *Big Data* e computação em nuvem já são consideradas como parte da estratégia dos negócios. Em relação a sua difusão no momento atual, cada uma delas encontra – se em estágios diferentes. *Big Data* e Computação em nuvem já fazem parte da utilização de grandes mineradoras porém o IA ainda é pouco utilizado. A utilização da mesma atrelada com outras tecnologias, como *big data*, irá acelerar as tomadas de decisão automáticas em processos administrativos.

A produção inteligente e conectada visa integrar a cadeia de produção ,ajudarão a aprimorar a capacidade das instalações e ativos existentes e melhorar o planejamento, o agendamento, a execução e a tomada de decisão. A difusão da tecnologia hoje ainda é considerada de baixa a moderada porém espera-se que nos próximos anos, até 2027, a mesma tenha uma difusão elevada. A utilização da mesma irá prover maior eficiência na operação como um todo. (IEL, 2018):

O aumento da escassez de recursos naturais e a queda dos teores de metal tem ampliado a atenção para estudos para materiais mais abundantes, como os resíduos industriais. O investimentos em tecnologias e processos com foco em:

- a) aumento da recuperação dos minérios de interesse usando Nanotecnologia;
- b) aproveitamento e aglomeração de finos e ultrafinos;
- c) recuperação e reaproveitamento de resíduos e elementos dispersos, inclusive processos para destinação alternativa de uso;
- d) tecnologias de baixo risco ambiental para disposição de resíduos, recuperação, reutilização, redução ou eliminação de uso de água;
- e) monitoramento e controle de barragens e riscos ambientais

O investimento em materiais avançados traz às mineradoras, benefícios como redução de consumo de energia, de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e de ruídos, além de um aumento de segurança e durabilidade. Nos nanoestruturados destacam-se pesquisas ligas nano estruturadas à base de magnésio, além de compostos à base de titânio e cromo, que objetivam armazenar

elevadas quantidades de hidrogênio, estrutura eletrônica de nanotubos de nitreto de carbono, resistência mecânica de microestruturas em silício e estudos topográficos e espectroscópicos de interfaces eletrificada. (IEL, 2018)

O Armazenamento de energia tem o potencial de melhorar a eficiência energética e por consequência aumentar a competitividade das empresas. Como exemplos de casos já sendo utilizados são armazenamento de água marinha em reservatórios de altitude de modo a gerar energia na ausência de ventos ou de incidência solar, baterias na mineração se faz em equipamentos elétricos de minas subterrâneas, a geração de energia a partir do armazenamento de água em barragens e utilização de equipamentos elétricos a bateria, utilização de baterias de zinco-argônio recarregáveis. (IEL, 2018)

Neste capítulo, iremos analisar o que são cada uma das tecnologias identificadas e quais os impactos na indústria de mineração que as mesmas podem agregar. O foco será maior nas tecnologias de consideradas de alto impacto. Baseado em cases de inovação e análises de potenciais ganhos econômicos que podem ser destravados ao implementar tais tecnologias.

A análise realizada no projeto indústria 2027 agrupou as tecnologias de Inteligência artificial (IA), *Big data* e Computação em nuvem em um mesmo cluster. Dentro do mesmo, alguns conceitos como *Machine Learning*, *Advanced Analytics* e *Blockchain* também serão analisados no atual estudo.

#### **IV. 1.1 Inteligência artificial (IA) e *Machine Learning***

O conceito de inteligência artificial (IA), de acordo com Ciriaco (2008), remete para a ciência da computação, na qual está busca elaborar dispositivos dotados de inteligência que conseguem imitar a capacidade do ser humano.

Segundo Ribeiro (2017) não é possível afirmar que existe uma única definição que conceitue a Inteligência Artificial. Apenas se pode afirmar que é um ramo da ciência cuja pretensão é a de desenvolver algoritmos e máquinas inteligentes que consigam simular a inteligência humana ou que sejam tão

inteligentes quanto o homem. Foram definidos quatro tipos de inteligência artificial: pensando como um humano, agindo como seres humanos, pensando racionalmente e agindo racionalmente.

O rápido crescimento da informática e da computação permitiu que esta área ganhasse impulso e experimentasse o surgimento de novos elementos que rapidamente se agregam à IA. Existe grande diversidade de aplicações, como por exemplo, os programas computacionais, os aplicativos de sistemas de informática que são utilizados na segurança, na robótica, em jogos, em dispositivos que permitem efetuar diagnósticos médicos, dentre outros (CIRIACO, 2008).

Arine (2017) explica que a Inteligência Artificial é um dos segmentos da ciência que permite que os computadores desenvolvam e executem atividades sem que para tal sejam programados de uma forma explícita. É uma tecnologia que permite simular as atividades humanas, no que diz respeito ao raciocínio, na tomada de decisões e na resolução de problemas, utilizando para isso, os softwares e a robótica, efetuando a automação de vários processos.

Em relação à aplicação desta tecnologia no setor de mineração, uma das principais é o Sistema de Transporte Autônomo (AHS), cuja proveniência é de fornecedores especializados neste setor. Estes sistemas facilitam o controle do veículo e permitem melhorar a segurança, seja do veículo, seja dos funcionários, expande a vida útil do equipamento, além de aumentar a eficiência produtiva (KLEIN, 2019).

Em 2018, a Vale divulgou o projeto de primeira mina operando apenas com caminhões autônomos no Brasil. Através da combinação de tecnologias como inteligência artificial, controle por sistema computacional, GPS e radares, os caminhões se movimentam entre a frente de lavra e área de descarga, de forma eficiente sem a necessidade de um operador na cabine. A Vale espera conseguir aumento da vida útil de equipamentos da ordem de 15%. Estima-se ainda que o consumo de combustível e os custos de manutenção sejam reduzidos em 10% e que haja um aumento da velocidade média dos caminhões. A operação autônoma também traz relevantes benefícios ambientais, devido a economia de combustível

usado nas máquinas que tem como resultado, um volume mais baixo de emissões de CO<sub>2</sub> e particulados.

Na mineradora britânica, Anglo American, na mina de Kumba Komela, estão sendo utilizadas escavadeiras autônomas para uma perfuração mais segura e precisa. A operação é coordenada de um centro de comando e não mais de um poço de minério de ferro aonde as são condições imprevisíveis. Usando computadores e telas avançados, eles operam a broca remotamente. Estes sistemas permitem utilizar orientações de profundidade, distância e inclinação, permitindo a fixação da escavadeira dentro dos pontos que foram definidos previamente pelo operador. Desta forma, dirigir o veículo de uma forma mais eficiente torna-se possível e também permite reduzir a ocorrência de eventos isolados e indesejados no decorrer da retirada dos materiais (TIAGO, 2019).

Outro aspecto da utilização da IA na mineração está relacionada com a capacidade para detectar corpos de minério em áreas que são mais remotas ou desconhecidas, até mesmo sem ter acesso a dados geológicos pré-existentes. Ainda assim, não é previsível que esta inovação possa vir a substituir o homem totalmente, a curto prazo uma vez que a análise dos resultados só é possível de ser efetuada por funcionários devidamente especializados. Nestes casos, a plataforma funciona como um auxiliar, um assistente técnico do indivíduo (NETO; 2019).

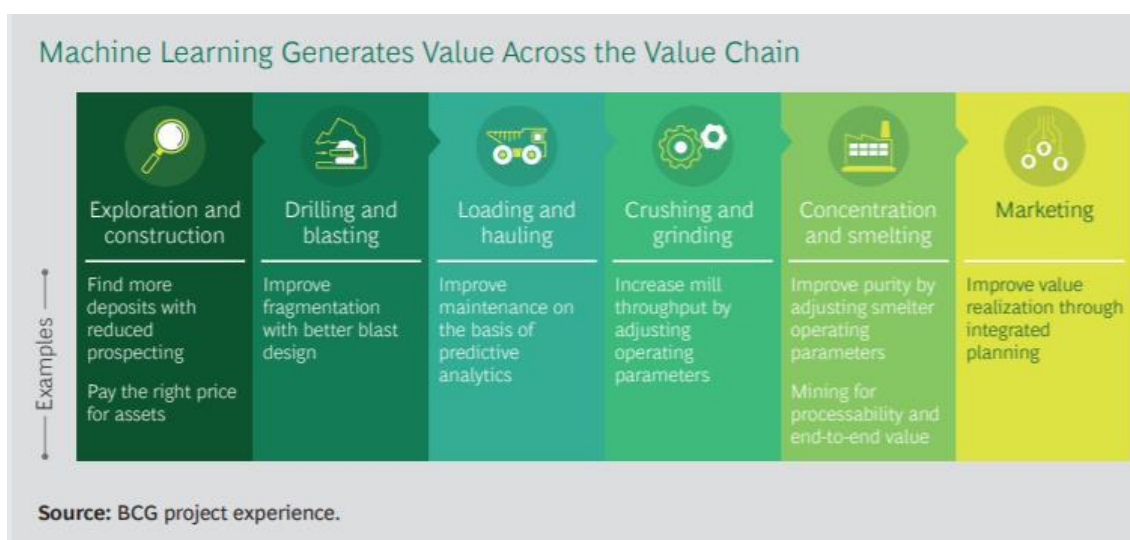
Ainda segundo Neto (2019), o uso da IA na pesquisa geológica e de separação mineral, permite buscar a melhoria da capacidade de planejamento de lavra e a redução do volume de massa estéril que entra no processo produtivo, impactando assim nos aspectos ecológicos do setor.

A tecnologia de *Machine Learning* segundo a Stanford University (2019) pode ser definida como “A ciência de fazer os computadores agirem sem serem explicitamente programados.”

O *Machine Learning* permite os algoritmos "aprender" com os dados existentes. Uma vez o algoritmo é treinado, ele pode prever resultados futuros com base em novos dados.

Encomendar novas peças de reposição pela primeira vez, como um disjuntor ou broca em particular, costumava ser um esforço significativo para os usuários corporativos. Em média, 550 solicitações diárias de criação de novos materiais. A mineradora Severstal obteve retornos em aproximadamente 21% de todas as novas solicitações de material devido às classes de materiais escolhidas incorretamente. A Severstal agora está usando o *Machine Learning* para melhorar o processo de inserção de novos materiais nos dados mestre de materiais de maneira inteligente e automatizada. (SAP, 2020)

**Figura 6 – Machine e o valor gerado na cadeia produtiva de mineração**



Fonte: BCG Project Experience, 2019

A tecnologia pode ser aplicada em toda cadeia produtiva da mineração. Desde a exploração na busca dos depósitos, reduzindo o esforço da prospecção. No processo de perfuração e detonação ao aperfeiçoar a fragmentação do minério utilizando um processo de padronização de disposição de explosivos. No carregamento e transporte melhorar a manutenção com base na manutenção preditiva. No processo de beneficiamento, aumentar a produtividade do moinho ajustando os parâmetros operacionais. (BCG, 2019)

A maioria das aplicações de aprendizado de máquina nas quais a BHP Billiton está trabalhando a curto e médio prazo concentra-se na extração,

processamento e transporte de minerais, principalmente porque envolvem um número maior de atividades repetitivas. (BHP, 2020)

Na extração mineral, a BHP está trabalhando em duas frentes: caminhões autônomos e perfuradoras automáticas. A empresa está implementando quinze caminhões automatizados em uma mina de minério de ferro na Austrália. O uso de brocas autônomas para substituir as brocas manuais tradicionais ajudou a BHP a melhorar sua produtividade em 16%. As brocas são usadas na mineração para cavar buracos para inserir explosivos na explosão, o que permite que pás e caminhões removam todo o material. Além disso, as brocas podem testar o quão duro ou macio o solo é, para que mais tarde possam estimar com precisão a quantidade de explosivos necessários. (BHP, 2020)

Na etapa de processamento de minerais, a BHP está introduzindo um sistema para automatizar o processo de tomada de decisão, escolhendo qual triturador se encaixa melhor no lote de materiais que está sendo transportado em um caminhão. Isso lhes permite reduzir custos e tempo ocioso, melhorando, assim, a utilização e produção de seus britadores. (BHP, 2020)

A BHP também está trabalhando para automatizar sua logística e transporte de minerais. Normalmente, os minérios são transportados de trem para um porto e depois carregados em navios. O transporte em muitas operações pode facilmente se tornar um gargalo e, por esse motivo, otimizar a utilização e a capacidade é uma prioridade, que é alcançada com trens autônomos e um processo de carregamento autônomo para mover minérios do trem para um navio. (BHP, 2020)

A IA aumenta a eficiência por meio de um melhor rendimento operacional e amplia segurança do trabalhador. As minas podem ser exploradas de forma mais profunda e com maior segurança. Trabalhadores evitam riscos, como fornos e máquinas pesadas. Em vez disso, podem estar focados no acompanhamento de indicadores de desempenho, como a identificação e correção de vazamentos. A IA tem a capacidade de redução do consumo de água, eletricidade e emissões de carbono. (WEF, 2017)

#### IV. 1.2 *Big Data e Advanced Analytics*

A informação revela-se fundamental enquanto matéria prima, para o desenvolvimento da indústria atual. Big Data remete para a grande quantidade de dados que são armazenados de forma constante e a cada momento, o que resulta em milhões de sistemas que estão ligados à rede (IoT) e que vai produzindo dados em tempo real (COSTA, 2017).

Segundo Coelho (2016) são necessárias poderosas ferramentas de análise que possam atribuir significado aos dados que vão sendo produzidos em tempo real. Dados são palavras, números ou outros sinais que representam fatos discretos sobre uma determinada realidade objetiva. Esses dados podem ser validados e verificados, no entanto, caso não sejam interpretados e contextualizados, não apresentam qualquer significado, originando a informação/produto.

Para que esses dados sejam aproveitados nos processos industriais, comerciais ou comportamentais, existe a necessidade de filtrar, tratar e analisar esses dados para transformá-los em informação útil. Segundo Azevedo (2017), os dados que são captados na internet das coisas não são a maior parte da produção de dados do *Big Data*. Ainda assim, a IoT, apesar de todos os seus sensores incorporados em dispositivos e máquinas, absorve dados ambientais, geográficos, logísticos, pessoais, comportamentais, dentre inúmeros outros.

Caleiro (2018) explica que o *big data* se apresenta como um modelo novo para a tomada de decisões nas indústrias e cuja característica é a conexão completa e total dos processos produtivos utilizando a internet das coisas (IoT) e a internet industrial das coisas (IIoT), dando assim a possibilidade de adquirir dados com elevada velocidade, volume e grande variedade. Os seus benefícios são diversos e vão desde a diminuição de operadores, até o melhor desempenho das operações, a economia de energia e segurança das instalações, o fim do planejamento reativo, tornando todo o sistema, preditivo.

No setor minerador, o desenvolvimento das tecnologias de big data e controladores inteligentes visa a redução de custos e de eficácia energética,

integrando estratégias de transformar esses dados em lucro e que poderá, em função desses aspectos, definir uma provável trajetória tecnológica da aplicação desta inovação. A utilização de engenharia de dados, de ferramentas de monitoramento remoto e de indicadores de tempo médio de reparação, proporcionam ganhos de eficiência de até 15%, reduzindo ainda as paradas emergenciais que acontecem no processo produtivo (ABM, 2019).

Tiago (2019) explica que na indústria mineral, há a necessidade de tomar decisões com base naquilo que não se observa, dificultando assim o volume de dados que são estruturados para a análise, que é ainda bastante pequeno. Para poder dar resposta a esse fator, os pesquisadores criaram modelos que possibilitam avaliar o potencial das jazidas, por comparação com o desempenho existente em áreas similares e com depósitos minerais que apresentam características semelhantes, acrescentando ainda informações geoquímicas e atividades sísmológicas. De posse destas informações, os sistemas conseguem prever qual o tempo de vida útil das jazidas e efetuar recomendações em relação às frentes de exploração.

Também é possível construir um banco de dados confiável e extenso, objetivando identificar todas as possibilidades de melhora e de controle da operação. Analisando o desempenho dos equipamentos das várias unidades de mineração, as empresas podem identificar quais as melhores práticas e disseminá-las por todas as unidades da organização, ganhando eficiência e produtividade (TIAGO, 2019).

O conceito de *Advanced Analytics* foi resumido pela Gartner da seguinte forma:

O Advanced Analytics é o exame autônomo ou semi-autônomo de dados ou conteúdo usando técnicas e ferramentas sofisticadas, geralmente além das da tradicional inteligência de negócios (BI), para descobrir insights mais profundos, fazer previsões ou gerar recomendações. As técnicas analíticas avançadas incluem aquelas como mineração de dados / texto, aprendizado de máquina, correspondência de padrões, previsão, visualização, análise semântica, análise de sentimentos, análise de redes



e agrupamentos, estatística multivariada, análise de gráficos, simulação, processamento de eventos complexos, redes neurais.

As empresas de mineração podem utilizar a tecnologia para suportar tomadas de decisões de forma mais ágil e eficiente. Obtendo uma melhor compreensão dos fatores dos minérios e operações nas plantas. A tecnologia combinada pode trazer benefícios na cadeia produtiva como um todo. A mineradora GoldCorp está utilizando a tecnologia de *Advanced Analytics* obter economias de energia, ao analisar os dados, a empresa chegou à conclusão que não necessitava construir geradores adicionais e que poderia desligar um dos atuais em utilização. Como resultado, a empresa conseguiu uma redução de 30% de energia. (WEF, 2017)

As operações de minério de ferro da BHP Billiton desenvolveram um sistema de apoio à decisão baseado em um algoritmo e em um modelo de operações para criar um estoque continuamente suavizado. O sistema opera como uma ferramenta de apoio à decisão, fornecendo recursos analíticos avançados que recomendam decisões de combinação nas minas, nos estoques ferroviários e portuários. (Everett, Howard; Kamperman, 2001). Os parâmetros geometalúrgicos, como a dureza do minério, influenciam o rendimento da usina, uma vez que o minério mais duro requer tempos de retenção mais longos. A utilização de ferramentas analíticas para conhecimento prévio da variação esperada e da distribuição espacial desses parâmetros poderia ser usado para ajustar as notas de corte e misturar os minérios. (JOUR, 2011)

A utilização de tecnologias de *Advanced Analytics* pode agregar valor à planta e operações de manutenção, identificando gargalos ou padrões de resíduos. A análise avançada também tem a aplicabilidade na identificação dados geológicos, padrões durante a exploração, tornando mais ágil o processo de identificar efetivamente o valor do minério. Modelagem de simulação e utilização de cenários hipotéticos em tempo real para identificar a melhor maneira de executar a extração, processamento, produção e distribuição, com base em condições situacionais ou ambientais. Em combinação com o uso de sensores inteligentes

análises avançadas podem reduzir o risco desastres industriais, permitindo uma maior precisão de vigilância e previsão de equipamentos e ativos.

#### **IV. 1.3 Blockchain**

A definição e a explicação do conceito de *blockchain* pode ser complexo até mesmo para pesquisadores sobre o assunto. Baseado na definição da universidade de Cambridge pode definir-se a tecnologia como

Um sistema usado para fazer um registro digital de todas as ocasiões em que uma criptomoeda (= uma moeda digital como bitcoin) é comprada ou vendida e cresce constantemente à medida que mais blocos são adicionados. (Cambridge University Press, 2020)

Segundo Builtin, o conceito pode ser explicado de forma simplificada como ativos digitais distribuídos em vez de copiados ou transferidos. Esses ativos são descentralizado, permitindo acesso completo em tempo real. De forma que seu registro se torna transparente de alterações e preserva a integridade do documento, o que cria confiança no ativo. De acordo com o *The Economist*, o principal ganho de um *blockchain* é o registro atualizado e alterado de informações. Como nenhum indivíduo controla a cadeia, todos têm acesso a informações sobre as origens do mineral. Os usuários da cadeia mantêm as informações atualizadas e o compartilhamento entre pares tem a transparência e padrões claros de documentação limitando assim o risco de obtenção de minerais de conflito. (DIGISTALIST MAGAZINE, 2018)

A tecnologia pode ser utilizada em qualquer setor e para rastrear todos os tipos de transação. Na indústria de mineração, uma das aplicações do *blockchain* é na função de autenticação da origem das peças de reposição. A tecnologia tem o potencial de diminuir o problema de falsificação de peças e como consequência evitar danificar equipamentos devido a peças não apropriadas e até mesmo

acidentes de trabalho. O tempo de inatividade inesperado afeta significativamente a produtividade do trabalhador. Os prazos de mineração são adiados, pois esse problema também afeta os lucros (DIGISTALIST MAGAZINE, 2018)

Um dos desafios da mineração são os “minerais de conflito” que extraídos em zonas de conflito e vendidos para financiar o conflito. As brechas do sistema atual de regulação permite que esses produtos cheguem ao mercado e consumidores. A utilização do *blockchain* pode verificar a origem de um mineral e assim reduzir o risco da compra de minerais com origem de zonas de conflito. O benefício da transparência de dados, limita o risco de comprar de vendedores enganosos. A segurança nas transações por meio do registro no *blockchain* permite que os compradores comprem com confiança. (DIGISTALIST MAGAZINE, 2018)

O modelo de confiança da *blockchain*, por meio do consenso digital massivamente distribuído, poderia remodelar as cadeias de suprimentos e comércio em toda a economia digital. De acordo com a IDC, aproximadamente 30% dos fabricantes estarão utilizando *blockchain* e *IoT*, impulsionado por aumento dos requisitos para sustentabilidade, para aumentar a confiabilidade, levando a 90% aumento na eficiência da auditoria até 2025. (SAP,2020)

O transporte marítimo do minério ainda utiliza documentação física em muitas transações, como exemplo, a carga pode ficar retida no porto porque a documentação física necessária para resgatá-la ainda não chegou, exemplos semelhantes podem ser encontrados em toda a cadeia de valor de mineração e metais, desde as cartas de crédito exigidas para financiamento comercial até os certificados de vistoria emitidos por laboratórios que certificam o grau de uma mercadoria como o cobre. A utilização do *blockchain* tem como benefícios além da segurança das transações, a menor utilização do papel. (WEF, 2018)

O trabalho infantil ainda é uma questão importante em relação à mineração de cobalto. As empresas de mineração, apesar de melhorias significativas nas áreas de sustentabilidade e conformidade, devem continuar inovando e assim permanecer atualizadas. A utilização do *blockchain* pode atuar no desenvolvimento de aplicações que abordem conformidade, transparência e responsabilidade. (WEF, 2018) A IBM em projeto de co-inovação com Ford Motor

Company, a Huayou Cobalt, a LG Chem e a RCS Global lançou o programa piloto de *blockchain* com objetivo de “rastrear e validar minerais eticamente adquiridos”. Dessa forma, criando uma garantia que o cobalto seja extraído, produzido e comercializado de forma responsável e ética, fornecendo um registro transparente, imutável e verificável da cadeia de suprimento de cobalto do “fabricante da mineradora até o final”. (99Cripto, 2019)

A empresa de tecnologia, IBM, iniciou *cases* de *blockchain* com foco em aumentar a eficiência e a transparência na indústria de mineração. As empresas MineHub Technologies Inc., Goldcorp Inc., ING Bank, Kutcho Copper Corp., Ocean Partners USA Inc. e Wheaton Precious Metals Corp se juntaram para construir um piloto que tem como objetivo “ajudar a melhorar a eficiência operacional, logística e financiamento e reduzir os custos na cadeia de fornecimento de concentrados minerais de alto valor, da mineradora ao comprador final”. (99Cripto, 2019)

O primeiro caso de uso tem como objetivo “gerenciar o concentrado da mineradora Penasquito da Goldcorp no México ao longo de sua rota até o mercado”. Uma vez que o minério é extraído, os dados serão enviados para a plataforma *blockchain*. Os dados são então verificados por “reguladores independentes” e o minério pode ser carregado para envio. A plataforma MineHub registra cada transação e permite que os participantes “visualizem e reconciliem” esses dados à medida que o produto passa pela cadeia de fornecimento. (99Cripto, 2019)

#### **IV. 1.4 Internet das Coisas (IoT)**

Na origem do conceito de *Internet of Things* (IoT) ou Internet das Coisas, está a tentativa de expressar um sistema que fazia a utilização de sensores como meio de transmissão de dados entre objetos e computadores (ORIWOH et al. 2013). Caleiro (2018) acrescenta que é uma técnica que permite a conexão entre objetos inteligente, por meio da internet. São objetos do cotidiano, equipados com lógica

digital, sensores e capacidade de rede e que são capazes de se comunicarem, contribuindo para gerar maior conforto e maior comodidade para o usuário.

A IoT é, segundo Venturelli (2006), uma ideia que permite conectar qualquer dispositivo que gere informações e que permite a conexão a um serviço de nuvem. Além da IoT, existe também a Internet Industrial das Coisas (IIoT) que se traduz pela evolução das informações da cadeia produtiva, ou seja, apresenta o mesmo conceito da IoT e conecta essas informações via nuvem.

A diferença entre a IoT e a IIoT é que esta última tem a capacidade de conectar todas as informações obtidas e que acontecem no chão de fábrica, não sendo necessário a centralização em um único dispositivo. É esperado que a tomada de decisões aconteça, não só entre homem e máquina mas também entre máquina e máquina.

Dentre as diferentes ferramentas que a IoT possibilita mencionam-se a identificação por radiofrequência (RFID). Os sensores, o *Global Positioning System* (GPS) e outros objetos que permitem a conexão à internet para trocar informações. Segundo afirma a ABM (2018), entre os ganhos proporcionados pela utilização desta tecnologia no gerenciamento inteligente na mineração encontra-se a estabilidade operacional, a redução do impacto ambiental e a melhoria da produtividade. Integrar esta tecnologia permite interligar toda a cadeia de suprimentos, ultrapassando a falta de interação que existe na cadeia mineral e permitindo criar uma visão mais ampla da cadeia produtiva e, decorrente desses aspectos, melhorar a eficiência operacional e a produtividade.

Na mineração, como em todas as indústrias, os sensores utilizados se diferenciam de acordo com as suas aplicações específicas. A variedade funcional possibilita a medição de diversas variáveis operacionais que afetam a qualidade da operação de lavra ou beneficiamento, como, por exemplo, a pressão interna de pneus de caminhões ou de uma coluna de flotação, a temperatura dos componentes dos equipamentos, o teor de metais pesados num efluente da usina.(GONÇALVES, 2018)

A mineradora russa, Severstal utiliza da combinação de IoT e o *machine learning* para minimizar os custos de energia e combater a fraude de eletricidade, monitorando o uso de energia em tempo real e analisando as disparidades no consumo de energia. Em relação ao custo de investimento, a tecnologia tem um baixo custo de investimento e de operação, comparado aos possíveis ganhos em produtividade, uma vez que sua aplicação depende de tecnologias acessíveis, como sensores, smartphones, *tablets*, computadores e acesso a uma rede onde todas essas máquinas possam se comunicar. Dentre esses elementos citados, o que pode apresentar maior custo e problemas é a instalação da rede (Barbosa, 2016).

O Fortescue Metals Group usa a IoT para fornecer uma visão móvel de quanto seus caminhões transportam, e se estão cheios. Isso permite que a equipe de operações entre em contato com um motorista se um caminhão não estiver operando na capacidade máxima, de modo que as taxas de rendimento possam ser aumentadas, aumentando a receita. (INSTITUTO MINERALE, 2019)

A mineradora, Rio Tinto, também utiliza a IIoT, criando uma frota de caminhões sem motoristas para transportar minério entre minas e plantas de processamento, utilizando assim uma forma mais eficiente e segura, evitando falhas humanas. Um dos principais projetos da mineradora, “*Mine of the Future*” conta com centro de operação que controla todas as máquinas autônomas em todos os locais de mineração, o que fornece à companhia uma visão completa com painéis de controle. Além disso, há também a possibilidade de colaboração entre os diversos times de mineração, em tempo real. Isso ajuda os gerentes a otimizar a logística e a manutenção de todas as minas, através de uma localização central. O próximo passo é automatização trens e escavadeiras, o uso da IIoT aumentou a segurança e simplificou a logística (INSTITUTO MINERALE, 2019)

Um dos cases de referência do Mining Hub, trata a utilização da tecnologia para a questão de gerenciamento da água. O desafio lançado pelo programa M-Start buscava uma solução de monitoramento de dados e uso dos recursos hídricos. A solução contempla a gestão em tempo real da captação e controle do reservatório principal, até o abastecimento da usina, dispondo de alertas em caso de situações críticas e relatórios gerenciais para entender consumos setoriais, taxa de

reaproveitamento de água. A solução foi implementada pela mineradora Ferrous em 2019, através do monitoramento de toda captação, reservatórios e pontos de consumo de água, estão sendo monitorados indicadores chaves para reduzir o consumo e desperdício, reduzindo paradas da Usina, além da redução de impactos ambientais e consumo sustentável. (MINING HUB, 2020)

A segurança operacional é um das principais pilares estratégicos e motivador da adoção de tecnologias como, da IIoT na indústria de mineração. A mineradora Goldcorp instalou dispositivos de rastreamento nos capacetes dos funcionários para monitorar seus locais em tempo real. A tecnologia Synertrex® coleta dados críticos para fornecer aos operadores informações sobre a funcionalidade do equipamento. Ele pode ser usado para prever problemas de prevenção de tempo de inatividade e manutenção preditiva, bem como otimizar o maquinário para desempenho e taxa de transferência aprimorados. (INSTITUTO MINERALE, 2019)

Ainda em referência a mineradora Goldcorp, outra iniciativa implementada em relação aos sensores inteligentes é a sua utilização para redução dos custos de energia. Sensores combinados a tecnologia de rastreamento geoespacial humano para controle das luzes e gerenciamento do sistema de filtragem de ar no interior da mina. A utilização trouxe além de uma economia de 50% quantidade de ar necessária para atender a mina, o que em termos econômicos se traduz aproximadamente US \$ 1,5 milhão - US \$ 2,5 milhões a cada ano e uma redução das emissões de carbono. (RFID Journal, 2015)

A qualidade do produto final atualmente tem a capacidade de ser monitorada por sensores visuais. A quantidade de ar e o tamanho das bolhas em um forno de aço afeta a qualidade do produto final. A mineradora Metso, utiliza sensores de visualização e sensores de calor na produção de metais para monitoramento de bolhas, como resultado, uma qualidade mais consistente dos produtos (WEF, 2017).

Em relação a riscos e impactos negativos relacionados a utilização da IoT está a questão da segurança cibernética, já que podem ocorrer violações de dados em rede ou a atividade da organização ser prejudicada por eventuais falhas na

acessibilidade digital e conectividade (OLIVEIRA, 2017). Outro ponto a ser mapeado é a arquitetura tecnológica envolvida na utilização do IoT. A IoT consiste em várias tecnologias cujas arquiteturas são diferentes umas das outras, isso a torna um sistema complexo, gerando assim mais oportunidades de falha. (GONÇALVES, 2018)

A utilização da tecnologia para manutenção e gerenciamento de ativos pode reduzir significativamente os custos, devido a melhor utilização do equipamento, redução do tempo de inatividade, falhas e a frequência de incidentes relacionados a segurança no trabalho. A maior eficiência operacional traz benefícios ao meio ambiente reduzindo a energia e consumo de água e reduzindo o volume de resíduos gerados. Em suma podemos observar que a utilização IoT traz diversos benefícios as mineradoras como maior segurança, otimização, diminuição de desperdícios, aumento da produtividade, controle e automação coletando e fornecendo dados dos sistemas de chão de fábrica para os tomadores de decisão.

#### **IV. 1.5 Produção Inteligente e Redes de Comunicação**

A menção à produção inteligente e conectada remete para os sistemas ciberfísicos, que se explicam pela integração entre a computação, a comunicação e o controle da produção, que são os elementos responsáveis pela conexão entre o mundo físico e o mundo virtual, permitindo que a fábrica possa se comportar de uma forma inteligente. Dentre as principais tecnologias do núcleo duro em uso e em desenvolvimento, destacam-se: a manufatura aditiva; a robótica autônoma e colaborativa; softwares avançados de integração e virtualização online da produção por meio de rede de sensores, processadores e atuadores embarcados às máquinas e equipamentos e integrados por servidores. (IEL, 2018).

Segundo Costa (2017) e considerando que as redes de comunicação são elementos facilitadores, os sistemas ciberfísicos podem ser definidos como sistemas computacionais embarcados, ou seja, sistemas que processam a informação em outros dispositivos. Uma rede de comunicação é um sistema



interligado de computadores, tecnologias de transmissão e recursos relacionados para processar, trocar ou difundir informações. (IEL, 2018)

São equipamentos que apresentam uma capacidade de fusão, com a coleta de informações em tempo real e que permitem a tomada de decisões de uma forma autônoma (PEREIRA; SIMONETO, 2018). Segundo Almeida e Martins (2018) o potencial econômico destes sistemas é elevado por permitem um aumento de velocidade e capacidade de processamento, decorrentes do seu desenvolvimento tecnológico computacional. Ao aplicar este sistema à indústria, é possível obter um ganho na linha de produção porque permite controlar e monitorar os processos produtivos, melhorando a eficiência.

Alves (2019) explica que com estas tecnologias é possível, dentre outros aspectos, detectar mineralizações, gerar informações que permitem localizar empreendimentos viáveis, aumentar a segurança dos trabalhadores e evitando acidentes por meio de equipamentos que alertam o trabalhador e a central de monitoramento quando algo errado está ocorrendo, evitando acidentes de trabalho. Possibilitam também efetuar o monitoramento e movimento das paredes das minas, possibilitando a tomada de decisões quanto a evacuações, aumentando a segurança de homens e equipamentos.

Como explica Brightmore (2019) os *drones* vêm sendo utilizados para sobrevoar as operações e gerar imagens em tempo real, permitindo tomar decisões de forma mais rápida, seja em relação ao mapeamento e monitoramento das barragens de rejeitos, como para segurança dos trabalhadores. A Vale, utiliza drones em seu pátio ferroviário localizado em Tubarão no Espírito Santo. A tecnologia auxilia mapeamentos dos vagões carregados com minério e tem como objetivo principal a detecção do excesso de umidade na carga. Este fato causa transtorno na operação de descarga no virador, gerando custos adicionais com manutenção e limpeza, além de diminuir a disponibilidade dos equipamentos. Sebastião Breda, supervisor do Centro de Controle do Porto, compartilhou que a utilização trouxe ganhos de produtividade e segurança para os empregados que atuam nesta atividade por meio da utilização da tecnologia.

O Freeport-McMoRan, mineradora americana sediada em Phoenix, Arizona utiliza *drones* para monitorar e avaliar com maior proximidade e em ângulos que olho humano não alcança, a face da rocha em suas minas em tempo real, enquanto explode a rocha para construir as encostas das minas. O uso de drones permite uma visão objetiva e orientada por dados dos ângulos da inclinação. Isso significa uma leitura mais precisa que permite a Freeport-McMoRan construir declives mais íngremes, deslocando menos rochas e gastando menos recursos para acessar o corpo de minério. A Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos concedeu à Freeport-McMoRan uma isenção em maio de 2015 para usar drones para tirar fotos e vídeos em tempo real para monitorar operações de explosão, condições ambientais e segurança de minas.(WEF, 2017)

Uma das maiores demandas dentro da mineração são soluções para análise do teor de minérios em tempo real durante o processo para melhor controle da utilização de reagentes. A LLK desenvolveu um sistema via câmeras hiperespectrais que determina em aproximadamente 2 minutos o teor com uma precisão entre 96 e 98%, criando um sistema, em média, 60 vezes mais rápido que testes manuais de laboratório, como são utilizados hoje. A solução ganhou um dos desafios no *Mining Hub* e foi adotada pela companhia Vale. (LLK, 2019)

A segurança operacional dos trabalhadores é um questão central e de aplicação em diversos casos nas grandes mineradoras. As mineradoras Rio Tinto, Anglo American e Newcrest Mining estão fornecendo as trabalhadores de campo capacetes inteligentes para controlar a fadiga por meio do monitoramento das suas ondas cerebrais. O SmartCap usa um eletroencefalograma (EEG) e algoritmos proprietários para calcular uma avaliação de risco. (TRACTICA, 2016) A Vale também adotou tecnologias com o mesmo por meio da utilização do sistema Optalert em óculos especiais. Estes são responsáveis por detectar a sonolência e emitir sinais visuais e sonoros tanto ao funcionário quanto à central de monitoramento (ABM, 2018).

A Mira Geociência fornece soluções para aplicação no gerenciamento de dados para exploração, recursos e avaliação de perigos geotécnicos. Por meio de tecnologias de visualização em 4d e 3D, combinando todas as informações

geológicas relevantes e observações geotécnicas, a solução mitiga os riscos como a entrada de água em minas do Canadá, África do Sul e Austrália. (WEF, 2017)

Coordenar a produção em várias plantas e obter uma visão holística da cadeia de suprimentos de minério de ferro é uma realidade mais próxima na mineradora BHP Billiton. Em 2013, foi inaugurado o Integrated Remote Operations Centre (IROC) localizado em Perth. O IROC fornece uma visão em tempo real de toda a Austrália Ocidental da cadeia de suprimento de minério de ferro e permite controlar remotamente a mina de Pilbara. Gerenciamento de frota de minas, sistemas de controle de trens e de controle de plantas fixos para minas e operações portuárias, enquanto sistemas de CFTV e rádio são usados para se comunicar com o pessoal no local. (HBS, 2015). A brasileira, Vale, implementou o primeiro Centro de Operações Integradas em Minas Gerais em 2017. "O objetivo do projeto é sincronizar ainda mais as diversas etapas da operação no Brasil e no exterior e aproximá-la com a área de vendas, ganhando-se assim em eficiência e realização de preços". O Advanced Planning and Scheduling (APS) Ferrosos e o Sistema de Otimização da Alocação de Navios (SOAN) são dois dos principais sistemas utilizados para monitorar e melhorar a eficácia do planejamento da cadeia de valor. (VALE, 2017)

A solução Integrated Planning and Optimization Solution (IPOS) da Schneider Electric foi desenhada para empresas de mineração. A solução fornece visibilidade em toda a empresa desde o gerenciamento de produtos, compras, gerenciamento de energia e cadeia de suprimentos. Por meio da otimização da cadeia, a solução alega o aumento de produtividade em até 20%, redução do consumo de água e energia. (Schneider Electric, 2013)

A utilização de operações autônomas e robótica tem a capacidade de gerar valor a indústria através do aumento da produção, capacidade de operar 24 horas por dia, 365 dias por ano em um constantemente alto nível de produtividade. A necessidade de trabalhadores em uma mina se torna menor, o que diminui o custo da mineradora. Alguns processos da cadeia produtiva podem ser realizadas de

forma mais eficiente por máquinas do que seres humanos, como por exemplo na extração do minério ou por meio de drones na exploração. O benefício também é evidente em relação a segurança operacional. Aumentar a segurança do trabalhador, especialmente em situações de extremas condições como as encontradas em minas subterrâneas ou usinas a quente, reduzindo o número e a gravidade de incidentes de segurança. (WEF, 2017)

O impacto da utilização de tecnologias nem sempre é positivo para todos. O corte de empregos é evidente e as estimativas preveem que até 2027, haverá um corte de 5% da força de trabalho na indústria de mineração. Isso pode ser particularmente prejudicial para as comunidades locais em áreas remotas onde as minas são um principais e dos poucos empregadores. Em relação ao meio ambiente, a utilização de máquinas autônomas em relação ao consumo menos combustível e emissão de menos CO<sub>2</sub> gera benefícios para toda sociedade. (WEF, 2017)

#### **V. 1.6 Nanotecnologia, Biotecnologia e Materiais Avançados**

A biotecnologia remete para a utilização da engenharia genética, para a biologia celular e para a ciência da computação com o objetivo de obter novos produtos ou modifica-los, utilizando para isso o genoma de organismos vivos. Serve também para melhorar animais e plantas ou desenvolver determinado tipo de micro organismos para um fim específico. (IEL, 2018)

Por meio da manipulação de algumas substâncias orgânicas é possível obter uma série de produtos melhorados e mais resistentes como é o caso, por exemplo, de vacinas, medicamentos ou terapias, plantas que conseguem ter maior resistência a pragas, etc.

A biotecnologia divide-se em três grupos principais de desenvolvimento. São eles (IEL, 2018):

- a) Biotecnologia verde, utilizada na agricultura;
- b) Biotecnologia vermelha, aplicada à saúde humana e animal; e
- c) Biotecnologia branca, utilizada nos processos industriais.

Por sua vez, a nanotecnologia é um processo que se utiliza da manipulação de partículas em escala nanométrica e cujo objetivo é a modificação das características de materiais já existentes, procurando melhorá-los. Tal como a biotecnologia, também a nanotecnologia é classificada em duas vertentes: nanoestruturas vitais, que são utilizadas em eletrônicos, em sensores e em drogas objetivas; e os nanosistemas, que são utilizados na robótica, em montagens moleculares e em estruturas supramoleculares (IEL, 2018).

Em relação aos materiais avançados, estes envolvem materiais comuns mas que foram algo de melhoras e que, em função desse aspecto, apresentam melhor desempenho dos que os tradicionais. Os materiais avançados dividem-se em cinco grupos principais, a saber (IEL, 2018):

- a) Nano materiais;
- b) Materiais auto regenerativos;
- c) Materiais de alto desempenho;
- d) Materiais de fontes renováveis; e
- e) Produtos que resultam do refino de terras raras.

São materiais com ampla utilização e que servem para, por exemplo, produzir embalagens, estruturas inteligentes, fungicidas, materiais para impressão de circuitos eletrônicos, impressão em 3D, materiais biodegradáveis, ímãs para utilização em motores industriais e veículos, dentre outros.

A utilização destas tecnologias no setor da mineração pode ser aplicado em remediar a água contaminada pela indústria mineradora, com a utilização de alguns minerais que fazem aderir os materiais tóxicos tornando possível a sua remoção da água. Permite também que sejam utilizados na reparação de estruturas

de apoio dos equipamentos, diminuindo os custos de manutenção e aumentando a segurança dos mesmos. Tiago (2019) explica que é possível fabricar placas de rejeitos que podem ser utilizadas na construção civil, proporcionando alguma utilidade a esse material que, caso contrário, ficaria depositado e acumulado nas barragens de rejeitos.

A APWorks produz equipamentos com a utilização de impressora 3D. As peças metálicas são “otimizadas bionicamente”, inspirado em estruturas orgânicas e com aplicação em uma ampla gama de indústrias. A companhia utilizou a tecnologia para produção de uma motocicleta de pequenas partículas de liga de alumínio. O motocicleta usa peças de estrutura oca que contêm o cabos e tubulações. O quadro pesa cerca de 30% menos do que as motos eletrônicas convencionais, a estrutura oca ramificada são impossíveis de construir via tecnologias de produção convencionais, como moagem ou soldagem. (WEF, 2017)

A utilização de impressão 3d traz benefícios e malefícios para indústria de mineração. Em relação ao malefícios, devido à demanda reduzida impulsionada pela substituição de produtos metálicos por não metálicos. Já os benefícios podem ser considerados os as reduções de custo em manutenção, estoque de peças de reposição e tempo de inatividade não planejado. O meio ambiente também é beneficiado pelo uso dessa tecnologia, a adoção mais difundida levará uma redução de emissões de CO<sub>2</sub> e resíduos por unidade produzida. (WEF, 2017)

Verifica-se assim que a utilização da biotecnologia, nanotecnologia e materiais avançados possibilitam reduzir os impactos ambientais da mineração, diminuir o consumo de água e a liberação de dióxido de carbono. Sendo uma forma das mineradoras diminuírem o impacto que a atividade traz ao meio ambiente. Além disso, a partir da melhora da qualidade do materiais utilizados, permite-se a diminuição dos custos e aumento da receitas para as mineradoras.

#### **IV. 1.7 Novas tecnologias de armazenamento de energia**

As novas tecnologias e as inovações têm tornado a energia solar e a energia eólica, bem como o armazenamento de carga, mais acessíveis. Os materiais que são relacionados ao armazenamento de energia e também aqueles que são utilizados para a criação de materiais mais leves ou resistentes vão vendo a competição pela sua posse, cada vez mais intensificada, à medida que vão se tornando mais essenciais na cadeia produtiva (MITCHELL, 2019).

Uma vez que as energias alternativas são mais baratas e considerando que os gastos com as energias comuns utilizadas na indústria mineradora representam, segundo Alves (2019) 30% dos custos operacionais de uma mina, o impacto da aplicação destas novas tecnologias é considerável, tanto a nível econômico, como a nível ambiental. Da mesma forma que a exploração de vanádio, um dos principais componentes de baterias para estocagem de energia será impulsionada por esse fato.

Embora estas inovações tecnológicas pareçam importantes para a melhoria dos processos produtivos das mineradoras, há ainda muito a percorrer já que nem sempre as inovações são aplicadas, existindo alguma resistência na sua adoção, até mesmo pelos custos que as mesmas podem implicar. De qualquer forma, os ganhos para a indústria parecem evidentes.

#### ***IV.2 O potencial valor das novas tecnologias***

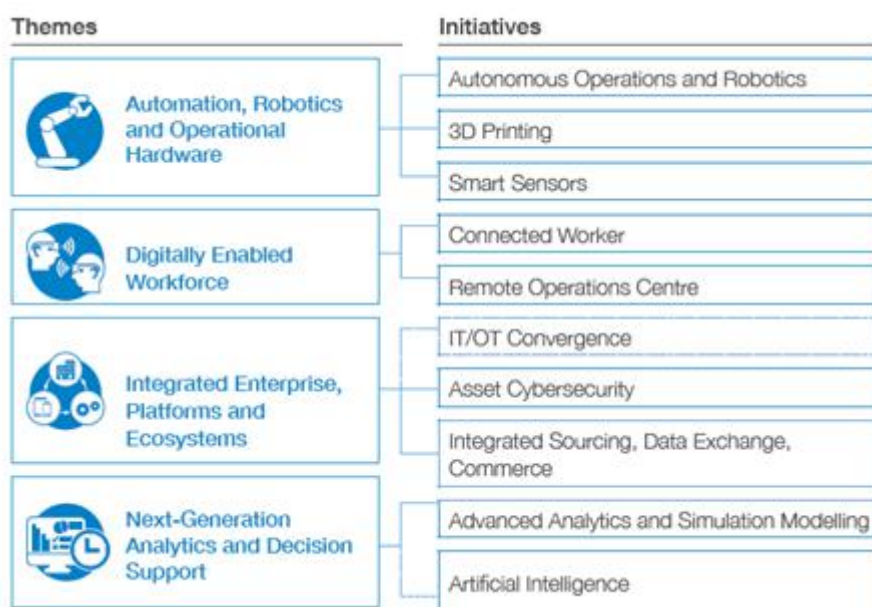
A Iniciativa de Transformação Digital (DTI) é um projeto lançado pelo Fórum Econômico em 2015 como parte da Iniciativa do Sistema para moldar a futura economia e sociedade digital. É uma iniciativa contínua e que serve como ponto focal no Fórum Econômico Mundial para novas oportunidades e temas decorrentes dos últimos desenvolvimentos na digitalização dos negócios e da

sociedade. Ele suporta a atividade mais ampla do fórum em torno do tema da Quarta Revolução Industrial. (WEF, 2017)

O projeto foi dividido em 4 principais temas e categorizados nas iniciativas detalhadas na figura 7 abaixo :

- 1) Automação, Robótica e Hardware Operacional
- 2) Trabalhadores digitalmente ativos
- 3) Empresa Integrada, Plataformas e Ecossistemas
- 4) Próxima geração de Análise e Decisão

**Figura 7 – Temas Digitais e Iniciativas em Mineração e Metais**



Source: World Economic Forum

A atual sessão visa focar no potencial econômico, ambiental e social que estas tecnologias podem destravar no setor de mineração. A metodologia utilizada buscou avaliar o impacto da transformação digital na indústria, clientes, sociedade e meio ambiente. Em relação a indústria, o projeto dividiu dois elementos: o impacto potencial nos lucros operacionais de uma indústria que será gerado a partir de iniciativas digitais (agregação de valor) e lucros operacionais que mudarão entre diferentes vertentes do setor (migração de valor). Valor em jogo para a sociedade mede o impacto do valor da transformação digital para clientes, sociedade e meio ambiente.



**Figura 8 – Valor cumulativo em jogo pela digitalização em mineração e metais (2016-2025)**

	Adoption rate – mining, 2025 (%)	Adoption rate – metals, 2025 (%)	TOTAL ECONOMIC BENEFITS						NON-ECONOMIC BENEFITS			
			Value migration (\$ billion)	Total value addition – industry (\$ billion)	Value addition – mining industry (\$ billion)	Value addition – metal industry (\$ billion)	Value shift – customers (\$ billion)	Value shift – society and environment (\$ billion)	Reduction in CO2 emissions (million tonnes)	Lives saved (#)	Injuries reduced (#)	Jobs created (#)
(01) Smart Sensors	20%	22%	\$0	\$34	\$9	\$25	\$0	\$8	161	-	-	-39,826
(02) Autonomous Operations	25%	15%	\$0	\$56	\$47	\$8	\$0	\$19	396	257	10,076	-59,663
(03) 3D Printing	25%	25%	\$0	\$0	\$0	\$0	\$1	\$2	35	-	-	-
(04) Connected Worker	50%	25%	\$0	\$85	\$59	\$26	\$0	\$0	-	471	21,789	-200,541
(05) Remote Operations Centre	30%	30%	\$0	\$77	\$65	\$12	\$6	\$1	16	248	12,462	-11,910
(06) Asset Cyber Security	75%	75%	\$0	\$21	\$5	\$16	\$0	\$0	-	-	-	-
(07) Integrated Platforms	15%	15%	\$0	\$37	\$2	\$35	\$69	\$0	-	-	-	-5,110
(08) Advanced Analytics	25%	25%	\$0	\$11	\$2	\$8	\$0	\$0	-	-	-	-13,094
Cumulative total 2016 - 2026			\$0	\$321	\$189	\$130	\$76	\$30	608	976	44,317	-330,144

Source: World Economic Forum/Accenture analysis

Fonte: Fórum Econômico Mundial, 2016

O projeto estimou um benefício econômico acumulado no valor de período de 2016 a 2025 varia de US \$ 428 bilhões - US \$ 784 bilhões. Em termos de benefícios ambientais e sociais, a digitalização tem o potencial de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 600 milhões de toneladas, 1.000 vidas e evitar mais de 44.000 feridos na próxima década. Em relação a perdas de empregos na indústria estima-se que a digitalização irá impactar 330.000 empregados. Na escala desses impactos, essas estimativas equivalem a quase 10% das vidas que seriam perdidas, 20% das lesões que ocorreria e 5% dos empregos na indústria que deixariam de existirem. Os centros de operações remotas por meio dos ganhos de produtividade e corte de custo de empregados podem agregar US \$ 65 bilhões em valor para o setor de mineração. As plataformas integradas podem beneficiar de reduções de preços de fornecedores no valor aproximado de US \$ 69 bilhões. Operações autônomas têm o potencial de reduzir consumo de combustível e energia, criando benefícios para a sociedade em geral de cerca de US \$ 19 bilhões. Embora os ganhos de produtividade proporcionados pelas trabalhadores podem trazer aproximadamente US \$ 86 bilhões, eles também poderiam resultar na perda de aproximadamente 200.000 empregos.

As tecnologias da indústria 4.0 tem potenciais enormes de benefícios econômicos e não econômicos. Impactos disruptivos na forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. O potencial é claro porém a forma e a velocidade que a indústria irá adotar e realizar tais benefícios, conseguiremos comprovar apenas nos próximos anos. No quadro 3 podemos encontrar a sínteses dos resultados, com os principais aplicações dos clusters, a etapa da aplicação na cadeia produtiva e seus principais benefícios.

**Quadro 3: Síntese dos Resultados**

<b>Cluster tecnológico</b>	<b>Principais Aplicações</b>	<b>Etapa de Aplicação na cadeia produtiva</b>	<b>Benefícios Esperados</b>
<b>Inteligência Artificial e Machine Learning</b>	Veículos Autônomos; Perfuradoras automáticas; Soluções em Cloud, Estimativa geológica, Detecção corpos de minério, Pesquisa geológica; Segmentação Mineral	Aplicações em toda cadeia produtiva	Aumento da eficiência e produtividade; Redução de gargalos produtivos; Redução de custos; Redução do impacto ambiental e riscos aos trabalhadores; Aumento da vida útil de equipamentos; Redução da Liberação de CO <sub>2</sub> ; Otimização da utilização do combustível; Melhoria da capacidade de planejamento de lavra
<b>Big data e Advanced Analytics</b>	Ferramentas de monitoramento; Modelos que possibilitam avaliar o potencial das jazidas; Análises de parâmetros geometalúrgicos; risco desastres industriais Modelagem de simulação e utilização de cenários hipotéticos identificando gargalos ou padrões de resíduos	Aplicações em toda cadeia produtiva	Aumento da eficiência e produtividade; Redução de custos; Aumento da eficácia energética; Previsibilidade do mineral; Redução de gargalos produtivos; Decisões em tempo real
<b>Blockchain</b>	Rastreamento de máquinas e peças; Criptografia de dados de mineração, Rastreamento de cargas de minério	Aplicações em toda cadeia produtiva	Aumento da eficiência e produtividade; Redução do tempo de inatividade inesperado Redução da utilização de papel; Transparência dos dados; Origem dos minerais; autenticação da origem das peças de reposição; conformidade e práticas éticas
<b>IoT</b>	IoT; RF ID's; Teor de metais pesados; Integrar toda a cadeia produtiva; Teor de metais pesados; Pressão interna de pneus de caminhões; monitoramento de bolhas rastreamento geoespacial humano	Aplicações em toda cadeia produtiva	Aumento da eficiência e produtividade; controle e automação Redução de acidentes; Estabilidade operacional; redução do impacto ambiental; , previsibilidade de operações; monitoramento de toda captação; segurança operacional; prevenção de tempo de inatividade e manutenção preditiva

<p><b>Produção Inteligente e Redes de Comunicação</b></p>	<p>Centro de Operações Integradas Drones, Robótica, Realidade Virtual, Realidade Aumentada; Manufatura aditiva; Robótica autônoma; Gerenciamento de frota de mina; Softwares avançados; Prospecção; mapeamento e monitoramento das barragens de rejeitos; mapeamentos dos vagões carregados; análise do teor de minérios</p>	<p>Processamento do Minério, Exploração, Beneficiamento</p>	<p>Estabilidade operacional; Melhorar a Segurança Operacional, Planejamento Integrado, Decisões em tempo real; interligar toda a cadeia de suprimentos,</p>
<p><b>Nanotecnologia, biotecnologia e materiais avançados</b></p>	<p>Impressão 3D, Modificação e Reutilização das Placas de Rejeitos; Pesquisas ligas nano estruturadas à base de magnésio; resistência mecânica de microestruturas em silício; estudos topográficos e espectroscópicos de interfaces eletrificada</p>	<p>Processamento do Minério, Recuperação dos minérios, Recuperação e reaproveitamento de resíduos</p>	<p>Otimização do tempo de inatividade não planejado; Redução dos custos de manutenção; Aprimoramento da segurança dos equipamentos; Otimização do Consumo de água; Redução do consumo de Energia; Redução da liberação de CO<sub>2</sub>; Monitoramento e controle de barragens e riscos ambientais; Emissões de gases do efeito estufa</p>
<p><b>Armazenamento de energia</b></p>	<p>Utilização de baterias de zinco-argônio recarregáveis; armazenamento de água marinha em reservatórios de altitude; equipamentos elétricos a bateria</p>	<p>Aplicações em toda cadeia produtiva</p>	<p>Melhorar a eficiência energética; Redução do consumo de Energia; Redução dos custos;</p>

## CONCLUSÕES

A inovação tecnológica revela-se extremamente importante para o desenvolvimento da sociedade, no geral e, em específico, para a economia e o mercado. As sucessivas revoluções industriais transportaram consigo um desenvolvimento ao nível dos processos produtivos e a aplicação de novas tecnologias e sistemas que proporcionaram novas máquinas, novas metodologias e melhorias na produção e otimização dos recursos humanos e financeiros.

Na indústria de mineração, uma das mais importantes para o Brasil, pelo seu impacto econômico, sobretudo no que diz respeito às exportações, bastante representativas na balança comercial, esses impactos também se fizeram sentir, em função da adoção e aplicação de algumas inovações tecnológicas inseridas no conceito de Indústria 4.0.

O problema colocado era perceber como a adoção das inovações tecnológicas podia provocar uma mudança na forma como a mineração era feita até então e como isso poderia influenciar em termos da produtividade e eficiência nesse setor. Esta é uma questão importante, na medida em que o setor de mineração é um dos mais importantes e, juntamente com soja e o petróleo, no que diz respeito à balança comercial brasileira.

A proposta foi, primeiramente, apresentar as sucessivas revoluções industriais, suas causas e principais contribuições em termos industriais e inovações tecnológicas, que influenciaram e promoveram o desenvolvimento econômico e social do Brasil.

Como forma de contextualizar a questão das inovações tecnológicas, abordaram-se algumas correntes teóricas como as defendidas por Schumpeter e Perez, que permitiram relacionar questões econômicas e de mercado, com o surgimento das revoluções tecnológicas, suas inovações e como estas se mostram importantes no crescimento econômico. Entende-se que apesar da difusão do conceito de uma Indústria 4.0, não podemos caracterizar como o momento atual

como um novo paradigma ou novo ciclo e sim uma consolidação da quinta revolução tecnológica.

Apresentar uma panorâmica da indústria de mineração revela-se também importante, já que permite, não só proporcionar uma ideia de como esta indústria funciona mas também como as inovações tecnológicas podem contribuir para o seu desenvolvimento e aumento da produtividade.

Para conseguir dar respostas aos objetivos e ao problema, foi adotada uma metodologia de pesquisa bibliográfica, com a consulta e coleta de informação em publicações e autores que abordaram todos esses temas e, de acordo com essa informação apresentar esses resultados.

Verificou-se, em resposta ao problema levantado, a indústria de mineração vem adotando algumas das inovações tecnológicas resultantes da indústria 4.0, como por exemplo, a inteligência artificial, as redes de comunicação, a nanotecnologia, a internet das coisas entretanto não podemos afirmar que as novas tecnologias serão capazes de reformular a cadeia produtiva tradicional. A aplicação das tecnologias aperfeiçoa os seus processos produtivos, aumenta a produtividade e eficiência operacional em todos os processos, amplia os seus resultados financeiros, monitora a gestão de recursos humanos, aumenta a segurança das instalações e seus funcionários. A importância da biotecnologia, que apesar de não ir de encontro com a conclusão do projeto *Indústria 2027*, mostrou-se relevante e contribui em relação a questão ambiental que é um dos principais problemas quando se fala em mineração e os seus impactos.

Outro aspecto observado, foi em relação a criação dessas fontes das inovações serem externas, ou seja, criadas por fornecedores especializados e não por mineradoras. Sendo estas, apenas as demandantes de tais tecnologias e não dominantes do processo de inovação.

Alguns aspectos que limitaram a análise, apesar de haver inúmeras literaturas relacionadas com a indústria 4.0 e as inovações tecnológicas associadas, não existe assim tanta informação em relação à sua utilização especificamente na realidade brasileira, com abordagens mais aprofundadas ou em relação aos vários aspectos

que compõem todo o processo produtivo da mineração e também, em relação à sua utilização por empresas brasileiras.

Maior número de estudos relacionados com a aplicação das inovações tecnológicas na indústria mineradora brasileira e seus impactos, tanto nas empresas como no setor seriam importantes e trariam maior informação para pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

ABM, Revista. **Energia Limpa**, n. 650, v. 74, 2018.

ALMEIDA, P. **O Brasil e a nanotecnologia**: rumo à quarta revolução industrial. 2005. Espaço Acadêmico, Maringá, a. VI, n. 52, set. 2005.

ALVES, R. Concentração no setor se mantém. **Revista Brasil Mineral**. Ano XXXVI, n.392, p.20-21. jul. 2019b

AMORIM, J. E. B. A “Indústria 4.0” e a sustentabilidade do modelo de financiamento do regime geral da segurança social. **Cadernos de Direito Actual**, Santiago de Compostela, v. 5, p.243-254, 2017. Disponível em: <<http://www.cadernosdedereitoactual.es/ojs/index.php/cadernos/article/view/132/93>>. Acesso em: 16.mar.2020.

ANGLO AMERICAN, “**Embracing the future: 6 innovative mining projects**”, 11 September 2015, <http://www.angloamerican.com/media/our-stories/six-innovative-mining-projects>.

ANDRADE, Maria. **Introdução à metodologia do trabalho científico**: elaboração de trabalhos na graduação, 10 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010.

ARAÚJO, J. **Resíduos da mineração**. Desafios para o futuro. Ministério de Minas e Energia. 2017.

BOETTCHER, M. **Revolução Industrial** - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0. LinkedIn. 26 nov. 2015. Disponível em:<<https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>>. Acesso em: 16.fev.2020.

BASSAN, J. AND KNIGHTS, P. F. (2008). **Applications of advanced analytics in minerals processing plants - Safer, smarter, sustainable operations**. MetPlant 2008 - Metallurgical Plant Design and Operating Strategies, August 18, 2008-August 19, 2008.

BRASIL. **Estatísticas Comércio Exterior, balança comercial**, 2020. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/balanca-comercial-brasileira-acumulado-do-ano>. Acesso em: 28.mar.2020.

BARBOSA, Viviane da Silva Borges. Análise de cobertura e capacidade da comunicação móvel para automação em minas inteligentes a céu aberto. 2016.

\_\_\_\_\_. **Participação do minério de ferro na Balança Comercial**, 2020. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: 28.abr.2020.

BRAVERMAN, Harry. Trabalho e capital monopolista: a degradação do trabalho no século XX. 3. ed. Rio de Janeiro: Zahar editores, 1980.

BCG – Boston Consulting Group. *Value creation in mining 2019: Return to Strategy*. 2019.

BRIGHTMORE, D. **How H Robotics is disrupting** the mining sector with its aerial drone HiSight. Mining Global Magazine. p.30-43, fev. 2019.

CALEIRO, João. **Quem ganha e Quem Perde com a Quarta Revolução Industrial**. Revista Exame, 2018. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/economia/quem-ganha-e-quem-perde-com-a-quarta-revolucao-industrial/>. Acesso em: 19.mar.2020.

CASTRO, A. d. et al. **Cadeias produtivas e sistemas naturais**: prospecção tecnológica. Brasília, Brasil: EMBRAPA–SPI, 1998

GOMES, E.; BRAGA, F.. **Inteligência competitiva em tempos de big data**: analisando informações e identificando tendências em tempo real. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017.

CAVALCANTE, Z. V.; SILVA, M. L. S. da. A importância da Revolução Industrial no mundo da Tecnologia. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 7. 2011. Maringá. **Anais** eletrônico. Maringá. 2011. Disponível em:<



[https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wp-content/uploads/sites/86/2016/07/zedequias\\_vieira\\_cavalcante2.pdf](https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wp-content/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf)>. Acesso em: 20.fev.2020.

CHAVES, A. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. V1, 2. Ed. São Paulo: Signus, 2002.

CIRIACO, Douglas. **O que é inteligência Artificial**, 2008. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/intel/1039-o-que-e-inteligencia-artificial-.htm>. Acesso em: 17.mar.2020.

COELHO, P. M. N. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/36992>>. Acesso em: 16.mar.2020.

COLPO, I.; WEISE, A.D.; NETO, R.O. -Aplicação do Método de Custo Baseado em atividades na Cadeia Produtiva Mineral. **Anais... XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Salvador, BA, 2013. Disponível em [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013\\_TN\\_STO\\_179\\_021\\_21936.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_179_021_21936.pdf). Acesso em: 19.mar.2020.

CONCEIÇÃO, C. S. **Da revolução industrial à revolução da informação: uma análise evolucionária da industrialização da América Latina**. 2012.

COSTA, Achyles. **O desenvolvimento econômico na visão de Joseph Schumpeter**. Caderno Unisinos, ano 4., n. 47, 2006.

DIAS, E. **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. 2001, Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DRUCKER, P. O futuro já chegou. **Revista Exame**, v. 22, n. 03, 2000 DAQRI, “The Gateway to Augmented Reality” , 2016, <http://daqri.com/home/product/daqri-smart-helmet>.

FADEL, B.; MORAES, C. As Tecnologias da informação e a cultura organizacional: suas implicações no ambiente informacional das organizações. *In*: ENCONTRO DE PESQUISADORES DO UNI-FACEF, 9., 2008.

FERNANDES, F. R. C. **Recursos minerais e comunidade** - impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

FRAGA, A. B. Da rotina à flexibilidade: análise das características do fordismo fora da indústria. **Revista Habitus**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, 2005.

FREEMAN, Christopher; PEREZ, Carlota. Structural crisis of adjustment: business cycles and investment behavior. *In*: DOSI, G. et al. (Ed.). Technical change and economic theory. London: Pinter Publisher, 1988.

GERMANY TRADE & INVEST - GTAI. **Industrie 4.0**: Smart manufacturing for the future. Berlin: GTAI, 2014. Disponível em: < <https://www.manufacturing-policy.eng.cam.ac.uk/documents-folder/policies/germany-industrie-4-o-smart-manufacturing-for-the-future-gtai/view> >. Acesso em: 08.abr.2020.

GONÇALVES, Hugo. **A Internet das Coisa na mineração**. Monografia (Bacharel em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

INSTITUTO MINERALE . **Como a Internet das Coisas Industrial está mudando a indústria de mineração**. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/como-a-internet-das-coisas-industrial-esta-mudando-a-industria-de-mineracao>. Acesso em: 14 abr. 2020.

IEL – INSTITUTO EUVALDO LODI. **Síntese dos resultados**. Volume 1 – Tecnologias disruptivas e indústria: Situação atual e avaliação prospectiva, 2018. Indústria 2027: riscos e oportunidades para o Brasil diante de inovações disruptivas. 2018.

JÉBRAK, Michel. Innovations in mineral exploration: Targets, methods and organization since the first globalization period. **Université du Québec à Montréal**: Sciences de la Terre et de l'atmosphère and CIRST, 2005.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0**: Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Frankfurt, 2013.

KAUL, ADITYA AND WHEELOCK, Clint, “**Whitepaper: Enterprise Wearable Technology Case Studies**”, Tractica, Q2 2016, <https://www.tractica.com/wp-content/uploads/2016/04/WP-EWCS-16-Tractica.pdf>.

KUPFER, David. HANSENKLERVER, Lia. **Economia industrial** : fundamentos teóricos e práticas no Brasil / organizadores : David Kupfer ; Lia Hasenclever. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2002.

KAUL, Aditya and Wheelock, Clint, “Whitepaper: Enterprise Wearable Technology Case Studies”, Tractica, Q2 2016, <https://www.tractica.com/wp-content/uploads/2016/04/WP-EWCS-16-Tractica.pdf>.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos da metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LASSANCE, M. C.; SPARTA, M. A orientação profissional e as transformações no mundo do trabalho. **Revista Brasileira de Orientação Profissional**, v. 4, n. 1-2, p. 13-19, 2003.

LEE SUN, “BHP Billiton – Remotely Resourcing the Future”, Technology and Operation Management, Harvard Business School, 9 December 2015, <https://rctom.hbs.org/submission/bhp-billiton-remotely-resourcing-the-future>

LUZ, A. et al. **Tratamento de minérios**. 4 ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

LLK. **LLK é escolhida para desenvolvimento de tecnologia de análise de materiais para a Vale através do M-START**. Disponível em: <https://llk.com.br/llk-venge-projeto-minninghub/>. Acesso em: 7 jun. 2020.

MACIEL, A. P.; LONGO, E.; LEITE, E. R. **Dióxido de estanho nanoestruturado: síntese e crescimento de nanocristais e nanofitas**. Quím. Nova, v. 26, n. 6, p. 855-862, 2003.

MCCRAW, T. K. **O Profeta da Inovação: Joseph Schumpeter e a destruição criativa**. Rio de Janeiro: Record, 2012.

MELLO, I. **A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no Estado de São Paulo: Diretrizes e ações para inovação e competitividade**. Capítulo 2. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004.

MESQUITA, Pedro; MEIRELLIS, Thamyris; PEREIRA, Guilherme. **Mineração e metalurgia**. Visão 2035: Brasil, país desenvolvido. Agendas setoriais para o alcance da meta. BNDES, 2018. Disponível em: [http://www.cosemssp.org.br/wp-content/uploads/2019/02/BNDES\\_Visao\\_2035\\_compl\\_P-Dez-2018.pdf](http://www.cosemssp.org.br/wp-content/uploads/2019/02/BNDES_Visao_2035_compl_P-Dez-2018.pdf). Acesso em: 16.mar.2020.

MESQUITA, Pedro; CARVALHO, Pedro; OGANDO, Laura. **Desenvolvimento e inovação em mineração e metais**. BNDES Setorial, 43, p. 325-361, 2016.

Disponívem em:

[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9577/2/BS%2043%20Desenvolvimento%20e%20inova%C3%A7%C3%A3o%20em%20minera%C3%A7%C3%A3o%20e%20metais.%20\\_P\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9577/2/BS%2043%20Desenvolvimento%20e%20inova%C3%A7%C3%A3o%20em%20minera%C3%A7%C3%A3o%20e%20metais.%20_P_BD.pdf). Acesso em: 19.mar.2020.

MORAIS, R. R.; MONTEIRO, R. A indústria 4.0 e o impacto na área de operações: um ensaio. **In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE**, 5., 2016, São Paulo. Anais... São Paulo, 2016.

MOREIRA, Herivelto; CALEFFE, Luiz. **Metodologia da pesquisa para o professor pesquisador**. 2. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2008.

MCKINSEY'S. **Produtividade em operações de mineração: Revertendo a tendência de queda**. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/productivity-in-mining-operations-reversing-the-downward-trend/pt-br>. Acesso em: 30 dez. 2005.

MORICOCCHI, Luiz. GONÇALVES, José S. **TEORIA DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE SCHUMPETER: UMA REVISÃO CRÍTICA**. Informações Econômicas, São Paulo, 1994. v.24, n.8. p. 27-35.

MELLO, I. S. D. C; CORTEZ, Waldyr Dantas; FIAMMETTI, I. C. C. A Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais: para Revestimento no Estado de So Paulo DIRETRIZES E PARA INOVAÇÃO E COMPETITIVIDADE. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas**: IPT, São Paulo, Volume, Número, p. XX-YY, dez./2005. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/342374612/A-Cadeia-Produtiva-Para-Rochas-Ornamentas-e-Para-Revestimento-No-Estado-de-Sc3a30-Paulo-Artigo#>. Acesso em: 6 abr. 2020.

NELSON, Richard. R. **Technology, institutions, and economic development**. In: DRECHSLER, W.; KATTEL, R., REINERT, E. (Org.). Techno-economic paradigms: essays in honour of Carlota Perez. London: Anthem, 2011.

NERY, M. A. C. **Gestão de recursos minerais como fator de desenvolvimento**. I Congresso Internacional de Direito Minerário. Salvador: IBRAM, 2010.

NETO, Euler. **Os impactos da indústria 4.0 na mineração**. Monografia (Bacharel em Ciências Econômicas), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

NETTO, Ângelo; SANTOS, Allan. **A atuação da siderurgia no Brasil no segmento de aços longos e a relação comercial entre Brasil e China.**

Monografia (Especialização em Gestão Estratégica) – Instituto Santanense de Ensino Superior, São Paulo, 2009.

NOTAS GEO. **A mineração e a Primeira Revolução Industrial.** Disponível em: <https://www.notasgeo.com.br/2018/01/a-mineracao-e-primeira-revolucao.html>. Acesso em: 12 mar. 2020.

NOTASGEO. **A mineração e a Segunda Revolução Industrial .** Disponível em: [https://www.notasgeo.com.br/2018/01/a-mineracao-e-segunda-revolucao\\_43.html](https://www.notasgeo.com.br/2018/01/a-mineracao-e-segunda-revolucao_43.html). Acesso em: 12 mar. 2020.

NOTASGEO. **A mineração e a Terceira Revolução Industrial.** Disponível em: <https://www.notasgeo.com.br/2018/01/a-mineracao-e-terceira-revolucao.html>. Acesso em: 12 mar. 2020.

NEUTZLING, Daiane M. PEDROZO, Eugenio A. Reinterpretação da destruição criadora de Schumpeter pela ótica da complexidade, estruturas dissipativas e rizoma. **Revista Científica Internacional Indexada.** 2009. Ano 2. n 06 , p.18.

O'CONNOR, MARY CATHERUINE, “At Goldcorp’s Éléonore Mine, the IoT Is Worth Gold”, RFID Journal, 12 March 2015,  
<http://www.rfidjournal.com/articles/view?12804>.

ORIWOH, E.; SANT, P.; EPIPHANIOU, G.. **Guidelines for Internet of Things Deployment Approaches – The Thing Commandments.** Procedia Computer Science, Reuno Unido, v. 21, p. 122-131, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.018>>. Acesso em: 16.mar.2020.

PEREZ, C. **Revoluciones tecnológicas y capital financiero: la dinámica de las grandes burbujas financieras y las épocas de bonanza.** México: Siglo XXI, 2004.

PFOHL, H. C.; YAHSI, B.; KURNAZ, T. **Concept and Diffusion-Factors of Industry 4.0 in the Supply Chain. In: Dynamics in Logistics.** Springer International Publishing, 2017.

PAIOLA, C. **As aplicações de Realidade Aumentada na Indústria 4.0.** *Portal Indústria 4.0.* mai. 2019.

PERKINS JAMES, “**Internet of Things improving Goldcorp operations**”,

SAMSSA, 12 March 2015, <http://samssa>.

PROCHNIK, V. **Cadeias Produtivas e Complexos Industriais**. *In*:

HASENCLEVER, L.; KUPFER, D. Organização Industrial. Ed. Campus, 2002.

Disponível

em:[http://www.ie.ufrj.br/cadeiasprodutivas/pdfs/cadeias\\_produtivas\\_e\\_complexos\\_industriais.pdf](http://www.ie.ufrj.br/cadeiasprodutivas/pdfs/cadeias_produtivas_e_complexos_industriais.pdf). Acesso em 15.03.2020.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. **A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond**. *Procedia CIRP*, v. 52, p. 173-178, 2016.

QUARESMA, L. **O Mercado Brasileiro de Minério de Ferro: Sua Instabilidade e a Possibilidade de Associação dos Países Exportadores**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Geociência da UNICAMP. Campinas. 1987.

RIBEIRO, Andressa. Taylorismo, fordismo e toyotismo. **Lutas Sociais**, v. 19, n. 35, p. 65, jul./dez, São Paulo, 2015. Disponível em:

<https://revistas.pucsp.br/ls/article/viewFile/26678/pdf>. Acesso em: 07.abr.2020.

RIBEIRO, R.; CUNHA, S. Mitsubishi: organização da produção e do trabalho. **Revista da ABET**, v. 5, n. 1, 2005.

RODRIGUES, L. F.; JESUS, R. A.; SCHÜTZER, K. **Industrie 4.0**: Uma revisão da literatura. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 19, n. 38, p. 33-45, 2016.

ROSEMBERG, Nathan. **Por dentro da caixa-preta** : tecnologia e economia.

Tradução José Emílio Maiorino. Campinas, SP: Ed.da Unicamp, 2006.

RIO TINTO, “**Next-generation mining: People and technology working together**”, Rio Tinto, 2014, <http://www.riotinto.com/>

SIRINANDA, K. **The new dawn of mining**. *Mining Global Magazine*. p.60-87, fev. 2019.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SIMON ELLIS et al., “ **IDC FutureScape: Worldwide Manufacturing 2020 Predictions** ,” Doc. # US45594819, IDC, October 2019.

SCHUMPETER, Joseph. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. São Paulo: Nova Cultural, 1988.

\_\_\_\_\_. SCHUMPETER, Joseph A. **Capitalismo, socialismo e democracia**. 2ª. ed., Rio de Janeiro: Zahar, 1984.

SILVA, M. C. A. da.; GASPARIN, J. L. **A Segunda Revolução Industrial e suas influências sobre a Educação Escolar Brasileira**. 2015. Disponível em:<  
[http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer\\_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Marcia%20CA%20Silva%20e%20%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf](http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Marcia%20CA%20Silva%20e%20%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf)>.  
Acesso em: 5.mar.2020.

SCHNEIDER ELETRIC, “**Increase your mining productivity by up to 20% - Integrated Planning and Optimization Solution realizes your resource-to-market potential**”, 2013 [http://download.schneider-electric.com/files?p\\_Reference=998-1223667\\_GMA-GB&p\\_EnDocType=Brochure&p\\_FileId=791268470&p\\_FileName=Integrated\\_Planning\\_Optimization.pdf](http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=998-1223667_GMA-GB&p_EnDocType=Brochure&p_FileId=791268470&p_FileName=Integrated_Planning_Optimization.pdf).

SILVA, D.; SILVA, R.; GOMES, M. O reflexo da terceira revolução industrial na sociedade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2002.

SLN, “**Drones Become New Tool in U.S. Mine Safety, Operations Oversight**”, Financial LC, 26 June 2015  
<http://asq.org/qualitynews/qnt/execute/displaySetup?newsID=20418>.

SINGER, P. **Desenvolvimento capitalista e desenvolvimento solidário**. Estudos avançados, v. 18, n. 51, p. 7-22, 2004.

SCHNEIDER ELECTRIC. “**Increase your mining productivity by up to 20%**”. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/SchneiderElectric/ipos-launch-cim->



show. Acesso em: 19 mai. 2020.

THIRY-CHERQUES, Hermano. **Sobreviver ao trabalho**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2004.

TIAGO, E. Transformação digital está em curso nas mineradoras. **Valor Econômico**. 09 de set. de 2019b. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/09/09/transformacao-digital-esta-em-curso-nas-mineradoras.ghtml>>. Acesso em: 15.mar.2020.

VENTURELLI, M. **A segurança de dados na Indústria 4.0**. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/seguranca-de-dados-na-industria-4-0/>>. Acesso em: 16.mar.2020.

VALE. **Pátio ferroviário: uso de drone traz ganhos de eficiência e segurança**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/patio-ferroviario-uso-de-drone-traz-ganhos-de-eficiencia-e-seguranca.aspx>. Acesso em: 3 mai. 2020.

VALE. **Você sabe o que é Indústria 4.0?**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/industria-40/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 3 mai. 2020.

VALE. **Vale implanta centro operacoes integradas minas gerais**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-implanta-centro-operacoes-integradas-minas-gerais.aspx>. Acesso em: 26 abr. 2020.

WEISS, A.; HUBER, A.; MINICHBERGE não garante a paz de espírito. R, J. IKEDA, M. **First Application of Robot Teaching in an Existing Industry 4.0 Environment: Does It Really Work?** Societies, v. 6, n. 3, p. 20, 2016.

WORLD ECONOMIC FORUM, **Digital Transformation Initiative Mining and Metals Industry**, The World Economic Forum: committed to improving the state of the world, Switzerland, 2017 Disponível em: <https://reports.weforum.org/digital-transformation/>. Acesso em: 26 jan. 2020.

WE FORUM. **4 ways blockchain will transform the mining and metals industry**. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2018/07/4-ways-blockchain-will-transform-the-mining-and-metals-industry/>. Acesso em: 8 abr. 2020.

ZAWADZKI, P.; ŻYWICKI, K. **Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept**. Management and Production Engineering Review, v. 7, n. 3, p. 105-11