

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

EULER DALTRO CESÁRIO NETO

OS IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

UBERLÂNDIA – MG

2019

EULER DALTRO CESÁRIO NETO

OS IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

Monografia apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas

Orientador: Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

UBERLÂNDIA – MG

2019

EULER DALTRO CESÁRIO NETO

OS IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

Monografia apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas

Orientador: Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

BANCA EXAMINADORA:

Uberlândia, 17 de dezembro de 2019

Prof. Dr. Germano Mendes de Paula (orientador)

Profa. Dra. Ana Paula Macedo de Avellar

Profa. Marisa dos Reis Azevedo Botelho

Assim como todos que testemunham tempos como este, mas não cabe a eles decidir, o que nos cabe é decidir o que fazer com o tempo que nos é dado.

*Olórin, o Cinzento
3019 da Terceira Era do Sol*

RESUMO

O estudo objetiva investigar os impactos das tecnologias da Quarta Revolução Industrial sobre a mineração. A literatura relacionada ao processo inovativo é utilizada como referencial teórico, ao passo que a análise dos *clusters* relevantes são empregadas como instrumentos para classificação das tecnologias em grupos que apresentam similaridades. Os resultados apontam que a inovação se desenvolve majoritariamente por meio de fornecedores especializados e com caráter incremental. Os principais objetivos buscados por essas tecnologias são melhora na capacidade de planejamento, elevação da eficiência produtiva, redução de riscos físicos e dos impactos ambientais, ao passo que as principais barreiras estão relacionadas à resistência das empresas à implementação de novas tecnologias, pois ainda carecem de comprovações acerca de seus resultados.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Mineração; Mudança Tecnológica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Índice de Hirschmann-Herfindall para os produtos minerais, 2017.....	32
Figura 2: Possibilidades de implementação de novas tecnologias na cadeia de valor mineral.....	34
Figura 3: Como o machine learning pode gerar valor ao longo da cadeia mineral.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: As ondas sucessivas de progresso técnico	16
Quadro 2: Percepção das empresas brasileiras consultadas quanto à difusão das tecnologias disruptivas na mineração mundial, 2017, 2022 e 2027	35
Quadro 3: Percepção das empresas brasileiras consultadas quanto à difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na mineração mundial em 2027....	37
Quadro 4: Síntese dos resultados	63

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
1. REFERENCIAL TEÓRICO	11
1.1. O conceito de inovação para os clássicos	11
1.2. O pensamento inovativo a partir de Schumpeter e Neoschumpeterianos.....	18
2. UMA VISÃO AGREGADA DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO	23
2.1. O que é a indústria 4.0	23
2.2. Uma breve caracterização da mineração.....	28
2.3. Uma visão agregada da difusão de novas tecnologias na mineração.....	33
3. APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO	39
3.1. Acerca do procedimento	39
3.2. Inteligência Artificial.....	39
3.3. Big data	44
3.4. Internet das Coisas	49
3.5. Produção inteligente e conectada e redes de comunicação.....	51
3.6. Nanotecnologia, Biotecnologia e Materiais Avançados	57
3.7. Armazenamento de energia.....	60
3.8. As principais barreiras à implementação das novas tecnologias	64
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
REFERÊNCIAS	71

INTRODUÇÃO

Inovação é, sem dúvida, palavra de ordem em termos de competitividade para empresas e países. O termo Indústria 4.0 descreve o uso crescente de inovações tecnológicas com potencial disruptivo em processos e produtos, utilizados para desenvolver novos setores, otimizar e expandir as indústrias existentes, além de poder alterar os paradigmas técnico-econômico vigentes. Isso pode variar de sistemas de controle computacional a ferramentas de dados que ajudam a agilizar operações, abrindo portas para melhores serviços e novas oportunidades de geração de receitas (BSA, 2018).

Hermann, Pentek e Otto (2016) definem a Indústria 4.0 como um conjunto de melhorias nos processos industriais. Khan e Turowski (2016) a interpretam como uma revolução possibilitada pela aplicação de tecnologias avançadas no nível da produção, envolvendo a integração dos espaços ciberfísicos na manufatura e logística e o uso da internet nos processos industriais, de forma a conectar poderosos sistemas físicos ao universo digital e permitindo-os realizar operações inteligentes. O desenvolvimento dessas tecnologias com o objetivo de reduzir custos e elevar a eficiência energética integram a estratégia de transformar dados em lucro.

A inovação é um fenômeno horizontal e abarca todos os setores, mesmo aqueles mais tradicionais. Dessa forma, o presente trabalho busca analisar a aplicação e implicações das tecnologias da Indústria 4.0 para a mineração, motivado pelo argumento de que, diante do caráter temporário intrínseco a essa atividade a nível territorial, o desenvolvimento dessas tecnologias no setor remodelará sua estrutura produtiva pela imposição da necessidade de desenvolver processos mais eficientes e flexíveis. A escolha da mineração para essa monografia se justifica tanto pela sua importância histórica quanto pela sua relevância nas mídias, devido principalmente aos desastres ambientais ocorridos na última década. Tem-se também que essa indústria se vê forçada a inovar, pois a tendência observada pela mesma é que se trabalhe cada vez mais com matérias-primas de pior qualidade. Junto a isso está o fato de que, dado de que as *commodities* minerais podem ser consideradas homogêneas, espera-se que exista uma propensão à queda no seu preço no longo prazo e, dessa forma, apenas os melhores *players* serão capazes de sobreviver nesse mercado. Portanto, é importante entender a forma com que a mineração será impactada pelas inovações tecnológicas.

Assim, este trabalho se propõe a examinar o padrão de uso das novas tecnologias na mineração, identificando as formas com que as inovações são aplicadas e as perspectivas quanto à sua difusão. Como instrumental metodológico será utilizada a análise documental, buscando estruturar os princípios, objetivos e metas dos objetos da análise. Além desta introdução e das considerações finais, o trabalho apresenta outros três capítulos. No capítulo 1 será discutida a fundamentação teórica acerca do processo inovativo e do papel dos paradigmas técnico-econômicos. No capítulo 2 será apresentado a Indústria 4.0, seguido de uma breve caracterização do setor minerador e uma visão geral acerca do estágio de aplicação das novas tecnologias no mesmo. O capítulo 3 discutirá empiricamente a difusão da Indústria 4.0 na mineração, com enfoque nos *clusters* tecnológicos relevantes para a mineração, além de uma breve exposição sobre as barreiras existentes à implementação e difusão dessas novas tecnologias.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. O conceito de inovação para os clássicos

Adam Smith publicou seu livro, *A Riqueza das Nações*, em 1776 e foi o primeiro autor a reconhecer a relação entre avanço tecnológico e crescimento econômico. A explicação desse último era concentrada na indústria de transformação e no comércio, diferindo dos fisiocratas, que conferiam a expansão da renda à produtividade agrícola (FREEMAN, SOETE, 2008).

Smith atribui o aumento da produtividade à introdução de maquinário e à divisão do trabalho. A inovação era resultado do “aprender fazendo”, ou seja, da busca por melhorar as formas de realizar tarefas, por meio da observação e da experiência. O autor argumenta que a divisão do trabalho aumenta a quantidade de trabalho realizado de três formas: (i) a repetição de tarefas pelo trabalhador ao longo dos anos permite que ele adquira maior destreza, encontrando formas mais eficientes de executá-las; (ii) a especialização evita os deslocamentos dos trabalhadores e economizaria o tempo da troca de ferramentas. O produto é que passaria de mão em mão, ideia essa que deu origem à linha de montagem; (iii) a aplicação de máquinas torna possível aumentar o ritmo de trabalho, substituindo a força humana e permitindo incorporar trabalhadores menos fisicamente habilitados. Smith atribui os aperfeiçoamentos nas máquinas aos “filósofos”, cujo ofício não é fazer as coisas, mas observar cada coisa, e que muitas vezes são capazes de combinar entre si as forças e poderes dos objetos mais distantes e diferentes (TIGRE, 2006).

Em consonância com Smith, os economistas clássicos acreditam que, por meio das máquinas, será possível aumentar a produtividade do trabalho e a oferta de mercadorias e, de acordo com a lei de Say, devem também elevar a demanda, o que torna o desemprego apenas temporário. David Ricardo (1817), seguindo a hipótese de Smith de que o aumento do capital é a principal fonte de crescimento, também trata da questão do progresso técnico. Entretanto, o autor argumenta que a introdução de novas máquinas substitui o trabalho humano e gera desemprego, pois os empresários não têm necessariamente que aumentar a massa de salários para auferir lucros superiores, demonstrando aritmeticamente que a automação pode elevar o produto líquido (lucro)

sem que haja crescimento proporcional no produto bruto e, como o emprego da população depende do produto bruto, haveria redução na demanda de trabalho.

Porém, em edição posterior da sua obra, Ricardo ameniza os impactos negativos da automação, enfatizando que o aumento do produto líquido leva a uma maior facilidade de transferir recursos para o capital. O reinvestimento de lucros em máquinas leva a aumento de produtividade, que será refletido para a população por meio da redução dos preços e, dessa forma, o aumento do consumo alimentaria o investimento. Surge então a necessidade de empregar mais trabalhadores, revertendo parte do desemprego causado pela automação (FREEMAN, SOETE, 2008).

Na segunda metade do século XIX ocorreu um aprofundamento do processo de industrialização europeu, que ficou conhecido como a “Segunda Revolução Industrial”. Do ponto de vista do pensamento econômico, esse período foi bastante fértil, dando origem a duas correntes opostas de interpretação do sistema capitalista: de um lado, Karl Marx retoma, de forma crítica, a tradição da escola clássica, para elaborar a teoria do valor trabalho; de outro, começa a ser desenvolvido a chamada teoria neoclássica, cuja base foram os princípios de equilíbrio geral de Leon Walras.

A mudança tecnológica é um elemento fundamental na obra de Marx. Ele a considerava um elemento endógeno e presente nas relações produtivas e de valorização do capital, argumentando que as inovações em bens de capital e o aprofundamento da divisão social do trabalho constituem a base técnica necessária para a acumulação de capital. Marx entende que a inovação é uma forma de obter um monopólio temporário sobre um processo ou produto, permitindo que a empresa responsável pela inovação usufrua de lucros acima da média e acumule capital em escalas superiores aos concorrentes – o que para o autor é chamado de mais-valia extraordinária (TIGRE, 2006).

A preocupação de Marx com a tecnologia não está limitada ao seu papel na dinâmica econômica. O avanço tecnológico permite ao capital explorar a força de trabalho de forma mais intensa, refletindo no aumento da composição orgânica do capital, na produtividade do trabalho e na redução relativa da demanda de trabalho, que conseqüentemente pode contrair os salários. Dessa forma, o avanço técnico é responsável pelo surgimento do “Exército Industrial de Reserva”¹.

¹ Conceito desenvolvido em O Capital e refere-se à população trabalhadora excedente e necessária para a existência do modo de produção capitalista, de modo a substituir a força de trabalho empregada, caso

Marx entende o processo competitivo como uma busca pela eliminação de rivais, no qual a estrutura concorrencial não se sustenta diante da inovação tecnológica. Como os investimentos em máquinas e os aumentos das escalas requerem um capital cada vez maior, os capitalistas que não possuem esse montante mínimo são excluídos do processo produtivo, permitindo assim a Concentração e a Centralização do Capital². A competição intercapitalista leva o capital a buscar sempre novas formas de inovar para eliminar a concorrência. Para um capitalista permanecer no mercado, mais cedo ou mais tarde teria que investir em inovações e abandonar as formas tradicionais de produção. Dessa forma, o progresso técnico é compreendido como condicionante do aumento de produtividade e geração de lucros, além de responsável pela evolução do sistema capitalista (TIGRE, 2006).

A economia neoclássica, dominada pelo modelo walrasiano de equilíbrio geral, cujos objetos centrais de estudo são a formação de preços e a alocação de recursos, atribui à firma o princípio comportamental de maximização de lucro, deixando-a numa posição passiva frente ao mercado e limitada a transformar fatores de produção em produtos. Nesse contexto, a questão tecnológica deixa de ocupar uma posição de interesse no meio ortodoxo, que tem como preocupação central questões relacionadas ao equilíbrio geral. As possibilidades tecnológicas eram usualmente representadas por uma função de produção, no qual a tecnologia é um fator exógeno e disponível no mercado.

A partir dos anos 1890, a abordagem neoclássica incorpora avanços no sentido de tratar a inovação como variável explicativa da dinâmica capitalista. Segundo Higachi (2006 *apud* TIGRE, 2006), dois avanços teóricos na redução do caráter exógeno da tecnologia merecem destaque:

O primeiro é a introdução de um novo conceito de tecnologia, pelo qual esta deixa de ser considerada um bem público puro e passa a ser considerada um bem econômico passível de exclusão. O segundo consiste em introduzir a concorrência imperfeita em alguns setores da economia de forma a justificar a 'sobra' de produto para remunerar as

necessário. Para o funcionamento desse sistema capitalista, é necessário que parte da população esteja permanentemente desempregada. Esse conjunto de desempregados atua como inibidor das reivindicações trabalhistas e contribui para o controle sobre os preços dos salários (FORTES, 2018).

² A concentração resulta do crescimento dos capitais individuais, por meio do aumento do investimento nas unidades produtivas ou pela agregação de outros capitais. A centralização do capital é a concentração de capitais já constituídos, ou seja, a transformação de muitos capitais menores em poucos capitais maiores (FILHO et. al., 2013)

atividades inovadoras, admitindo assim a existência de retornos crescentes à escala na geração de novas tecnologias (TIGRE, 2006, p. 26).

No início do século XX se inaugura uma nova trajetória para a organização interna da firma. Inovações organizacionais possivelmente originadas de Andrew Carnegie entraram em rápida difusão. Se desenvolve a grande empresa industrial e o oligopólio se transformou na estrutura de mercado comum de vários setores. O amadurecimento das novas fontes de energia permite a exploração mais ampla das economias de escala e dos sistemas integrados de produção (como a linha de montagem fordista). Se consolida o processo de concentração e internalização da pesquisa e desenvolvimento (P&D) industrial e a inovação passa a ser cada vez mais interligada à ciência (FREEMAN, SOETE, 2008).

Frederick Taylor introduz, em 1911, os princípios da administração científica, propondo a divisão completa entre o trabalho manual e o trabalho intelectual: o primeiro seria responsável pela execução de tarefas predefinidas e o último buscaria formas mais rápidas de realizar tarefas. Henry Ford, baseado nestes princípios tayloristas, inaugura em 1913 a sua primeira linha de montagem de automóveis com completa padronização, visando a facilitar a montagem e reduzir a variedade de estoques de componentes (TIGRE, 2006).

Com a disseminação da estrutura oligopolizada, as teorias neoclássicas de concorrência são colocadas em xeque. A noção de rendimentos decrescentes de escala é um princípio particularmente inadequado frente ao crescimento das empresas, sendo necessária uma revisão de seus fundamentos. Um dos primeiros economistas a questionar essas teorias foi Pietro Sraffa (1926 *apud* TIGRE, 2006) que, ao observar a incompatibilidade entre retornos decrescentes e economias de escala, leva-o a criticar a relação entre preços e custos, pois nota que diferentes escalas determinam diferentes custos de produção. Dessa forma, produtores mais eficientes podem trabalhar a preços menores ou obter maiores lucros, o que desequilibra o mercado.

A publicação de *Maturidade e estagnação no capitalismo americano* em 1952, de autoria de Josef Steindl, marca a primeira ruptura com a microeconomia neoclássica. O autor reconhece o papel crucial da diferenciação do produto e da inovação no processo de acumulação. Para ele, as assimetrias entre as firmas constituem um determinante das

transformações das estruturas de mercado, ao afirmar que empresas com menores custos e margem de lucros maiores têm maior possibilidade de crescer no longo prazo.

Os teóricos comportamentalistas, cujos precursores foram principalmente Hebert Simon, James March e Robert Cyert, rejeitam a hipótese neoclássica de que o objetivo das firmas é a maximização de lucros e compreendem a empresa como uma entidade composta de subgrupos de indivíduos com diferentes interesses, que podem ser conflituosos entre si. Como resultado, os objetivos adotados pela firma representam um compromisso que resolve os conflitos desses subgrupos, enfatizando que as formas de organização afetam as formas com que ocorrem os processos de tomada de decisões (TIGRE, 2006).

Edith Penrose (1959 *apud* TIGRE, 2006), em trabalho pioneiro, contribui para o entendimento do papel da tecnologia e do conhecimento ao argumentar que o conhecimento dá à firma um caráter único. A experiência, adquirida tanto formalmente quanto na forma prática, potencializa a capacidade de adquirir conhecimentos e utilizá-los no processo produtivo. A firma é basicamente uma coleção de recursos e cada empresa é diferente da outra, pois os trabalhos realizados são operações únicas e não podem ser perfeitamente reproduzidos. A criação de novos processos depende da capacidade da firma de internalizar esses conhecimentos e desenvolvê-los de forma eficiente. Assim, o sucesso de uma companhia no mercado não depende só de fatores externos, mas da capacidade dela de usar seus conhecimentos individuais e coletivos.

Um nome que se encontra frequentemente ao se investigar o surgimento de ciclos de longo prazo é o economista russo Nikolai Kondratieff (1892-1938). Ele observou os movimentos de séries como a produção de carvão e o consumo, o movimento do salário real, do comércio exterior, juros e níveis de preços de *commodities* ingleses e franceses, concluindo que existem flutuações econômicas que configuram ciclos longos, com duração média de 40 a 60 anos (que receberam posteriormente o nome de ondas de Kondratieff). Esses ciclos delimitam períodos de enormes mudanças econômicas e sociais, novas indústrias substituem antigas, surgem profissões, altera-se a cultura corporativa e se modificam os processos produtivos.

O autor identifica a existência de duas ondas e meia desde o século XVIII. Freeman (1997) vai adiante e identifica mais duas ondas de Kondratieff. O quadro 1 resume os principais aspectos das ondas encontradas.

Quadro 1: As ondas sucessivas de progresso técnico

Ondas ou ciclos longos		Principais aspectos			
Períodos aproximados	Ondas de Kondratieff	Ciência, tecnologia, ensino e treinamento	Transportes e comunicações	Fontes de energia	Fatores-chave universais e de baixo custo
Primeira 1780-1840	Revolução industrial: produção em fábricas de têxteis	Aprendizado no trabalho, aprender fazendo, escolas de dissidentes religiosos e sociedades científicas	Canais, estradas carroçáveis	Energia hidráulica	Algodão
Segunda 1840-1890	Era da energia a vapor e das ferrovias	Profissionais de Engenharia Civil e Mecânica, institutos de tecnologia, massificação do ensino primário	Ferrovias (trilhos de ferro), telégrafo	Máquinas a vapor	Carvão, ferro
Terceira 1890-1940	Era da eletricidade e da siderurgia	Laboratórios industriais de P&D, laboratórios nacionais de Química e Eletricidade, laboratórios de padronização industrial	Ferrovias (trilhos de aço), telefone	Eletricidade	Aço
Quarta 1940-1990	Era da produção em massa ("Fordismo") de automóveis e de materiais sintéticos	P&D governamental e industrial em larga escala, massificação do ensino superior	Autoestradas, rádio e TV, linhas aéreas	Petróleo	Petróleo, plásticos
Quinta 1990-?	Era da microeletrônica e das redes de computadores	Redes de dados, redes globais de P&D, treinamento e educação continuados	Canais de informação, redes digitais	Gás/Petróleo	Microeletrônica

Fonte: FREEMAN, SOETE (2008), p. 47.

De acordo com Kondratieff e Stolper (1935), a existência das ondas longas é condicionada por circunstâncias casuais e extra econômicas, como as mudanças técnicas na produção, guerras, revoluções, a incorporação de novos países na economia mundial e as flutuações na produção de ouro.

A mudança nas técnicas de produção é, de certo, influente na evolução do sistema capitalista. O desenvolvimento econômico é uma função das necessidades da vida real e do estágio precedente da ciência e das técnicas que se provaram economicamente viáveis. As invenções por si mantêm-se inefetivas enquanto as condições econômicas não se mostrarem favoráveis à sua aplicação, podendo ser exemplificado pelo grande número de invenções ocorridas nos séculos XVII e XVIII e que só encontraram usos em larga escala

no final do século XVIII, durante a Revolução Industrial (KONDRATIEFF, STOLPER, 1935).

Kondratieff observa que durante a fase recessiva das ondas longas ocorre um número particularmente alto de descobertas importantes e inovações nas técnicas de produção e comunicação, mas que não são aplicadas em larga escala nesse momento, sendo difundidas apenas na fase ascendente da próxima onda e sustentando a fase expansionista. Mas, para que isso ocorra, é necessário que as inovações tecnológicas permeiem todos os setores econômicos, se tornando pilares da recuperação econômica. Dessa forma, as inovações tecnológicas encontram aplicação generalizada e desencadeiam surtos de crescimento da produtividade e dirigem o crescimento. Durante essa fase de recuperação, o papel dos mercados financeiros é, em primeira instância, de funcionar como catalisadores da nova expansão (ALLIANZ, 2010).

No início de uma nova fase expansionista, os empreendedores geralmente precisam de uma quantidade considerável de capital para comprar essas novas tecnologias, surgidas na fase de depressão do ciclo anterior. Nesse momento, as taxas de juros altas não são um obstáculo, pois os empresários possuem fortes expectativas de ganho ao se implementar essas novas tecnologias. Depois de alguns anos, com a difusão dessas inovações, as tecnologias começam a oferecer retornos decrescentes sobre o investimento. Tem início então a fase contracionista, marcado pela busca incessante por inovações que, combinadas com o cenário desfavorável, tem sua difusão e aplicação em larga escala prorrogada. Como resultado dos retornos decrescentes sobre o investimento, a demanda por crédito desacelera e leva o juro real para próximo de zero no final da onda, assim como foi observado no pânico de 1837, na Grande Depressão de 1873, na crise de 1929, nas crises do petróleo de 1974 e 1980 e mais recentemente na crise financeira de 2008 (ALLIANZ, 2010).

Segundo Kondratieff, quando o potencial exploratório de uma antiga inovação básica se esgota, inicia-se um período de excesso de capital financeiro em detrimento da falta de investimentos em capital físico. Demarca-se então um período de grave recessão, que gera fortes transformações sociais e institucionais. Essa mudança no cenário econômico marca o fim de um ciclo, levando ao início de uma nova fase de crescimento, na qual ocorre a difusão e a utilização em larga escala das descobertas e inovações ocorridas durante o final da onda anterior.

1.2. O pensamento inovativo a partir de Schumpeter e Neoschumpeterianos

Para Schumpeter, o desenvolvimento econômico deve ser compreendido como um processo de mudança qualitativa e que nunca pode ser considerado estacionário, ocorrendo no tempo histórico e impulsionado pelo processo de destruição criadora. A inovação é definida como a criação de novas combinações de recursos já existentes, dando o rótulo de função empreendedora a essa atividade combinatória, da qual derivam resultados distintos e descontínuos em relação aos anteriores. Em sua teoria, a principal razão para a importância do papel dos empresários na busca do sucesso das inovações está na busca por quebrar a predominância da inércia, ou “resistência a novas maneiras”. O empresário inovador tem o papel de lutar para obter o monopólio temporário de sua inovação, aproveitando oportunidades, mobilizando as inversões em bens de capital e introduzindo novos produtos, sendo visto pelo autor como “herói” do desenvolvimento, em contraste com o capitalista “predador” definido por de Marx (FAGERBERG, 2004).

Schumpeter (1942) também compreende que o capitalismo não é estacionário, mas esse caráter evolutivo não se deve apenas ao fato de que a vida econômica transcorre em um meio natural e social que se modifica, e que em virtude dessa transformação altera a situação econômica. O fato é que essas mudanças produzem transformações industriais, mas não constituem o seu motor principal. O impulso que põe em funcionamento a máquina capitalista procede de novos produtos, métodos de produção, mercados e de formas de organização industrial. Há um processo permanente de mutação industrial, destruindo incessantemente os modelos antigos e criando elementos novos, processo esse que recebe o nome de destruição criadora.

Essas evoluções não são permanentes, num sentido estrito; ocorrem em explosões discretas, separadas por períodos de calma relativa. O processo, como um todo, no entanto, jamais para, no sentido de que há sempre uma revolução ou absorção dos resultados da revolução, ambos formando o que é conhecido como ciclos econômicos (SCHUMPETER, 1942, p.110).

Sobre a competição em Schumpeter, Tigre (2006) afirma que:

[...] o que conta não é o tipo de competição (perfeita, oligopolista ou monopolista), mas sim a competição oriunda de novos produtos, novas tecnologias, novas fontes de suprimento e novos tipos de organização que permitem o aumento da escala produtiva. Tal competição permite vantagens de custo e de qualidade decisivas para determinar as

margens de lucro e o crescimento da firma. Ao longo do tempo, as inovações resultam em queda de preços e crescimento da produção (TIGRE, 2006, p.45).

Mensch (1979 *apud* TIGRE 2006) atualiza a teoria dos ciclos inovativos de Schumpeter e desenvolve uma base empírica ao associar os surtos de crescimento ao surgimento de *clusters* de inovações, dando origem a setores inteiramente novos. Tais tecnologias permitem a criação de mercados de massa e geram crescimento econômico e aprimoramento contínuo de produtos e processos. Entretanto, em certo ponto a capacidade produtiva se torna grande demais e as exportações se tornam cruciais. À medida que outros países também passam por esse processo, a competição aumenta e desencadeia um processo de concentração. Empresários reduzem seus investimentos, preferindo aplicar no mercado financeiro, e isso dá origem a uma nova fase recessiva, no qual apenas um novo surto de inovações poderia tirar a economia da depressão.

A origem das teorias evolucionistas é dupla: por um lado Freeman (1974) demonstra como a difusão tecnológica se encontra no centro dos movimentos cíclicos da economia. Por outro Nelson e Winter (1982), baseados em Schumpeter, Simon, Penrose, Marris e em conceitos da biologia buscam incorporar a questão tecnológica das teorias da firma. Essas se distinguem dos modelos neoclássicos e da organização industrial por descartarem hipóteses básicas do pensamento convencional: rejeita-se as hipóteses de qualquer tipo de equilíbrio de mercado e de racionalidade substantiva dos agentes econômicos, na medida em que não é possível alcançar o equilíbrio em um ambiente marcado por flutuações de agentes individuais com capacidades distintas. Dessa forma, os mercados não são dotados de um mecanismo eficaz de eliminação de firmas incapazes de maximizar seu lucro e, a partir disso, a teoria evolucionista propõe a hipótese da pluralidade de ambientes de seleção, permitindo explicar a existência de distintas trajetórias tecnológicas e a grande variedade de estruturas de mercado (TIGRE, 2006).

No modelo desenvolvido por Nelson e Winter (1982), as ações das firmas são guiadas pelas rotinas, que são reproduzidas a partir da prática, como partes essenciais de sua “memória organizacional”. Os hábitos cotidianos variam entre as firmas, algumas são mais inclinadas à inovação, outras preferem seguir uma rota imitativa, o que demanda menos esforço, mas também gera menores resultados. Se uma rota leva a um resultado insatisfatório, a firma deve usar seus recursos para buscar um novo caminho que, caso satisfaça os objetivos da firma, irá ser adotada eventualmente. A estrutura organizacional da firma e seu conhecimento coevoluem de uma forma benéfica para as operações diárias

da firma, mas também podem restringir a capacidade da firma de absorver novos conhecimentos, resultando num *path dependency*. Arthur (1994) enfatiza que devem ser levados em consideração os problemas que esse processo pode causar: se uma firma escolher uma rota inovativa muito cedo, ela poderá usufruir de vantagens por ser pioneira, mas pode estar em graves problemas caso descubra que havia um caminho melhor, já podendo ser muito tarde ou dispendioso para mudar seu trajeto. Dessa forma, argumenta que, nas primeiras fases de uma inovação, a melhor estratégia que uma firma pode ter pode ser simplesmente evitar ficar preso a algo e se manter aberto a diferentes ideias ou soluções (FAGERBERG, 2004).

Organizar a firma para a inovação é uma tarefa delicada. Pesquisas nesta área têm apontado para a necessidade de empresas inovadoras permitirem que grupos de pessoas estejam suficientemente livres para experimentar novas soluções e estabelecer padrões de interação dentro da companhia, permitindo-as mobilizar toda a sua base de conhecimento quando confrontar novos desafios (VAN DE VEN 1999 *apud* FAGERBERG, 2004).

O conceito de paradigma tecnológico é atribuído a Dosi (1984), segundo ele:

[...] um paradigma tecnológico é um pacote de procedimentos que orientam a investigação sobre um problema tecnológico, definindo o contexto, os objetivos a serem alcançados, os recursos a serem utilizados, enfim um padrão de solução de problemas técnico-econômicos selecionados (KUPFER, 1996, p. 356)

Admitindo a existência desses paradigmas, a trajetória tecnológica surge como um padrão normal de solução de problemas, podendo ser definida como um padrão de progresso técnico que age por meio da solução incremental dos problemas explícitos do paradigma tecnológico³. Ela age, portanto, como um direcionador do progresso técnico e é dotado de poderoso efeito de exclusão, definindo quais oportunidades serão perseguidas e quais serão abandonadas. Evidentemente o conceito não é suficiente para explicar o fenômeno da mudança do padrão tecnológico: mesmo que se afirme que a crise do paradigma vigente seja a progressiva perda de sua capacidade inovadora, não é possível deduzir a partir disso a forma como surge um novo padrão “normal”. Dessa forma, não há saída a não ser reconhecer a possibilidade de existir um fator exógeno que determine o surgimento do novo paradigma (KUPFER, 1996). Dosi observa que os períodos em que ocorrem as principais inovações incrementais são marcados pelo surgimento de novos

³ Padrão “normal” deve ser entendido no sentido normativo, ou seja, o conjunto de regras que direcionam os procedimentos e critérios de validação, definidos pelo paradigma vigente.

paradigmas tecnológicos, os quais iniciam, por sua vez, suas próprias trajetórias tecnológicas (QUINTELLA, DIAS, 2002).

Da forma como são definidos, os paradigmas e trajetórias tecnológicos dependem dos interesses econômicos dos inovadores, da capacitação acumulada e de variáveis institucionais de fomento à inovação. Dosi (1982 *apud* KUPFER, 1996) sugere que, antes da seleção pelos mecanismos de mercado dos produtos (invenções), há uma seleção dos instrumentos de geração de mutações. Assim sendo, o paradigma e as trajetórias sofrem uma determinação parcialmente exógena ao mercado, pois o mesmo é considerado um mecanismo “fraco” de seleção da direção do progresso técnico, pois as trajetórias dos setores maduros muitas vezes não servem como explicação para o progresso que ocorre em indústrias nascentes⁴.

Em 1983 Carlota Perez introduz o conceito de paradigma técnico-econômico, demonstrando que períodos de quebra de paradigmas tecnológicos trazem consigo toda uma onda de novos produtos e processos, causando mudanças fundamentais na sociedade. Essas mudanças envolvem instituições e empresas em processos de transformação radical de suas estruturas e práticas gerenciais, criando novas competências à medida em que se destroem aquelas que atrapalham a propagação das novas tecnologias (QUINTELLA, DIAS, 2002).

Pavitt (1984 *apud* HERMIDA, XAVIER, 2012) busca desenvolver uma tipologia setorial, classificando as indústrias de acordo com o grau de desenvolvimento tecnológico, sendo desde então conhecida como taxonomia de Pavitt. A unidade básica de análise do autor é a firma inovadora e, sendo as patentes de inovação acumulativas, a trajetória tecnológica será determinada pelas mesmas e pelo o que elas determinaram no passado. Atividades inovativas em setores diferentes levam a trajetórias tecnológicas diferentes, o que pode ser explicado pelas diferenças setoriais em três principais características: (i) fontes de tecnologias (P&D próprio ou contratado); (ii) necessidades dos usuários (preços, desempenho e confiabilidade) e (iii) meios de apropriação dos lucros da inovação (segredo industrial e patentes).

Pavitt (1984) classificou as trajetórias das indústrias em quatro grandes grupos:

⁴ Tem-se de exemplo o desenvolvimento da indústria química na segunda metade do século XIX, que veio a marcar o desenvolvimento da segunda onda de Kondratieff, cuja trajetória não pode ser entendida como extensão lógica do desenvolvimento da primeira metade do século, baseada no progresso técnico da indústria têxtil britânica.

- Setores dominados por fornecedores: as empresas desse setor são geralmente fracas no processo de P&D e possuem base tecnológica muito pequena. As inovações nesses setores são principalmente de processos e a trajetória tecnológica é definida pela busca da redução de custos. Os principais mecanismos de apropriação são não-técnicos (marca, propaganda, estética).
- Setores intensivos em escala: a tecnologia nele é incorporada de modo a aproveitar os retornos de escala. A trajetória tecnológica é determinada pela busca por redução de custos, as fontes da tecnologia são fornecedores e a P&D interna e predominam as inovações em processo. Os principais mecanismos de apropriação são o segredo industrial, defasagens técnicas de seus concorrentes, patentes e economias dinâmicas de aprendizado.
- Fornecedores especializados: assim como nos setores intensivos em escala, a tecnologia é incorporada visando a aproveitar os retornos de escala. As fontes de tecnologia são majoritariamente internas e dependem da demanda dos clientes e predominam as inovações em produtos. As formas de apropriação são o *know-how* de projeto, conhecimento dos usuários e patentes.
- Setores baseados em ciência: as empresas têm por característica a alta oportunidade tecnológica e realizam atividades inovativas em laboratórios próprios. As inovações são geralmente de produtos e a apropriação se dá principalmente a partir de projetos especializados e patenteamento.

Tendo apresentado a teoria acerca da ocorrência do processo inovativo, o próximo capítulo discorrerá acerca da origem e características do suposto paradigma técnico-econômico emergente, denominado Indústria 4.0, que expressa a expectativa de que o processo se consolide na forma de uma quarta revolução industrial. Dado que o objetivo desse trabalho é analisar os impactos dessas novas tecnologias na mineração, o capítulo conterá também uma breve descrição do setor minerador e, em seguida, uma análise agregada das expectativas acerca da difusão e impacto esperados da Indústria 4.0 no mesmo, tendo como base o projeto Indústria 2027. Esse capítulo será complementado posteriormente com o capítulo 3, que busca aprofundar empiricamente na forma com que as novas tecnologias estão sendo implementadas nele.

2. UMA VISÃO AGREGADA DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

2.1. O que é a indústria 4.0

Almeida (2005) afirma que o mundo se encontra no limiar de uma nova revolução industrial: trata-se da transformação dos processos e produtos por meio da aplicação do infinitamente pequeno à vida diária. Essa revolução é bem mais importante e mais desafiadora do que aquelas que a precederam. A afirmação do autor antecede a definição do termo Indústria 4.0.

O uso cada vez mais generalizado de *softwares* nos diversos setores econômicos tem diversos nomes: fábricas inteligentes, tecnologia industrial e Indústria 4.0. O que cada um desses termos descreve é o uso crescente de tecnologias para desenvolver novos setores, otimizar e expandir as indústrias existentes, podendo ser capaz de alterar os paradigmas técnico-econômico vigentes. Isso pode variar de sistemas de controle computacional a ferramentas de dados que ajudam a agilizar operações, abrindo portas para modelos de negócios aprimorados, melhores serviços e novas oportunidades de geração de receitas (BSA, 2018).

O termo Indústria 4.0 foi cunhado em 2011 na Alemanha com o plano *High-Tech Strategy 2020*, que visa a consolidar a posição de liderança do país em inovação, reforçando sua posição enquanto uma das principais nações econômicas e exportadoras, priorizando as atividades de pesquisa inovadora, digitalização da produção, gestão energética sustentável, desenvolvimento de ambientes de trabalhos inovadores, mobilidades inteligentes e segurança informacional (DIE BUNDESREGIERUNG, 2012). Em 2013 o *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) reuniu representantes da indústria, do mundo acadêmico e da ciência para promover a aceleração do processo de desenvolvimento de novas tecnologias comerciáveis. A partir desse momento o governo alemão institucionaliza e reafirma seu compromisso com o avanço tecnológico de sua indústria (SANTOS et al., 2018).

O conceito de Indústria 4.0 se difundiu para as principais economias do mundo nesse período, inspirando a confecção de diversos planos para o desenvolvimento tecnológico. O governo norte-americano divulgou, em fevereiro de 2012, uma ampla estratégia para orientar os investimentos em P&D de tecnologias avançadas, de modo a resgatar a expressão que a indústria dos EUA teve no passado. No mesmo ano foi criado

o *National Additive Manufacturing Innovation Institute* (NAMII), primeiro dos institutos industriais criados no país. No final de 2014, com a aprovação pelo congresso do *Revitalize American Manufacturing Act*, os EUA avançaram na criação de uma Rede Nacional de Inovação Industrial, projetada para acelerar o desenvolvimento e a adoção de tecnologias avançadas. A estratégia norte-americana busca atingir cinco objetivos: (i) acelerar o investimento em tecnologia de produção industrial avançada, promovendo o uso mais eficaz das capacidades e instalações; (ii) ampliar o número de trabalhadores que possuem as habilidades necessárias para a produção manufatureira avançada; (iii) criar parcerias governo-indústria-academia para acelerar o investimento e aplicação de manufaturas avançadas; (iv) otimizar o investimento industrial avançado do governo federal e (v) aumentar o total de investimentos dos EUA em P&D industrial avançado (ALMEIDA, 2019).

Em maio de 2015 o governo chinês publicou o plano *Made in China 2025*, elaborado a partir de influências da iniciativa alemã e confeccionado pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação em parceria com a Academia Chinesa de Engenharia. O objetivo desse projeto é de aplicar as ferramentas de Tecnologias da Informação (TI) na indústria, promovendo maior integração, eficiência e qualidade, visando a mudar sua posição frente à indústria, propondo um plano para sair do papel de fábrica de produtos baratos para centro tecnológico internacional (NETO et al., 2018).

A Indústria 4.0 está mais consolidada no exterior do que no Brasil. O tema entrou na pauta governamental em 2017 como resultado de uma iniciativa da Confederação Nacional da Indústria (CNI), que em parceria com o Governo Federal e algumas instituições, buscou elaborar um plano de ações para a Indústria 4.0 no país. O projeto teve como líderes o então Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) e o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). O projeto resultou na publicação, em 2018, de um conjunto de estudos de impactos setoriais da Indústria 4.0 sob o nome Indústria 2027. A expectativa de disseminação do potencial dessas tecnologias é positiva, reconhecendo-se a premissa de acelerar esse processo para que não aumente o hiato frente à concorrência internacional (DE PAULA, 2018).

Hermann, Pentek e Otto (2016) definem a Indústria 4.0 como um conjunto de melhorias nos processos industriais. Khan e Turowski (2016) interpretam a Indústria 4.0 como uma revolução possibilitada pela aplicação de tecnologias avançadas no nível da produção, envolvendo a integração dos espaços ciberfísicos na manufatura e logística e o

uso da internet nos processos industriais, conectando poderosos sistemas físicos ao universo digital, fazendo-os realizar operações de maneira inteligente.

De acordo com Bitkom et al. (2016, p.12):

O termo Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, a próxima etapa na organização e controle de todo o fluxo de valor ao longo do ciclo de vida de um produto. Este ciclo baseia-se em desejos de clientes cada vez mais individualizados e varia desde a ideia, o pedido, desenvolvimento, produção e entrega ao cliente final, passando pela reciclagem e serviços relacionados (BITKOM et al, 2016, p.12).

Esses avanços oferecem vários benefícios às cadeias de valor: melhora a personalização, dinamiza os negócios, eleva a eficiência e reduz o desperdício, possibilitando que a produção em pequena escala se torne lucrativa. Há também o risco de que o futuro traga consequências indesejáveis – pelo menos para algumas partes da sociedade – se a mudança tecnológica não for direcionada para permitir resultados inclusivos e sustentáveis, nem seguir os princípios éticos acordados internacionalmente (DERNIS et. al., 2019).

Allianz (2010) afirma que estamos vivenciando a 6ª onda de Kondratieff, essa marcada pela megatendência do avanço da globalização e crescimento demográfico. Enquanto o último ciclo de inovações levou a um “tremendo aumento da produtividade do trabalho”, esse novo ciclo impõe ao sistema a necessidade de elevar a eficiência dos recursos e energia. Isso porque, sob as novas condições impostas pela globalização e por mudanças demográficas e climáticas, o crescimento provavelmente será guiado a partir de um novo *mix* de economia, ecologia e compromisso social. Além dessas duas tendências principais, que em conjunto resultam em tendências relacionadas à economia ecológica, o autor aponta a necessidade do desenvolvimento das estruturas de biotecnologia e nanotecnologia.

Os efeitos dessa revolução serão transversais a todas as atividades econômicas, incluindo os serviços e a agropecuária, mas apresentam o potencial de reconfigurar o setor industrial, alavancando expressivamente a produtividade, alterando profundamente modelos de negócios e as competências necessárias para a maior agregação de valor ao longo das cadeias (WONGTSCHOWSKI, 2019).

David Thomas, da SSR Mining, reconhece a Indústria 4.0 vem como uma possibilidade de flexibilizar a capacidade de produção das empresas no geral, afirmando que há atualmente benefícios em operar em menores escalas, pois aproveitando serviços

em nuvem reduz a necessidade de investir muito capital, o que torna a companhia mais ágil. Isso significa que, após alguns anos, se for necessário fazer algo diferente, a firma terá a capacidade disso. Se comparado com empresas de grande porte, muitas delas investiram centenas de milhões de dólares em infraestrutura, no entanto, sofrem de *lock-in* tecnológico (GALEA-PACE, 2019c).

A quarta revolução industrial é mais do que apenas a indústria em rede e alimentada por dados, subjacente a ela o terreno está sendo preparado para obter uma maior potência por meio de novos paradigmas técnico-econômicos. Diversos autores buscam afirmar o que é a Indústria 4.0, mas ainda não há um consenso de quais são os principais *clusters* tecnológicos. Por exemplo, para Fuchs (2018), a Indústria 4.0 é um conceito que engloba a combinação de Internet das Coisas (IoT), *big data*, mídias sociais, computação em nuvem, sensores, Inteligência Artificial (IA) e robótica, buscando aplicações na produção, distribuição e uso de bens. Hermann, Pentek e Otto (2016) apresentam quatro princípios básicos que a Indústria 4.0 deve buscar, sendo eles: (i) assistência técnica, na forma em que as tecnologias devem servir como ferramentas auxiliares aos humanos, não esperando a substituição completa do trabalhador; (ii) interconectividade, responsável por criar um ambiente de trabalho colaborativo e seguro, esse último relacionado ao fato de que cada indivíduo será capaz de conhecer o que está acontecendo em outras partes do processo produtivo; (iii) descentralização decisória, no qual cada equipamento ou trabalhador pode decidir como operar de forma mais eficiente na produção e (iv) transparência informacional, no sentido em que os diversos módulos produtores serão aptos a observar e analisar os dados referentes à produção. Paunov e Guellec (2019) destacam cinco dimensões das mudanças nos processos de inovação na era digital:

1. *Menores custos de produção*: As tecnologias digitais têm reduzido drasticamente vários tipos de custos, nomeadamente: (i) custos marginais de bens e serviços intangíveis; (ii) despesas de pesquisa, verificação, manipulação e comunicação de informações e conhecimentos e (iii) custo de lançar no mercado novos bens e serviços, especificamente aqueles com alto conteúdo de informação e conhecimento. Os processos e produtos que incorporam ou implementam tecnologias digitais são caracterizados pela sua fluidez, uma vez que os dados podem circular e ser reproduzidos, repartidos ou manipulados instantaneamente, em qualquer escala e sem custo. Uma vez disponibilizado, o conhecimento

digitalizado pode ser compartilhado instantaneamente entre um infinito número de atores, não obstante as barreiras geográficas e institucionais. Os efeitos se espalham por toda a economia, à medida que os produtos incorporam cada vez mais componentes. Essa característica afeta todos os processos econômicos, facilitando tanto a concorrência de novos entrantes, quanto a comercialização de novos produtos e a difusão do conhecimento;

2. *Dados como principal insumo*: As novas possibilidades de lidar com grandes volumes de dados os tornam insumos centrais para o processo inovativo em todos os setores da economia, permitindo o desenvolvimento de produtos novos personalizáveis e a otimização de processos. Diversas fontes de dados alimentam as inovações de várias maneiras, por exemplo, informações sobre comportamentos do consumidor podem ser usados para personalizar serviços ou desenvolver sistemas inteiramente novos. Devido à crescente importância das estatísticas, muitas empresas fazem grandes investimentos para acessá-los, seja configurando um sistema para coleta, seja adquirindo empresas ricas em dados ou realizando contratos com parceiros. Ao mesmo tempo, inúmeras outras ainda precisam desenvolver melhores aplicativos e infraestruturas de análise para aportar aos seus negócios o valor da análise de dados. Nesse contexto, a utilização de tecnologias de IA e de *machine learning* aumenta ainda mais o valor esperado dos dados;
3. *“Servitização”*: A transformação digital também cria oportunidades de inovação nos serviços. Em particular, surgem oportunidades de inovação para: (i) novos serviços, como a manutenção preditiva usando dados de IoT, transporte sob demanda e negócios baseados na *web*; (ii) aluguel ou compartilhamento como negócio ao invés de venda de equipamento e (iii) personalização de produtos, graças às capacidades dos *softwares* e dos dados gerados ao longo dos processos. Essas inovações têm como efeito eliminar a fronteira entre serviços e indústria de transformação, à medida que os fabricantes desenvolvem serviços para complementar seus produtos enquanto os provedores de serviços se lançam na produção manufatureira;
4. *Ciclos rápidos de inovação*: As tecnologias digitais aceleram os ciclos de inovação. O custo mais baixo de lançar novos produtos e processos usando a internet facilita a criação de versões exclusivas e a experimentação de produtos para clientes diferenciados. A simulação virtual e a impressão 3D aceleram o

design, a prototipagem e o teste, reduzindo os custos e o tempo entre o projeto e sua colocação no mercado. Além dos custos reduzidos de lançamento e difusão de produtos, outro fator da transformação digital é a natureza cumulativa das atualizações, reduzindo a canibalização do produto, isto é, a destruição criadora de seus próprios produtos por parte da empresa;

5. *Inovação colaborativa*: Graças aos custos reduzidos e à maior necessidade de interconexão, a inovação tornou-se mais colaborativa. O primeiro resulta do papel crescente dos dados no processo produtivo, enquanto o último provém da evolução da demanda, que exige a mistura de habilidades, conhecimentos e tecnologias.

A próxima seção caracterizará o funcionamento do setor minerador brasileiro e suas principais relações com o resto do mundo, demonstrando aspectos relacionados à sua estrutura de mercado e a forma com que ocorre o processo inovativo no mesmo. Ela abrirá espaço para apresentar, posteriormente, uma análise agregada das expectativas acerca da difusão e impacto esperados da Indústria 4.0 no mesmo, tendo como base para isso o projeto I2027.

2.2. Uma breve caracterização da mineração

Entende-se por mineração a extração e o beneficiamento de minerais, na condição de torna-los comercializáveis. A atividade mineradora engloba os processos de exploração, exploração⁵, beneficiamento e processamento de recursos minerais, os quais são concentrações de minério cujas características fazem com que sua extração possa ser economicamente viável. A mineração abrange, portanto, o conjunto de atividades necessárias para obter um produto mineral bruto, um concentrado ou um aglomerado, destacando entre as atividades a lavra (extração e transporte) e o beneficiamento (britagem, moagem, classificação, concentração e/ou aglomeração) (MESQUITA, CARVALHO, OGANDO, 2016).

⁵ Ato ou efeito de aproveitar economicamente determinados recursos, geralmente recursos naturais (Dicionário Priberam).

Uma peculiaridade da mineração, em termos de geração de emprego e renda, é que se trata de uma atividade temporária. Diferentemente da agricultura e da indústria de transformação, que são operações que, teoricamente, podem perdurar indefinidamente no tempo, na mineração as reservas uma hora se exaurem. Assim, é essencial levar em consideração a dimensão das reservas, sua possível duração e analisar como comunidades que se desenvolveram baseadas na atividade mineradora superaram as dificuldades oriundas do fim da extração mineral (DE PAULA, 2002).

Os minerais podem ser divididos em duas grandes categorias: os minerais não metálicos e os metálicos, que apresentam subdivisões. Os minerais não metálicos podem ser destrinchados em: (i) rochas e minerais industriais, por exemplo calcário, areia industrial, grafita e magnesita, cujas aplicações cobrem, por exemplo, a construção civil, agricultura, eletrônica, química e metalurgia; (ii) rochas ornamentais e de revestimento, como granito, mármore, ardósia e quartzo; (iii) materiais para construção civil, como areia, brita e argila; (iv) agrominerais, como o fosfato e o calcário agrícola; (v) minerais energéticos, como o carvão mineral; (vi) pedras preciosas e semipreciosas e (vii) água mineral. Os minerais metálicos podem ser distribuídos em três categorias: (i) metais ferrosos, podendo ser citado ferro, nióbio, manganês e cromo; (ii) não ferrosos, como alumínio, cobalto, cobre, zinco, terras-raras, vanádio e (iii) metais preciosos, como prata e ouro.

O Brasil tem 9.415 minas em regime de concessão de lavra, com apenas 2% podendo ser consideradas de grande porte – capazes de produzir acima de um milhão de toneladas por ano. Outros 11% são médias – produzem entre cem mil e um milhão de toneladas. A grande maioria, 87%, é formada por micro e pequenas empresas, com produção de até cem mil toneladas anuais. O setor ainda conta com 1.820 lavras garimpeiras, 13.250 licenciamentos (areia, cascalho e argila) e 830 complexos de água mineral (GOLDBERG, 2019).

A mineração representa aproximadamente 1,4% do PIB do Brasil. A pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil em 2018 atingiu um volume de 409 milhões de toneladas e representou US\$ FOB 29,9 bilhões. Já na importação, a mineração movimentou 42,8 milhões de toneladas e cerca de US\$ FOB 7,9 bilhões. O setor emprega cerca de 195 mil trabalhadores diretamente. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), o fator multiplicador da indústria extrativa mineral com a indústria de transformação mineral é de 1 para 3,6 postos de trabalho, ou seja, gera empregos para

cerca de 703 mil trabalhadores indiretamente. Ao longo da cadeia industrial o fator multiplicador é de 1 para 11 postos de trabalho, gerando, de forma direta, indireta e induzida cerca de 2,1 milhões de empregos (IBRAM, 2019).

No ano de 2018 a Produção Mineral Brasileira (PMB) registrada foi de R\$ 101,4 bilhões, contra um total nominal de R\$ 100,7 bilhões em 2017. O minério de ferro continua sendo responsável pelo maior valor da PMB, tendo somado R\$ 56,4 bilhões (o que equivale a 55,6% do valor total). Em segundo lugar ficou o ouro, com R\$ 9,3 bilhões (9,2%) e em terceiro o cobre, com R\$ 9,2 bilhões (9,0%). Outras substâncias importantes em termos de participação na PMB são a bauxita (R\$ 3,2 bilhões), calcário dolomítico (R\$ 3,1 bilhões), fosfato (R\$ 2,2 bilhões), granito (R\$ 2,1 bilhões), minério de manganês (R\$ 1,4 bilhão), níquel (R\$ 849 milhões), caulim (R\$ 825 milhões), minério de nióbio (R\$ 697 milhões), minério de estanho (R\$ 663 milhões), minério de zinco (R\$ 472 milhões) e minério de cromo (R\$ 209 milhões) (ALVES, 2019d).

Pelo lado das empresas, de um total de 7.902 recolhedores da Contribuição Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) em 2018, as 100 maiores responderam por 91,6% do total arrecadado, que somou R\$ 3,036 bilhões, enquanto as outras 7.802 tiveram uma participação de apenas 8,4%. Como o valor recolhido de CFEM guarda relação com a receita bruta auferida pelas empresas com a comercialização dos recursos minerais, observa-se que a produção também está concentrada em termos de valor. Refinando um pouco mais, o grupo composto pelas dez maiores companhias e suas controladas responde por 78,98% da arrecadação de CFEM, sendo elas: Vale (incluindo coligadas) que participa com 64,91% da arrecadação, CSN, AngloGold Ashanti, Anglo American Brasil, Kinross, Mineração Maracá, Mineração Paragominas, Mosaic Fertilizantes, Mineração Usiminas e Gerdau Açominas. No que se refere às substâncias, apenas dez produtos minerais participam com 89,02% da arrecadação: minério de ferro, ouro, cobre, bauxita, fertilizantes (fosfato e potássio), calcário, nióbio, manganês, estanho e carvão. Há uma forte predominância do minério de ferro, representando 77,22% da arrecadação (ALVES, 2019b). Há, então, forte concentração em poucas substâncias minerais e em grandes empresas.

Os maiores produtores de minério de ferro no Brasil, em termos de capacidade instalada, são a Vale e suas coligadas, seguida pela CSN, Anglo American, Mineração Usiminas (MUSA) e Gerdau Açominas (ALVES, 2019b). A produção mundial de minério de ferro em 2017 foi de 3,3 bilhões de toneladas e o Brasil foi responsável por

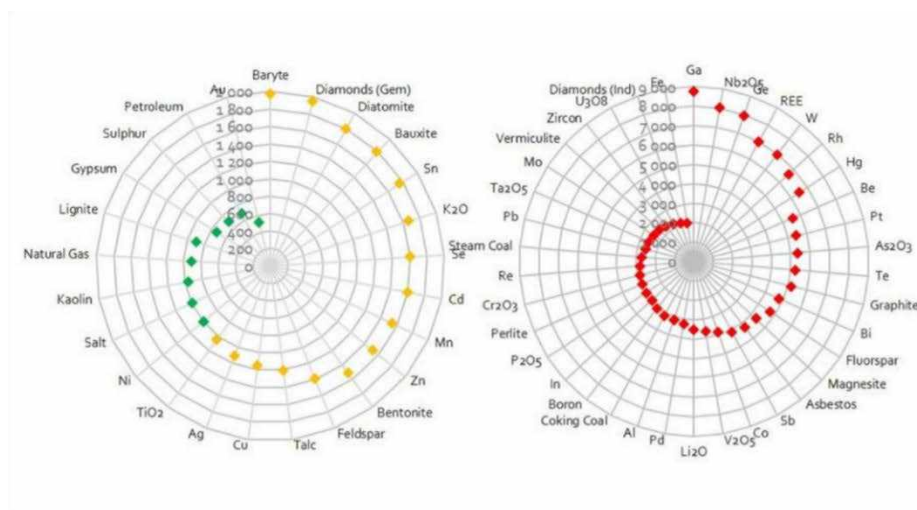
aproximadamente 15% da produção mundial, produzindo no mesmo período 430 milhões de toneladas, o que o deixa na posição de terceiro maior produtor, perdendo apenas para China (40%) e Austrália (26%) (FITCH, 2018b).

A produção nacional de ouro é liderada pela AngloGold Ashanti, seguida por Kinross, Mineração Maracá (Lundin Gold), Great Panther e Mineração Aipoena (ALVES, 2019b). A produção brasileira de ouro em 2017 foi de 95 toneladas, ou aproximadamente 3% da produção mundial, essa que atingiu 114,53 milhões de onças (aproximadamente 3.200 toneladas). A produção mundial de ouro em 2017 foi liderada pela China (13%), seguido de Austrália (9%), Rússia (8%) e EUA (7%). Demais países possuem participações reduzidas no produto (MEXICO, 2018). Quanto ao cobre, a liderança é exercida pela Salobo Metais (controlada pela Vale), seguido pela Mineração Maracá (controlada pela Lundin Gold), Mineração Caraíba (Erro Copper) e AVB (Oz Minerals). A produção mundial de cobre em 2017 soma 23 milhões de toneladas, enquanto o Brasil participa com 335 mil toneladas (ALVES, 2019d; FITCH, 2018a).

A produção mineral mundial soma, em 2017, 17,2 bilhões de toneladas métricas, com a China respondendo por 23,5% desse valor, seguida por EUA (11,5%), Rússia (9,2%) e Austrália (7,3%), totalizando um CR4 de 51,5% da PMB mundial. A produção mineral também está concentrada em termos continentais, com a Ásia representando 57,9% da produção em 2017, seguido pelas Américas, que representam 20,8% da produção mundial, Europa (8,5%), Oceania (7%) e África (5,6%) (BMNT, 2019).

Além da forte concentração observada no Brasil, tanto em empresas quanto em produtos, a produção mineral mundial também é fortemente concentrada. Na figura 1 contém o Índice de Hirschmann-Herfindahl (HHI) a nível mundial para os países produtores de minérios. Nota-se que grande parte dos minerais têm produção altamente concentrada em poucos países, isso podendo ser justificado pelo fato de que a mineração depende de condições geofísicas que determinam o tipo de minério a ser extraído. Desse modo, políticas públicas não são capazes de alterar a estrutura de mercado dominante nesse setor, tampouco atrair companhias para seu território se não forem capazes de ofertar condições geofísicas suficientes para a exploração mineral. Em contrapartida, políticas também podem ser responsáveis por repelir a entrada de firmas no mercado, como por exemplo um marco regulatório ruim ou instável, atrapalhando o funcionamento desse mercado.

Figura 1: Índice de Hirschmann-Herfindall para os produtos minerais, 2017



Concentração: verde baixo, amarelo moderado, vermelho alto

Fonte: BMNT, 2019.

Campos e Urraca-Ruiz (2009) apresentam em seu artigo a Taxonomia de Pavitt aplicada para a indústria brasileira, mas não enquadram a mineração como um único setor. Apesar disso, é possível supor que a mineração possa ser enquadrado pela junção das características de três setores apresentados no estudo: (i) indústria extrativa, (ii) fabricação de produtos minerais não-metálicos e (iii) fabricação de produtos de metal. Partindo desses três, tem-se que a mineração é classificada como setor dominado por fornecedores, ou seja, as inovações surgem de fontes majoritariamente externas. O principal objeto de inovação é em máquinas e equipamentos e busca-se melhorias principalmente de processos. Ademais, os autores consideram que a inovação no setor possui caráter incremental e não radical e que não é possível determinar o foco da trajetória tecnológica no setor.

A próxima seção discorrerá acerca dos principais *clusters* tecnológicos da Indústria 4.0, tomando como base o projeto I2027 e discutirá, de forma agregada, sobre as formas com que estas tecnologias estão surgindo e sendo utilizadas pela mineração, quais os motivos para sua aplicação e de que forma ela está impactando a rotina das empresas. É imprescindível ter em mente que a estrutura do setor influencia diretamente na forma com que a difusão ocorre, pois ao mesmo tempo que há grandes companhias e que possuem alta capacidade de aplicação de inovações, há mineradoras que se encontram em situação marginal no mercado e com baixa capacidade de adotar as mesmas tecnologias.

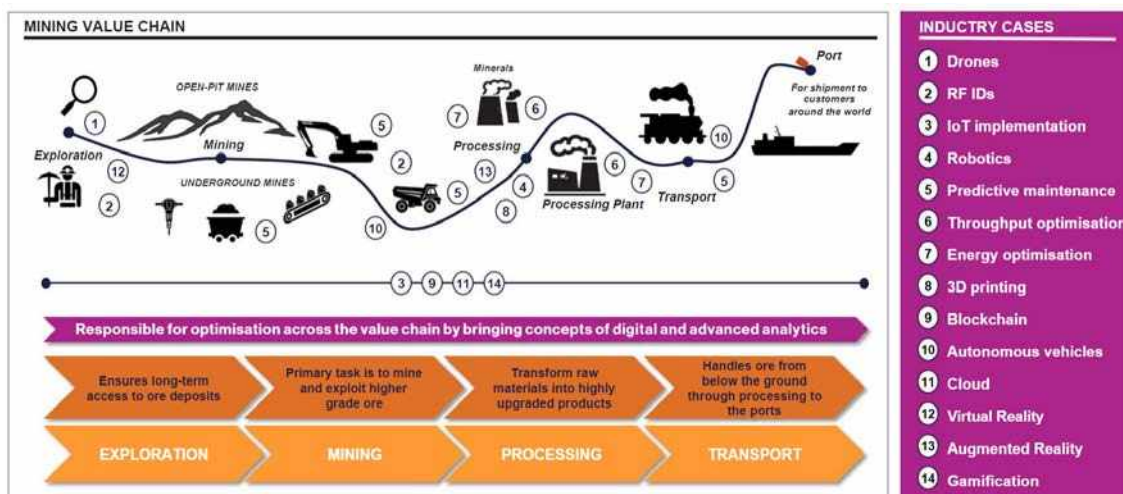
2.3. Uma visão agregada da difusão de novas tecnologias na mineração

Para avaliar as expectativas acerca dos impactos da inovação para a indústria brasileira, o projeto Indústria 2027 buscou responder quais são as tecnologias relevantes para cada sistema produtivo e como elas impactarão cada um, quais os riscos e oportunidades envolvidas e os requisitos técnicos, empresariais, institucionais e financeiros para aproveitá-las e defletir os riscos que as inovações podem representar (IEL, 2018). O projeto identificou oito tecnologias dotadas de potencial disruptivo e as organizou em oito *clusters* tecnológicos (IEL, 2018), sendo eles:

- (i) Inteligência artificial (IA), *big data* e computação em nuvem: emulação do cérebro humano para execução de tarefas, análise de grandes volumes de dados e processamento remoto;
- (ii) Internet das Coisas (IoT): interconexão, por meio da internet, de máquinas e equipamentos, permitindo que enviem e recebam dados;
- (iii) Produção inteligente e conectada ou manufatura avançada: integração entre computação, comunicação e controle da produção, permitindo à fábrica se comportar de forma inteligente;
- (iv) Redes de comunicação;
- (v) Nanotecnologia: manipulação de partículas em escala nanométrica;
- (vi) Biotecnologias avançadas: emprego de engenharia genética para obter produtos e processos mais eficientes e resistentes;
- (vii) Materiais avançados: abrange os materiais comuns, que sofreram aprimoramento, e novos materiais, com desempenho superior aos tradicionais em diversas propriedades;
- (viii) Novas tecnologias de armazenamento de energia.

A figura 1 apresenta algumas possibilidades de implementação dos *clusters* tecnológicos da Indústria 4.0 à cadeia mineradora.

Figura 2: Possibilidades de implementação de novas tecnologias na cadeia de valor mineral



Fonte: SIRINANDA (2019)

Dentre as possibilidades de implementação de novas tecnologias na cadeia mineradora, Sirinanda (2019) afirma que seu uso será responsável por expandir a vida-útil dos depósitos minerais e permitir que se explore e produza com maior qualidade e pureza. De acordo com o autor, é possível utilizar a IoT, a *blockchain*, computação em nuvem e gamificação⁶ em praticamente toda a cadeia de valor mineral, desde a exploração até a comercialização. O uso de drones possui um forte potencial para ser implantado na exploração e no monitoramento, podendo coletar dados, inspecionar, controlar estoques e monitorar as condições físicas e de segurança. Identificadores por radiofrequência (RFID) em equipamentos e em trabalhadores apresentam alto potencial de uso em praticamente todo o processo, reduzindo consideravelmente os riscos físicos. O uso de robótica já é visível durante todo o processo de beneficiamento, assim como a otimização do consumo energético e do fluxo de produtos.

Veículos autônomos são capazes de melhorar a segurança, produtividade e reduzir custos com combustíveis e manutenção. A impressão 3D de peças de reposição reduzirá os prazos de entrega e o custo de reter estoques. Tecnologias vestíveis serão usadas para manutenção de campo e como instruções para a inspeção de máquinas em tempo real, melhorando o cuidado com o equipamento e a segurança do operador. Uma rede

⁶ Partindo da constatação de que os seres humanos se sentem atraídos por jogos, a gamificação é a aplicação de mecânicas de jogos em diversas áreas, com o objetivo de despertar a curiosidade e manter o usuário engajado, diminuindo a penosidade relacionada a diversas atividades. Como em um jogo, o processo é estruturado em torno de metas, regras, *feedbacks* e ações voluntárias (VASCONCELLOS, 2016).

conectada de sensores usando a IoT capturará dados em tempo real, permitindo planejamento, controle e suporta a decisões de forma integrada (DELOITTE, 2017b).

Um "gêmeo digital" é um modelo digital do ambiente físico, construído a partir de informações geológicas, de engenharia e modelos de veios de minério. Os dados de sensores e dispositivos móveis podem melhorar continuamente o “gêmeo digital”, como um reflexo preciso do ambiente físico. Isso começa com a implementação da padronização de formatos de dados para permitir a interação contínua entre sistemas na cadeia de valor de mineração (DELOITTE, 2017b).

Segundo De Paula (2018), na mineração mundial, a percepção das companhias brasileiras aponta que a difusão atual da IoT é moderada e o setor tem muito a se beneficiar da digitalização, podendo compreender melhor e antecipar a variabilidade de sua matéria prima. Para o futuro, espera-se uma difusão moderada/alta da IoT na mineração mundial, tendo em vista questões de segurança e interoperabilidade dos equipamentos. Até 2027 se espera que ocorra o barateamento dessas tecnologias, sendo esse um fator essencial para ampliar sua difusão.

Quadro 2: Percepção das empresas brasileiras consultadas quanto à difusão das tecnologias disruptivas na mineração mundial, 2017, 2022 e 2027

Tecnologia	2017	2022	2027
Internet das Coisas	Moderada	Moderada/alta	Alta
Redes de comunicação rápidas e seguras	Baixa/moderada	Moderada/alta	Alta
Inteligência artificial, <i>big data</i> e computação em nuvem	Baixa/moderada	Moderada/alta	Alta
Produção Inteligente e Conectada	Baixa/moderada	Moderada/alta	Alta
Materiais Avançados na mineração	Baixa	Baixa	Baixa
Materiais Avançados nos consumidores	Baixa	Moderada	Moderada
Materiais nanoestruturados	Baixa	Moderada	Moderada
Armazenamento de energia	Baixa/moderada	Moderada	Alta

Fonte: DE PAULA (2018)

Já a difusão das redes de comunicação na mineração mundial ainda é baixa/moderada, sendo que as comunicações no setor ainda são predominantemente por

cabos coaxiais. Espera-se, segundo o autor, uma difusão moderada/alta dessa tecnologia para 2022, se beneficiando do barateamento. Em compensação, questões de infraestrutura continuarão sendo uma restrição para a transmissão de dados, mas há expectativa de que esse impeditivo seja superado até 2027. Segundo as companhias consultadas no projeto I2027, a atual difusão das tecnologias de IA, *big data* e computação em nuvem na mineração é baixa/moderada. Por um lado, a computação em nuvem já é amplamente utilizada e as tecnologias de *big data analytics* já são partes-chave das estratégias de negócio. Por outro, a IA ainda é pouco usada na mineração, embora sua gama de possibilidades de aplicação seja ampla. Espera-se que o aumento da difusão da IA, com auxílio da *big data*, possibilite as tomadas de decisões automáticas em alguns processos administrativos, chegando a uma alta difusão até 2027 (DE PAULA, 2018).

A difusão atual da Produção Inteligente e Conectada na mineração é baixa/moderada, mas espera-se, segundo o autor, que até 2022 essa tecnologia esteja plenamente dominada e as empresas serão capazes de coordenar a produção em várias plantas, estendendo a cadeia de suprimentos. Os fabricantes proverão soluções que fornecerão a coordenação necessária para garantir a eficiência ótima na operação dos ativos globais, resultando em uma alta difusão até 2027.

A preocupação quanto aos materiais avançados diz mais respeito à pressão para o enobrecimento dos produtos da cadeia mineral do que à difusão do uso dos mesmos em suas operações. Há um movimento de investimentos no desenvolvimento de tecnologias e processos com foco em aumentar a recuperação de resíduos, ao utilizar nanotecnologias e biotecnologias que visam ao melhor aproveitamento de finos e ultrafinos, recuperando e reaproveitando os resíduos de forma mais eficiente. Há também a questão ambiental, essa relacionada à recuperação, reutilização, redução e até mesmo eliminação do uso de água, junto ao monitoramento e controle de riscos ambientais. Espera-se que a aplicação de novos materiais e ligas impulsionem novos setores, reduzam o peso e o volume dos bens fabricados, além melhorar as possibilidades de customização, o que se traduz em maiores benefícios para os consumidores finais (DE PAULA, 2018).

As tecnologias de armazenamento de energia já estão sendo utilizadas na mineração. Algumas mineradoras estão estudando a geração de energia hidráulica a partir do armazenamento de água em barragens, enquanto outras já estão empregando baterias como fonte de energia para máquinas e equipamentos. Contudo, é necessário reconhecer que o desenvolvimento de baterias de alta potência e capacidade ainda é incipiente,

demonstrado pela expectativa baixa/moderada de difusão desse *cluster* na mineração mundial. Espera-se que até 2022 haverá uma utilização mista de tecnologias tradicionais e novas e, para 2027, provavelmente existirão *startups* totalmente alimentadas por fontes renováveis e equipamentos móveis elétricos a bateria em todas as áreas de lavra (DE PAULA, 2018).

O quadro 3 apresenta as perspectivas das empresas consultadas no projeto I2027 quanto à difusão e ao impacto das tecnologias disruptivas no setor. Observa-se que as empresas consultadas esperam um impacto mais elevado das tecnologias informacionais (IoT, Redes de comunicação rápidas e seguras, IA, *big data*, computação em nuvem e Produção Inteligente e Conectada), ao mesmo tempo que afirmam que o impacto e a difusão do uso de materiais avançados e nanoestruturados na mineração será baixa. O uso de materiais avançados pelos consumidores é visto com potencial moderado, podendo ser relacionado ao fato de que se observa atualmente mudanças na estrutura da demanda mineral por outros setores, pois o desenvolvimento das novas tecnologias em setores posteriores da cadeia produtiva levam ao pelo enobrecimento da demanda mineral, como por exemplo nióbio, vanádio e cobre, imprescindíveis para a fabricação de veículos elétricos. Quanto às tecnologias de produção e armazenamento de energia, as companhias entrevistadas esperam baixo impacto e difusão.

Quadro 3: Percepção das empresas brasileiras consultadas quanto à difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na mineração mundial em 2027

Tecnologia	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: DE PAULA (2018)

Concomitantemente com a iniciativa I2027, em 2017 Gustavo Roque, da Ferrous, mineradora especializada em minério de ferro, estava incomodado com o futuro da

mineração no Brasil. Com a baixa nos preços das *commodities*, era preciso encontrar meios de sobreviver. A solução encontrada foi um programa abrangente de inovação, capaz de promover melhorias sistêmicas na cadeia produtiva. Em parceria com executivos da Gerdau e da Vale, surgiu a ideia de criar um espaço para colaboração e, em janeiro de 2019, se inaugurou o *Mining Hub*, um espaço integrado de inovação colaborativa que busca soluções para o setor. O espaço é formado por uma associação entre mais de 20 mineradoras e 20 fornecedores, que cresce diariamente.

O objetivo do projeto é buscar respostas para os desafios observados pela mineração, sendo eles a eficiência operacional, fontes alternativas de energia, gestão hídrica, gestão de rejeitos e resíduos, segurança e desenvolvimento social. A missão do projeto é “conectar empresas e projetos”. A saída para buscar soluções foi realizar um levantamento das necessidades das mineradoras e abrir chamadas para captar ideias inovadoras. A primeira chamada, publicada antes da inauguração do *Mining Hub*, atraiu 200 *startups* que ofereciam respostas a 15 problemas.

O financiamento dos projetos apresentados foge do trivial, o *Mining Hub* não exige participação acionária na *startup*, e a propriedade intelectual dos projetos fica assegurada às mesmas. Em vez de investir nas empresas, as mineradoras “apadrinham” o desenvolvimento das soluções: As mineradoras acessam conhecimento e ideias e as *startups* encontram à sua disposição a estrutura das minas e plantas para testar seus produtos e serviços. Além disso, como a *startup* não é exclusiva de ninguém, “*uma solução testada na Vale pode ser implementada na Anglo American, e vice-versa*”, afirma Gustavo Roque (TIAGO, 2019a). O projeto apresenta como provável impacto uma melhora na capacidade de difusão da inovação na mineração, fomentando a inovação sistêmica e englobando todos os elos da cadeia produtiva, além de reduzir a burocracia na gestão de contratos.

Após ter exibido uma visão agregada de como a Indústria 4.0 pode impactar a mineração, o próximo capítulo buscará analisar de forma mais aprofundada a forma com que cada *cluster* tecnológico está sendo implementado no mesmo, tendo como base a classificação realizada pelo I2027. Cada seção discorrerá individualmente acerca dos *clusters* tecnológicos relevantes e de que forma os mesmos estão sendo utilizados, salvo as tecnologias que não podem ser destrinchadas. Ao final do capítulo, baseado em opiniões de empresas do setor, serão apresentadas as principais barreiras observadas à implementação de novas tecnologias pela mineração.

3. APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NA MINERAÇÃO

3.1. *Acerca do procedimento*

Conforme discutido por Ferraz et. al. (2019), a literatura relacionada à aplicação de tecnologias digitais exhibe: (i) descrições abundantes de tecnologias digitais existentes, seu potencial e impactos diretos, mas poucas estruturas analíticas disponíveis; (ii) forte preocupação com as implicações sobre o mercado de trabalho, mas raros estudos sobre a natureza e a taxa de adoção de tecnologias por empresas; (iii) esforços significativos para coletar e disseminar dados sobre as tecnologias; (iv) projeções, todas mostrando tendências de alta na aplicação dessas tecnologias; (v) estudos setoriais ilustrando potenciais usos de novas tecnologias e como elas podem mudar os modelos de negócio. Apesar disso, ainda são necessários estudos setoriais e ao âmbito de empresas para comprovar a efetividade das tecnologias e servir de base para o planejamento corporativo e (vi) propostas de políticas baseadas no potencial disruptivo das tecnologias emergentes, mas as mesmas usam pouca informação factual e as proposições são baseadas em dados industriais tradicionais e em narrativas sobre as ações dos países do terceiro mundo.

Dado essa estrutura da literatura, o presente capítulo busca analisar as possíveis aplicações das tecnologias da Indústria 4.0 à mineração, compilando e discorrendo acerca dos possíveis impactos das tecnologias existentes e disponíveis ao mesmo. É fundamental se atentar ao fato de que não é possível desmembrar os *clusters* tecnológicos com perfeição, mas a dificuldade de classificação de tecnologias não impede a tentativa de classificá-las dentro dos *clusters* que melhor as represente.

3.2. *Inteligência Artificial*

O conceito de IA se refere à execução de tarefas que exigem inteligência humana por máquinas, interagindo dados com algoritmos analíticos e podendo ser empregada para resolução de problemas complexos (KLEIN, 2018). Por meio da emulação do cérebro humano e por meio da aplicação de algoritmos decisórios e de aprendizagem, a IA pode ser utilizada em sistemas ciberfísicos para processar e tomar decisões, recorrendo a

tecnologias de análise de dados nesse processo (IEL, 2018). A tecnologia permite a auto otimização da máquina a partir de dados históricos de sua função e de outras máquinas ligadas ao processo, podendo melhorar a produção e a eficiência em todas as etapas do processo produtivo (BSA, 2018).

Por meio da IA, o planejamento de cenários consegue equipar os executivos com melhores informações, que podem ser usadas para realizar escolhas estratégicas mais flexíveis, fornecendo-os uma melhor estrutura de decisões para uma série de futuros imprevisíveis (SWART, 2018). As principais tecnologias relacionadas à construção da IA são o *machine learning*, abordagem que envolve o “treinamento” de algoritmos com grandes volumes de dados sem ser explicitamente programado, e o *deep learning*, no qual algoritmos de “aprendizado” usam redes neurais, que imitam a capacidade de o cérebro responder a diversos estímulos, e são utilizados principalmente para reconhecimento de imagem e som (KLEIN, 2018).

O paradigma tecnológico da IA possui uma longa trajetória, com aplicações em indústrias específicas datando de quatro décadas atrás. Todavia, com o desenvolvimento recente de *deep learning*, a IA pode ser agora aplicada à maioria das atividades industriais, do aperfeiçoamento de sistemas ao P&D industrial. O uso de IA na produção deverá ser estimulado pelos processos automatizados de aprendizado das máquinas, que poderão ajudar empresários, cientistas e outros usuários a empregar soluções tecnológicas mais rapidamente. Além de seu potencial para ser aplicado diretamente na produção industrial, o uso de IA em logística torna possível o gerenciamento em tempo real, contraindo significativamente os custos. Igualmente, essa tecnologia pode reduzir o consumo de energia nos centros de dados e auxiliar na segurança digital. A tecnologia também é utilizada para agendamento de reuniões, gerenciamento de gastos, recuperação de informação e manutenção de dados empresariais, além de ser capaz de ser combinada com outras tecnologias, como realidade virtual e realidade aumentada, para melhorar o treinamento de mão-de-obra e assistência cognitiva (NOLAN, 2019).

Portnoff e Soupizet (2019) destacam que a IA ganhou terreno no ecossistema digital no momento em que essa tecnologia chegou a um patamar crítico de desenvolvimento. O atual paradigma técnico-econômico relacionado à IA foi alcançado a partir do desenvolvimento de quatro ramos cruciais relacionados à informação: a multiplicação das redes, possibilitada pelos avanços nas comunicações; a potência de cálculo dos novos processadores; os meios de coleta e armazenagem de dados (*big data*)

e os algoritmos capazes de analisar esses dados por meio de métodos de aprendizagem (*deep learning*). Ganascia (PORTNOFF, SOUPIZET, 2019) identifica cinco séries de funções cognitivas que a IA busca preencher: (i) receptivas, que permitem extrair informações de imagens ou textos; (ii) de memorização, abrindo caminho para a representação dos conhecimentos; (iii) imitações do raciocínio, dando acesso à inferência e ao *feedback*; (iv) expressivas, permitindo comunicar em linguagem natural e (v) executivas, exploráveis para dotar as máquinas de autonomia.

Uma das principais aplicações do princípio da IA na mineração são os Sistemas de Transporte Autônomos (AHS), provenientes de fornecedores especializados do setor. Esses sistemas permitem auxiliar no controle do veículo, sendo capaz de melhorar a segurança tanto do veículo quanto de funcionários, expandir o tempo de vida útil do equipamento e elevar a eficiência produtiva (KLEIN, 2019). O princípio pode ser observado nos sistemas *CAT Connect*, *GRADE CAD* e *E-fence*, todos três da Caterpillar. Os sistemas utilizam orientações de profundidade, inclinação e distância, de modo a fixar a escavadeira dentro de pontos predefinidos pelo operador e, dessa forma, manejar o veículo de forma mais eficiente possível, reduzindo a ocorrência de eventos indesejados durante a retirada de materiais (EQUIPAMENTOS, 2019a).

A estratégia tecnológica dos AHS é amplamente utilizada pela Rio Tinto para a produção de minério de ferro na região de Pilbara (Austrália). A empresa possui mais de 80 caminhões autônomos e reconhece que o uso desse sistema significa que mais material pode ser movido com melhor eficiência e segurança, o que impacta positivamente na produtividade. Os caminhões autônomos são supervisionados por um sistema de controle remoto central em vez de um motorista e utilizam rotas pré-definidas para navegar pela operação, permitindo-os reconhecer sua localização em tempo real e os trajetos e velocidades de todos os outros veículos no sítio. A companhia também emprega a tecnologia *AutoHaul*, que se utiliza de IA para a automação de trens e já a aplicou a 60% dos trajetos. Uma vez totalmente operacional, o sistema proverá significativos ganhos de produtividade, resultando do potencial de reduzir a variabilidade da carga transportada, além de elevar a velocidade média de transporte, o que reduz o tempo médio de entrega (MINE, s.d.).

A Nexa Resources, companhia especializada na extração e beneficiamento de zinco, emprega veículos por controle remoto em suas operações em Vazante (Minas Gerais). As carregadeiras usadas na mina subterrânea apresentam duas possibilidades de

operação: pessoalmente e por controle remoto. O sistema embutido nesses veículos possibilita realocar o receptor de controle remoto para outras carregadeiras, permitindo o trabalho em áreas de queda de chocho sem a atuação direta de funcionários, mesmo com a máquina original em manutenção (informação verbal)⁷. Dentre os resultados dessa estratégia tecnológica se encontram a redução do tempo de ociosidade dos equipamentos, diminuição dos riscos físicos e elevação da produtividade da lavra, pois a modularidade do equipamento torna possível não interromper a frente de desenvolvimento.

Além de seu uso em veículos, a empresa tem criado algoritmos de IA para balizar investimentos em P&D. A companhia usa desse *cluster* para traçar as tendências tecnológicas do setor e definir em que projetos deve investir, empregando para isso robôs que cruzam artigos científicos, patentes e notícias na internet e que buscam identificar as melhores oportunidades de investimentos. Esses estudos estão abastecendo principalmente as iniciativas relacionadas a áreas como sustentabilidade e energia e ajudando a definir quais as melhores estratégias tecnológicas a serem seguidas (TIAGO, 2019b).

A IA também têm utilidade comprovada para detectar corpos de minério em áreas novas e/ou remotas, mesmo sem ter acesso a dados geológicos pré-existentes. A plataforma *Earth AI* usa o *machine learning* para analisar dados geofísicos com o objetivo de detectar possíveis mineralizações, resultando na identificação de oportunidades de exploração viáveis, tanto geologicamente quanto economicamente. Sua aplicação está centrada na Austrália e, de abril de 2018 até o final do mesmo ano, a plataforma foi responsável pela descoberta de 18 possibilidades de plantas *greenfield* com significativa mineralização de cobre, zinco, chumbo e vanádio, sendo responsável por reduzir o tempo gasto em pesquisas preliminares. Porém, não se observa que a plataforma será capaz de substituir completamente o ser humano no curto prazo, pois a análise dos resultados só é possível com o conhecimento de trabalhadores especializados. Assim, a plataforma funciona como um assistente técnico ao ser humano (DELOITTE, 2018).

Vinicius Lisboa, da Metso, fornecedora especializada do setor minerador, compreende que uma forma de solucionar os problemas de monitoramento do processo de beneficiamento do minério é a aplicação da geometurgia automatizada, técnica que

⁷ Informação fornecida pelo Operador Nível D (Cabolt) da empresa Nexa Resources, Gilson Carneiro da Silva, em outubro de 2019.

permite detectar se a planta está operando bem em relação ao planejado. Junto ao uso de *SmartTags*, para rastrear o minério da lavra à usina, o recolhimento de dados contínuo e automático é capaz de avaliar o desempenho de cada tipo de minério e refinar suas classificações, permitindo ajustar o plano da lavra para manter o desempenho geral ideal (GEOMETALURGIA, 2018).

A tecnologia *Ore Sorting*, da Redwave, ao aplicar sensoriamento de cor, transparência, tamanho e formato, realiza a separação de materiais de forma completamente automatizada. O sistema usa de jatos de ar comprimido no lugar de água, que é o mais comumente utilizado pelo setor, melhorando a eficiência energética da atividade ao reduzir o consumo hídrico. Dado que menos rejeito ingressa no processo, impacta diretamente a questão da sustentabilidade ambiental da atividade, pois se transporta menos finos para as barragens de rejeitos (A TECNOLOGIA, 2018). A mineradora sul-africana AngloGold Ashanti aparenta ser uma das pioneiras no uso dessa tecnologia, aplicando-a na separação de ouro do material estéril e obtendo uma taxa de recuperação global 20% maior do que o período sem a mesma (SERRA, 2019).

O paradigma tecnológico da IA aplicada aos veículos no setor está relacionada ao princípio de assistência técnica, assim como definido por Hermann, Pentek e Otto (2016), não substituindo por completo o trabalhador. Essa ausência de substituição perfeita pode ser atualmente justificada pelo grau inicial de implantação dessas tecnologias e pela falta de evidências de que a tecnologia é segura e precisa. As empresas que empregam essa tecnologia costumam manter maquinistas a bordo, supervisionando, ou trabalhadores nas centrais de controle, de modo a tomar a direção no caso de alguma falha sistêmica. Isso demonstra que, mesmo com os possíveis benefícios em empregar essas tecnologias, ainda não há certeza acerca de seus resultados.

O uso de IA para a sondagem de projetos de P&D se mostra importante para definir qual estratégia tecnológica a empresa adotará, tornando possível selecionar focos de investimento que causem maior impacto positivo para a mesma. A trajetória tecnológica da IA na área de pesquisa geológica e separação mineral é, certamente, a busca por melhorar a capacidade de planejamento da lavra e a reduzir o volume de material estéril que entra no processo, o que impacta sobre a pegada ecológica do setor. O desenvolvimento da IA nas áreas apresentadas demonstra a existência de uma estratégia de redução do dano ambiental causado pela mineração, tanto pela busca de retirar menos material e gerar menos resíduos, quanto pela redução dos custos com combustível e

manutenção de veículos, causando também uma queda no risco direto sofrido pelos trabalhadores ligados à operação.

Apesar de seu potencial de gerar importantes impactos, a IA é uma lâmina de dois gumes: ao mesmo tempo que essa tecnologia pode melhorar nossas vidas, seu desenvolvimento dá abertura a uma gama de consequências alarmantes. As mais visíveis incluem violações de privacidade, discriminação, acidentes e manipulação de sistemas políticos. Repercussões desastrosas também são possíveis, como a perda da vida humana, caso um algoritmo médico faça algo errado, ou também à quebra da segurança nacional, na hipótese de que um adversário alimente com informações falsas à IA de defesa de um país. Portanto, essa tecnologia deve ser tratada com extremo cuidado, principalmente pelo fato de ainda não estar em estágio avançado de desenvolvimento. Acidentes e lesões são possíveis se os operadores de equipamentos pesados, veículos ou outras máquinas não reconhecerem quando os sistemas devem ser substituídos ou demoram a substituí-los porque a atenção do operador está em outro lugar (CHEATHAM, JAVANMARDIAN, SAMANDARI, 2019).

3.3. *Big data*

Big data é o nome dado à tecnologia responsável por analisar grandes volumes de dados, esses coletados a partir de sensoriamento contínuo durante a produção, e sendo capaz de guiar o avanço desses mesmos processos. A análise de *big data* possibilita uma vasta gama de benefícios à manufatura, como a otimização de processos, redução de custos e ganhos de eficiência (ZHOU et al., 2015).

As tecnologias emergentes prometem avanços inimagináveis no acesso e na segurança e, ao prevenir desastres, são capazes de reduzir o impacto ambiental. As melhorias nos equipamentos proporcionam ganhos significativos tanto em eficiência energética quanto em produtividade, colocando-os como objetivos prioritários no desenvolvimento das tecnologias da Indústria 4.0. De acordo com Fogarty (MEXICO, 2018), o verdadeiro desafio não é apenas capturar dados, mas trabalhá-los para obter resultados robustos, pois não há sentido obter dados se eles não levarem a uma melhor

compreensão dos resultados potenciais das operações. Para avançar no desenvolvimento do paradigma das tecnologias informacionais, Deloitte (2018) afirma que:

O aumento da maturidade analítica requer maior integração de dados de várias fontes e entrega de soluções de planejamento e tomada de decisão de ponta a ponta que abrangem vários processos e operações. Para construir a maturidade analítica, faz sentido implementar as iniciativas de análise de uma maneira que desenvolva recursos dentro da organização (DELOITTE, 2018, p.16).

Com as tecnologias da chamada engenharia inteligente, baseada em bancos de dados, é possível identificar desde a fase conceitual do projeto até a fase de implantação possíveis interferências e problemas que poderiam acontecer ao longo da execução. Assim, os problemas que ocorrem durante a fase de construção conseguem ser reduzidos e a necessidade de assistência técnica prestada após a implantação do projeto diminui bastante, assim como o volume de queixas ou de melhorias requisitadas (A IMPORTÂNCIA, 2019).

Para alavancar a automação das operações principais, as empresas precisarão repensar a maneira como geram e processam informações e utilizar técnicas de análise de dados orientada a otimizar seus sistemas. O sistema nervoso de uma mina digital reunirá dados em toda sua cadeia de valor durante múltiplos horizontes temporais, podendo melhorar o planejamento, o controle a tomada de decisões, a fim de otimizar o volume produzido, os custos e os gastos em investimento, além de melhorar a segurança. Dados derivados de máquinas permitirão um controle rápido para identificar os principais fatores de variabilidade do processo, impulsionando melhorias operacionais focadas. Dados mais frequentes também tornarão possível que os modelos sejam atualizados com maior velocidade, encurtando os ciclos de planejamento (DELOITTE, 2017b).

O desenvolvimento das tecnologias de *big data* e controladores inteligentes pelo setor minerador, visando à redução de custos e eficiência energética, integram as estratégias de transformar dados em lucro, o que define a provável trajetória tecnológica da aplicação desse *cluster*. O uso de engenharia de dados, ferramentas de monitoramento remoto e indicadores de tempo médio de reparos podem proporcionar ganhos de eficiência de, em média, 15%, além de reduzir as paradas emergenciais na produção (ABM, 2019).

A confiança nos dados para impulsionar a estratégia também permite que as empresas reduzam o ciclo de planejamento estratégico e estabeleçam ciclos de *feedback* entre

planejamento geológico e planejamento financeiro, reduzindo os riscos do projeto em um momento em que muitos mineradores estão procurando expandir seus gastos de capital (SWART, 2018).

O *machine learning* é utilizado pela mineração para identificar similaridades geológicas com lugares anteriormente detonados, permitindo classificar o tipo de rocha a ser extraída, otimizando o posicionamento de explosivos para a detonação e obtendo fragmentos de rocha com tamanhos mais padronizados. A obtenção de fragmentos mais padronizados interfere diretamente na eficiência do processo de britagem do mineral, levando a menos “gargalos” no processo, o que reduz a necessidade de interromper o processo para realizar manutenções (KLEIN, 2019). A figura 2 exibe algumas possibilidades de utilização dessa tecnologia pelas mineradoras.

Figura 3: Como o *machine learning* pode gerar valor ao longo da cadeia mineral



Fonte: BCG (2019), p.19.

Com o uso de *machine learning* as mineradoras serão capazes de localizar mais depósitos minerais com menos prospectos, melhorar a fragmentação do minério (ao usar melhores padrões de disposição de explosivos), realizar manutenções de forma mais eficiente (baseado em análises preditivas) e aumentar a vida-útil dos equipamentos. No beneficiamento, as companhias poderão ajustar quase instantaneamente o fluxo de matérias-primas que entra no processo, melhorando a pureza do produto por meio de parâmetros operacionais.

A ThoroughTec Simulation utiliza o *machine learning* em sua ferramenta de análise do desempenho da força de trabalho. Partindo do princípio da assistência técnica, a empresa desenvolveu uma tecnologia vestível responsável por coletar dados e analisar o desempenho em tempo real, transformando dados em insumos importantes para o

processo, gerando relatórios estruturados e que podem ser utilizados para buscar a otimização do processo. Com isso, a companhia consegue identificar lacunas nas capacidades individuais e ajustar as necessidades de treinamento de cada funcionário (KLEIN, 2018).

Uma infraestrutura como a da mineração requer alta confiabilidade nas medições de desempenho. Destaca-se entre as estratégias apresentadas pelo setor a geração de estatísticas acerca de simulações sobre fadiga em partes essenciais da sua infraestrutura logística. Dessa forma, controla-se o ciclo de vida de equipamentos com vistas a garantir a estabilidade das operações e, em decorrência das mudanças feitas por esses sistemas, a manutenção da cadeia produtiva caminha cada vez mais para um misto entre manutenção preventiva⁸ e preditiva⁹ (ABM, 2019).

As plantas produtivas exigem ajustes operacionais constantes para manter o desempenho do processo e a qualidade do produto. Em parceria com várias empresas, a Deloitte trabalhou para a construção de modelos prescritivos para otimização de atividades produtivas, o que inclui a previsão da qualidade do minério entrante, a seleção de qual processo utilizar, os pontos que necessitam de ajustes operacionais e o produto final. O modelo prescritivo promete diminuir o tempo de inatividade e melhorar a utilização do equipamento. Em vários projetos, os resultados observados incluem a redução das paradas não planejadas e dos custos energéticos, melhoria na previsão da qualidade do minério, queda na variabilidade do tempo de produção e de processamento e aumento das taxas de recuperação e produção (KLEIN, 2018).

Na indústria mineral, é necessário tomar decisões baseado naquilo que não é observável e, para dificultar, o volume de dados estruturados para análise ainda é muito pequeno. Como resposta a isso, pesquisadores têm criado modelos para avaliar o potencial de jazidas comparando, por exemplo, o desempenho de áreas similares e de depósitos minerais com características semelhantes, além de informações geoquímicas, geológicas e de atividades sísmicas. Com isso, esses sistemas conseguem prever o tempo de vida útil da jazida e recomendar para onde deve seguir as frentes de exploração. Apesar do potencial de geração de informações, o uso da estratégia de criação de modelos não

⁸ Manutenção efetuada com a intenção de reduzir a probabilidade de falha de um equipamento. É uma intervenção programada para antes da data provável de ocorrência de uma falha.

⁹ Processo que acompanha as condições reais de funcionamento das máquinas tendo como base dados gerados durante o processo produtivo, sendo capaz de prever o tempo de vida útil dos componentes e as condições para que esse tempo seja bem aproveitado.

exclui por completo a necessidade do ser humano no processo, pois é necessário um trabalhador especializado para interpretar os resultados. A geração de modelos funciona, então, como um instrumento de assistência técnica (TIAGO, 2019b).

A GE 21, fornecedora de componentes para a mineração, adotou recentemente a plataforma *GV Mapper*, dando um passo na captura de dados no campo de forma padronizada, estruturada e que possibilite a análise mesmo por pessoas que não tenham participado do trabalho de campo. O programa permite formatar e organizar dados para que venham a servir de base para a construção de modelos geológicos. A estratégia tem como objetivo gerar um banco de dados adaptável às necessidades dos clientes, no qual a companhia afirma obter reduções de 30 a 40% no tempo gasto com análise de dados. Segundo a empresa, a plataforma não vem como forma de substituir o ser humano, pois a análise dos resultados só é possível com o conhecimento do geólogo. O que o sistema faz é automatizar a parte de processamento e refino e mostrar ao ser humano o que ele não é capaz de ver a olho nu (GE 21, 2019).

A Volvo CE (EQUIPAMENTOS, 2019b) lançou recentemente sua nova geração de carregadeiras e caminhões articulados, possuindo à sua disposição as plataformas de auxílio *LoadAssist* e *HaulAssist*. A primeira tecnologia consiste num assistente de carregamento, capaz de realizar medições de carga em tempo real, podendo reduzir a variância da quantidade de material ser transportado. A segunda consiste em um sistema de pesagem de bordo com geração de dados em tempo real e disponível remotamente, podendo facilitar a gestão da produção e da frota de transporte. A interconexão das tecnologias da empresa é capaz de oferecer às mineradoras a otimização da produção e a redução do desgaste dos caminhões, esse último relacionado ao fato de que haverá menos variações na força exigida pela suspensão dos veículos.

A Vale utiliza estratégias relacionadas à análise de *big data* para construir um banco de dados robusto e confiável, com o objetivo de identificar possibilidades de melhoria e controle da operação. Ao analisar o desempenho de equipamentos em todas as suas unidades, é possível identificar as melhores práticas e replicá-las para toda a companhia, levando a ganhos de eficiência e produtividade. Em Itabira, a equipe da empresa foi capaz de escrever um algoritmo responsável por reduzir o consumo de combustível, otimizando a partir da análise de indicadores dos veículos e das rotas, recomendando mudanças para os operadores. Durante o piloto de cinco semanas, o projeto apresentou resultados positivos, desenvolvendo uma economia de R\$ 1,8 milhões

na unidade, se mostrando economicamente lucrativo e com retornos expressivos já no curto prazo (TIAGO, 2019b).

Assim como a IA, o uso de *big data* pela cadeia mineradora visa a aprimorar a eficiência da produção, principalmente por meio da melhora na previsibilidade do produto. Ao usar os resultados das análises para fazer ajustes operacionais e de capacitação de funcionários, as estratégias relacionadas a essa tecnologia causam aumento da eficiência produtiva e geram resultados significativos para a empresa até mesmo no curto prazo, além de abrir espaço para novas possibilidades de exploração e de criação de novos processos. O *cluster* em que se a análise de *big data* está inserida se desenvolve com base nos princípios de assistência técnica e interconectividade, não substituindo por completo a necessidade de trabalhadores para o entendimento dos resultados.

Mesmo com perspectivas de utilização otimistas, a análise de *big data* apresenta algumas desvantagens e riscos: À medida que a quantidade de dados não estruturados gerados aumenta, se torna cada vez mais difícil a classificação e o uso adequado dos mesmos nos processos. Como resultado, é fácil ser vítima de armadilhas, como usar ou revelar informações inadvertidamente ocultas. Ao mesmo tempo, a análise de dados incompletos pode gerar viés nos resultados observados, levando a conclusões enganosas e que podem comprometer toda a tomada de decisões. Nos bastidores, falhas no *script*, lapsos no gerenciamento de dados e erros de julgamento do modelo podem facilmente comprometer a justiça, a privacidade, a segurança e a conformidade aos parâmetros de qualidade (CHEATHAM, JAVANMARDIAN, SAMANDARI, 2019).

3.4. *Internet das Coisas*

O *cluster* da IoT consiste na interconexão, por meio da Internet, de dispositivos de acesso à rede embutidos em máquinas, equipamentos e objetos, permitindo que eles enviem e recebam dados. Essa tecnologia reflete os princípios de interconectividade e transparência informacional apontados por Hermann, Pentek e Otto (2016) e permite a descentralização decisória da produção. Os sensores microeletrônicos distribuídos nos equipamentos compõem os sistemas de coleta e processamento de dados, podendo ser

processados em servidores especializados ou em nuvem. A IoT é expressa em processos nos quais máquinas, equipamentos e dispositivos estão conectados e são capazes de executar tarefas de gerenciamento, ao otimizar unidades e infraestruturas produtivas, e de melhorar a manutenção preditiva, dando suporte ao gerenciamento de cadeias logísticas e ao monitoramento de usuários de produtos e serviços conectados (IEL, 2018). São tecnologias que permitem inovações em outros *clusters*, não se limitando a tecnologias já conhecidas, mas também de tecnologias em desenvolvimento. Segundo BSA (2018), “*os sistemas de IoT são a espinha dorsal de benefícios como otimização, melhores previsões e melhores funções de design*”.

A IoT inclui as tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID), sensores, *Global Positioning Systems* (GPS) e vários outros objetos capazes de se conectar à internet para trocar informações (ARNOLD, KIEL, VOIGT, 2017). Segundo a ABM (2018):

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

A utilização da IoT possibilita melhor controle da produção, exemplificado por uma mina de ferro em Minas Gerais, por uma empresa não identificada pelo autor, no qual a massa transportada era aferida em balanças rodoviárias, sendo substituído por um sistema de gestão automatizado, interconectado e responsável por gerir a rotina das mesmas. Como resultado dessa estratégia tecnológica, reduziu-se a variância da carga transportada e os custos de produção em diversas peças, elevando a produtividade média em 9,1% (MINERAÇÃO, 2018).

Sirinanda (2019) compreende que o *blockchain* pode ser usado para rastrear a movimentação das matérias-primas ao longo da cadeia de valor, de forma semelhante ao setor de varejo. A Deloitte (BRIGHTMORE, 2019d) recomenda às empresas adotar em seus processos produtivos a Rede de Suprimento Digital (DSN), sistema cujo objetivo é alavancar algoritmos avançados, IA e *machine learning* para transformar dados dos diversos integrantes das cadeias em soluções para os diversos problemas enfrentados pela cadeia mineradora. A companhia alega que a utilização dessa tecnologia permite a redução dos custos e melhora no tempo de resposta às mudanças, consequentemente

otimizando o planejamento da mina, tornando possível integrar mudanças em tempo real. Kevin Xu (BRIGHTMORE, 2019e) compreende que as organizações que conseguirem interligar toda a sua cadeia de suprimentos seriam capazes de mais do que apenas quebrar a falta de interação existente na cadeia mineral, podendo criar uma melhor visão de ponta a ponta na cadeia, melhorando a utilização dos ativos, a eficiência operacional e a produtividade.

Embora as inovações de IoT tenham surgido como incrementais, elas possuem o potencial de se tornarem inovações radicais, dependendo da convergência tecnológica (combinações com outras tecnologias), da trajetória seguida por outros *clusters* e de como são usadas em cada sistema produtivo. No entanto, ainda existem incertezas em relação à interoperabilidade, à padronização da comunicação técnica e à segurança informacional (IEL, 2018).

A interconectividade, por meio da IoT, não pode ser completamente destrinchada das outras tecnologias informacionais citadas anteriormente (IA, *big data* e *machine learning*). A IoT possui a função de fornecer sustentação para o desenvolvimento da Indústria 4.0 no setor, sendo imprescindível para garantir que a comunicação entre equipamentos e seres humanos consiga trazer os benefícios previstos pela IA e pela análise de *big data*.

O grande risco de uso da IoT está relacionado à segurança cibernética, o que inclui não apenas o risco de ocorrer uma violação de dados em rede, mas também de toda a operação ser prejudicada por meio de atividades comerciais que dependem da conectividade e acessibilidade digital. Para que o uso da IoT se torne mais difundida, é imprescindível o desenvolvimento de melhores protocolos de acesso e a expansão dos departamentos de TI das empresas (ROTHROCK, KAPLAN, OORD, 2019).

3.5. Produção inteligente e conectada e redes de comunicação

A produção inteligente e conectada refere-se aos sistemas ciberfísicos (CPS), esses formados por uma integração entre computação, comunicação e controle da produção, responsáveis por conectar o mundo físico ao espaço virtual e permitem à fábrica que se comporte de forma inteligente. No âmbito das principais tecnologias que

compõem esse *cluster*, destaca-se a manufatura aditiva, *softwares* de integração e virtualização da produção e a robótica autônoma. O uso de estratégias relacionadas a conexões inteligentes viabiliza a integração do mundo físico ao virtual, propiciando o desenvolvimento da manufatura adaptável e a ocorrência de ganhos mesmo na produção em pequena escala (IEL, 2018; ZHOU et al, 2015).

Segundo Mitchell (2019a), a digitalização pode criar novas formas de impulsionar a produtividade, gerenciar os desafios da variabilidade do produto e buscar a excelência comercial. Com a modernização, mineradoras e beneficiadoras podem otimizar as taxas de produtividade em suas operações e gerenciar a variabilidade sob quaisquer condições, além de entender a verdadeira capacidade de ponta a ponta da planta e os gargalos existentes, melhorando a capacidade de resposta a mudanças.

Por meio da projeção de cenários virtuais no mundo físico, a realidade aumentada permite uma integração em tempo real com informações obtidas mediante a união de sistemas industriais, GPS, câmeras de vídeo e Internet. Integrados a dispositivos móveis, esses equipamentos representam uma interação direta entre o usuário e os objetos em seu ambiente de trabalho, o que possibilita o acompanhamento virtual do processo, incluindo a operação de máquinas com maior eficiência e a orientação de procedimentos de manutenção e de segurança no ambiente de trabalho. Para a indústria em geral, isso significa um grande avanço, principalmente na redução de riscos para os trabalhadores, aumento da capacidade produtiva e otimização do uso de recursos na manutenção dos processos (PAIOLA, 2019). A atualização de sistemas principais para plataformas baseados na nuvem pode oferecer benefícios relacionados ao custo de se reter equipamentos físicos, gerando em média uma redução de custo da ordem de 20 a 40%, além de aprimorar a experiência do usuário (DELOITTE, 2017b).

Um dos principais limitantes da instalação de novas plantas produtivas na mineração é a prospecção geológica. Visando a melhor entender o processo de formação dos minérios, a Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB) e a Jazida.com desenvolveram uma plataforma para consulta de informações geológicas. A plataforma é responsável por cruzar informações disponibilizadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), ANM e entidades ambientais, com o objetivo de constituir uma fonte de consulta integrada para investidores interessados na geologia brasileira. O uso dessa estratégia fornece uma clara vantagem ao investimento produtivo na mineração brasileira, pois facilita a localização

de prospectos geologicamente e economicamente viáveis, podendo ser considerado um diferencial positivo em relação a países com menor cobertura geofísica (ALVES, 2019a).

Outra estratégia tecnológica utilizada pelo setor é a plataforma *MineLife VR*, da LlamaZOO, fornecedora de tecnologias informacionais. O sistema combina dados geoespaciais e de planejamento de complexos mineradores com a IoT, formando um gêmeo digital interativo da mina e que mostra o estado atual e o planejamento futuro do sítio. Ao fornecer um panorama acerca do desenvolvimento do sítio, o uso dessa tecnologia é capaz de auxiliar na tomada de decisões sobre o futuro da exploração, guiando a forma como a operação será desenvolvida (BENTON, 2018).

Stephen de Jong apresenta a plataforma *VRify* como uma solução tecnológica para a mineração. A tecnologia oferecida pelo sistema é uma combinação de realidade virtual, modelagem e visualização 3D, que gera um modelo dinâmico da operação e que estima a formação geológica por meio de dados históricos da operação. O objetivo dessa plataforma é criar um ecossistema formado pelas mineradoras, investidores, agências regulatórias e grupos ambientalistas e, dessa forma, permitir uma melhor interação dentro do setor, beneficiando a forma como os agentes comandam seus negócios (BRIGHTMORE, 2019c).

Divino Barbosa (ALVES, 2019a) demonstra as possibilidades de uso do sistema *Skytrem* de eletromagnetria para detecção de mineralizações. O equipamento capta dados em superfícies tanto rasas quanto profundas e pode cobrir terrenos montanhosos, além de poder ser configurado para diversos níveis de resolução e profundidade, gerando informações para que as companhias possam localizar novos empreendimentos viáveis. Observa-se que o sistema segue o princípio da assistência técnica, pois o mesmo não é dotado de capacidade decisória acerca de empreendimentos viáveis, ficando essa parte da pesquisa no poder dos próprios funcionários.

A segurança e o bem-estar dos funcionários também têm sido proporcionados por investimentos relacionados à Indústria 4.0, exemplificado pela aplicação do sistema *Optalert* em óculos especiais da Vale, responsáveis por detectar a sonolência e emitir sinais visuais e sonoros tanto ao funcionário quanto à central de monitoramento, com a finalidade de evitar acidentes (ABM, 2018). De forma semelhante, a Mineração Paragominas, produtora de bauxita em Paragominas (Pará), está investindo na instalação de sistemas antifadiga e anticolisão nos seus caminhões, ambos fornecendo assistência

técnica aos trabalhadores. Dentro de suas cabines, câmeras dotadas de sistemas de reconhecimento facial identificam sinais de cansaço e distração dos operadores. Caso o operador apresente esses sinais, o sistema sugere pausa para descanso e, além de monitorar o condutor, o sistema para automaticamente o veículo se houver risco de colisão (TIAGO, 2019b).

Na mina Gaby (Chile), da Codelco, de extração de cobre, já estão sendo utilizados por volta de 100 caminhões fora-de-estrada operando de forma autônoma, cada um com capacidade de carregar 330 toneladas. Ao controlar os veículos a longas distâncias, a tecnologia previne riscos aos trabalhadores que poderiam estar relacionados a falhas mecânicas e estruturais (BRIGHTMORE, 2019a). Em São Gonçalo do Rio Abaixo (Minas Gerais), caminhões autônomos já integravam a rotina da lavra de minério de ferro da Vale. A frota da companhia contava com 13 veículos autônomos. Devido ao sucesso do uso dessa estratégia tecnológica, em outubro de 2019 a Vale anunciou que em novembro do mesmo ano iniciará testes para a implantação de dois caminhões fora-de-estrada autônomos em Carajás (Pará). Em ambas as localidades os caminhões são controlados por GPS, radares e IA, além de serem monitorados por operadores remotos, trazendo ainda mais segurança para a atividade. Ao detectar riscos, os equipamentos paralisam suas operações até que o caminho seja liberado. Além de proteger os trabalhadores contra acidentes, a empresa acredita que o emprego de veículos autônomos trará 15% de aumento da vida útil desses equipamentos, 10% de redução no consumo de combustíveis e em manutenção, aumento da velocidade média dos caminhões e redução na emissão de CO₂ (NOGUEIRA, 2019).

O *Slope Stability Radar* (SSR), sistema de monitoramento das paredes de minas a céu aberto, desenvolvido pela *University of Queensland*, é responsável por detectar a quantidade, a forma e o grau dos movimentos das paredes das minas e então utilizar esses dados para tomar decisões acerca da evacuação de pessoas e equipamentos, melhorando a segurança da mina. Em um exemplo, o uso do SSR numa mina em Mount Owen (Nova Zelândia) forneceu um aviso com quatro horas de antecedência de um desmoronamento de 30 milhões de toneladas, o que permitiu uma evacuação segura e antecipada (CSIRO, 2017).

A Bosch entrou no desenvolvimento do conceito de *Smart Mining* com três possíveis soluções relacionadas à interconectividade. O primeiro é o *Smart Conveyor*, sistema de manutenção preditiva das correias transportadoras, que monitora em tempo

real a temperatura e as condições dos rolos de transporte, proporcionando maior controle da vida útil dos mesmos. A tecnologia consiste na instalação de sensores inteligentes nos cavaletes, não sendo necessário para as mineradoras adquirir equipamentos de transporte com a tecnologia embutida. A segunda tecnologia é o *Smart Lockout*, sistema de segurança desenvolvido para reduzir o tempo de bloqueio de energia para o processo de manutenção, reduzindo a necessidade de deslocamento de funcionários entre os pontos de bloqueio e de trabalho. O terceiro é a *Smart Feeder*, uma válvula de isolamento automatizado de silos, que garante a interrupção do fluxo de minério em qualquer situação de operação, permitindo o controle remoto da produção em lugares que apresentam alta periculosidade (UM PREVIEW, 2019).

O uso de estratégias otimizadoras também pode ser exemplificado por uma mineradora atuante na Austrália e Canadá, não identificada pelo autor, que utilizou da tecnologia *Trakka*, da DINGO Software, de gerenciamento das condições físicas de equipamentos, obtendo uma redução de gastos diretos com manutenção da ordem de US\$ 55 milhões. A aplicação dessas tecnologias otimizadoras expressa a capacidade da Indústria 4.0 de possibilitar retornos significantes mesmo no curto prazo (CSIRO, 2017).

A K2on, desenvolvedora de equipamentos, apresentou na Exposibram 2019 seu Sistema de Monitoramento de Pressão e Temperatura de Pneus (TPMS) e o Sistema de Monitoramento Sem fio. O primeiro é capaz de monitorar pneus em tempo real e busca evitar o desperdício de vários pneus da frota, além de reduzir o número de acidentes. O uso dessa tecnologia leva, conseqüentemente, à redução do consumo de combustível por hora, relacionado ao fato de que o consumo é maior quando pneus estão descalibrados. O segundo sistema é relacionado à acoplagem de câmeras em pontos cegos das máquinas, aumentando a visão do operador e reduzindo o risco de acidentes. Com transmissão sem fio, o sistema elimina o uso de cabos e permite melhor controle remoto do equipamento, além de reduzir os custos de manutenção a equipamentos (UM PREVIEW, 2019).

Drones estão se provando ser altamente versáteis e eficazes na mineração no monitoramento de locais inacessíveis, para fins ambientais, de manutenção e até de exploração. Além de executar o trabalho com eficiência, graças aos sensores de monitoramento da condição e a manutenção preditiva, o equipamento autônomo minimiza o tempo de inatividade da produção. Utilizando ferramentas digitais de coleta de dados, monitoramento, rastreamento e modelagem, as empresas podem tomar

melhores decisões ao longo do caminho do recurso ao mercado e, como resultado, podem reduzir seus custos operacionais em 25% ou mais (BCG, 2019).

Brightmore (2019b) apresenta a ferramenta aérea *HiSight*, da H Robotics, fornecedora especializada, demonstrando que sua função é mais do que apenas sobrevoar as operações e gerar imagens em tempo real: é possível anexar dispositivos como câmeras e sensores no equipamento e mantê-lo em uma posição estável, planando sobre a operação. Diferentemente da aplicação de *drones* apenas para monitoramento e mapeamento, a empresa aposta em um modelo autônomo, que informa o que deve ser feito sem a necessidade de passar pelo tratamento de dados por uma central, processo já realizado pelo próprio robô. Um exemplo disso é seu uso numa mina na África, não identificada pelo autor, para monitorar barragens de rejeitos com o objetivo de prevenir o transbordamento do material e a erosão da barragem.

O drone também está sendo utilizado para sensoriamento sonar na mesma região, com a função de prevenir ataques de crocodilos aos trabalhadores, pois os répteis dessa região se tornaram capazes de resistir aos elementos tóxicos no lago criado pela barragem de rejeitos. A mesma empresa afirma estar discutindo a possibilidade de utilizar o *HiSight* como uma perfuratriz voadora autônoma, afirmando que o equipamento pode ser capaz de pousar e retirar amostras de superfícies e, dessa forma, facilitar o mapeamento geológico (BRIGHTMORE, 2019b).

Segundo a Deloitte (2017a), seis *drones* especialmente projetados para sobreviver em altitude passarão a sobrevoar a operação da mineradora Antamina em Ancash, no Peru, monitorando 120 caminhões gigantes CAT e Komatsu. A imagem em UHD gerada pelos drones chega à intranet da companhia e pode ser acessada por qualquer pessoa autorizada de seu celular em qualquer parte do mundo.

A Andritz, fornecedora especializada do setor, passou a utilizar *softwares* de gêmeos digitais para simular o comportamento de equipamentos reais, visando a assegurar a efetividade do design. Dessa forma, é possível estimar o que poderá ocorrer com a máquina na planta em diversos cenários antes mesmo de construí-la, permitindo assim um melhor controle sobre a durabilidade e reduzindo a necessidade de realizar ajustes posteriores (GALEA-PACE, 2019a). Segundo del Valle (DELOITTE, 2017a), "*Se fizermos melhor uso de equipamentos críticos e evitarmos paralisações, poderemos mover mais material com eles*", o que se traduz em melhores números para a companhia.

O uso da produção inteligente e conectada na mineração é abrangente e encontra aplicações em toda a cadeia produtiva. A interconexão de máquinas e equipamentos permite a redução de acidentes de diversas formas, além de melhorar a eficiência produtiva por meio da elevação das velocidades médias dos veículos e pela redução da variabilidade do volume transportado. O monitoramento contínuo de máquinas e equipamentos diminui a ocorrência de paradas desnecessárias e de manutenções em momentos incorretos, o que reduz a necessidade de paralisar a produção. A tecnologia também garante melhorias na adaptabilidade da produção, alterando o funcionamento da empresa em caso de eventos inesperados.

Dentre as desvantagens da aplicação dessas tecnologias se encontra a questão da segurança informacional. A diversidade de sistemas e componentes, bem como o crescente uso da IoT produção, transferem automaticamente à planta industrial as ameaças relacionadas à sistemas de TI. Para desenvolver todo o potencial da Indústria 4.0, a segurança informacional precisa ser assimilada como uma das principais características a serem desenvolvidas, juntamente com componentes eletrônicos, processos e serviços. A tecnologia disponível ainda não incorpora perfeitamente esses aspectos, mas deve ser estendida por toda a economia para reduzir as vulnerabilidades das firmas (WANG, TOWARA, ANDERL, 2017).

3.6. Nanotecnologia, Biotecnologia e Materiais Avançados

A biotecnologia envolve o emprego de engenharia genética, biologia celular e ciência da computação, intervindo no genoma de organismos vivos para obter ou modificar produtos, melhorar plantas e animais ou desenvolver micro-organismos voltados a fins específicos. Por meio da manipulação de substâncias orgânicas, é possível obter produtos e processos mais eficientes e resistentes como por exemplo novas vacinas, medicamentos e terapias, plantas mais resistentes a pragas e a mudanças climáticas, além de testes mais precisos e menos invasivos. A biotecnologia geralmente é dividida em três principais grupos de desenvolvimento: (i) biotecnologia vermelha, aplicada à saúde humana e animal; (ii) biotecnologia verde, utilizada na agricultura; e (iii) biotecnologia branca, aplicada a processos industriais (IEL, 2018).

A nanotecnologia envolve a manipulação de partículas em escala nanométrica, de modo a modificar características de materiais existentes e melhorá-los. A tecnologia pode ser aplicada a todos os sistemas de produção, como aqueles relacionados à nanomedicina e nanocosméticos; nanoeletrônica; dispositivos vestíveis; tecnologias auxiliares; e indústria alimentícia, como garantidora da segurança alimentar. As nanotecnologias podem ser divididas entre nanoestruturas ativas, usadas em eletrônicos, sensores e drogas objetivas; e em nanossistemas, como redes utilizadas em robótica, estruturas supramoleculares e montagem molecular (IEL, 2018).

Os Materiais Avançados abrangem os materiais comuns, que sofreram aprimoramento, e novos materiais, que apresentam desempenho superior aos tradicionais em uma ou mais propriedades de interesse. De um modo geral, os materiais avançados permitem a melhoria de produtos ou mesmo o desenvolvimento de produtos inovadores nas mais diversas áreas. Os materiais avançados podem ser divididos em cinco grupos: (i) nano materiais; (ii) materiais auto regenerativos; (iii) materiais de alto desempenho; (iv) materiais de fontes renováveis e (v) produtos resultantes do refino de terras raras. São materiais para uso amplo, como, por exemplo: embalagens e estruturas funcionais e “inteligentes” (por exemplo, auto conserto, fungicida, bactericida); estruturas resistentes e/ou estruturas leves (materiais de alto desempenho); materiais para liberação controlada de compostos (em humanos e animais ou no meio ambiente); materiais para impressão de circuitos eletrônicos e impressão aditiva (impressão 3D); materiais biodegradáveis; ímãs permanentes (para uso em veículos e motores industriais) (IEL, 2018).

A manufatura aditiva é um processo de formação no qual a geometria do objeto é produzida pela laminação de elementos da mesma espessura, formando superfícies volumosas. Esse processo permite uma produção flexível baseada em qualquer geometria com base em modelos tridimensionais. O potencial para isso reside sobretudo na liberdade em relação ao projeto de componentes, na eliminação de ferramentas e máquinas especiais, na possibilidade de uma produção flexível, na redução do tempo de desenvolvimento e na queda do desperdício (WANG, TOWARA, ANDERL, 2017).

De acordo com López-Hurtado (MEXICO, 2018), a proteção adequada contra a corrosão pode reduzir significativamente as paralisações nas operações e a necessidade de manutenção, prolongando a vida útil do equipamento. A Henkel apresentou em 2019 o sistema de reparos Loctite PC 9020, sistema epóxi de preenchimento para placas de desgaste metálicas. O produto possui alta estabilidade hidrolítica e volumétrica, ou seja,

absorve pouca água e elimina a formação de vazios entre as estruturas de apoio a equipamentos, que poderiam ser capazes de estragar os equipamentos em possíveis quedas. Dessa forma, reduz a necessidade de manutenção por conta de falhas estruturais (UM PREVIEW, 2019).

A Virtual Curtain Limited (VCL) está desenvolvendo tecnologias para a remediação de água contaminada da indústria mineradora. A tecnologia *Hydrotalcite* (HT) envolve a síntese de hidrotalcitas – mineral composto principalmente de ferro e alumínio. À medida que as hidrotalcitas são formadas, os metais tóxicos ficam presos e são facilmente removidos da água. Em um teste na mina de cobre Baal Gammon, em Queensland, a aplicação de HT foi capaz de remediar 60Mgl de água contaminada, atingindo uma pureza que satisfaz as diretrizes da qualidade de água para descarte final no país (CSIRO, 2017).

A parceria entre a AngloGold Ashanti e a Green Fuel foi responsável pelo desenvolvimento de uma célula de eletrólise que injeta hidrogênio diretamente na câmara de combustão, obtendo aproximadamente 6% de redução de consumo de combustíveis nos primeiros protótipos. Devido ao poder calorífico do hidrogênio, o processo leva a uma combustão completa do material, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa. Como quase não há emissões de gases, também se reduz a temperatura do escapamento dos equipamentos, o que reflete positivamente nos gastos com refrigeração das frentes de trabalho (AUTOMAÇÃO, 2019).

A Vallourec afirma ser pioneira no processo de substituição energética ao trocar o gás natural como combustível no processo de pelotização de minério de ferro por pó de carvão vegetal, um coproduto do alto-forno. Segundo a empresa, a mudança do material levou a uma redução de 50% nas emissões de CO₂ na usina de Jeceaba, no centro de Minas Gerais. A substituição foi resultado de um processo contínuo de busca por fontes renováveis pela companhia, que diz buscar alternativas para os combustíveis fósseis e almeja usar recursos renováveis em toda sua cadeia produtiva (VALLOUREC, 2019).

A Argo Natural Resources está buscando desenvolver uma tecnologia viável e não aquosa para processamento mineral, como alternativa para as técnicas tradicionais de refino. O uso de solventes eutéticos profundos (DES) é capaz de eliminar o uso de elementos tóxicos para dissolver grupos de metais, com destaque para o processamento de ouro, podendo dissolvê-lo sem usar água, cianeto e mercúrio (usado em mineração

artesanal), além de não liberar ácido sulfúrico e arsênio durante o processo. Como a mineração de ouro consome, em média, sete mil litros de água para produzir uma onça de ouro (28 gramas), essa tecnologia pode reduzir drasticamente o impacto da atividade no ambiente. Ademais, a Argo afirma que o DES é capaz de dissolver ouro 80 vezes mais rapidamente que o cianeto, podendo a tecnologia abrir espaço para eliminar a necessidade de refino do produto (BRIGHTMORE, 2019d).

Dentre os projetos desenvolvidos pelo *Mining Hub* encontra-se a fabricação de placas de rejeitos da *startup* Laminatus. O produto pode ser utilizado na construção civil, dando destino ao material que, em outra situação, seria acumulado nas barragens de rejeitos. Seu uso implica em redução do impacto ambiental da atividade mineradora pois gera menos resíduos e, conseqüentemente, diminui o risco relacionado à manutenção de barragens de rejeitos, além de possuir potencial para gerar novas receitas sob a forma de subprodutos do processo (TIAGO, 2019a).

O uso de biotecnologias, nanotecnologias e materiais avançados possuem foco em reduzir o impacto ambiental da mineração, o consumo de água e a liberação de CO₂, contribuindo para buscar remediar a imagem do setor junto à sociedade. A melhora nos materiais utilizados e produzidos reduz os gastos e eleva o valor adicionado, tornando possível gerar maiores receitas para as mineradoras. Em contrapartida, o emprego dessas tecnologias também apresenta grandes riscos para todos aqueles que a utilizam. Pelo fato de ainda serem materiais com curto histórico de aplicações, ainda não se sabe exatamente qual será seu comportamento no médio e longo prazo. Dessa forma, não é possível prever se a melhora dos materiais possui efeitos colaterais, ou mesmo se sua vida-útil será comprometida de maneira mais brusca no futuro.

3.7. Armazenamento de energia

A transição energética é marcada por uma constante evolução. Espera-se que até 2040 a demanda por energia aumentará em quase um quarto do valor observado em 2018, principalmente por conta do crescimento populacional e da urbanização. As fontes renováveis devem chegar a 40% da geração global à medida em que os países buscarem desenvolver a descarbonização, em comparação com os atuais 25% (LACLAU, 2019).

As inovações tornarão a energia solar e eólica e o armazenamento de carga cada vez mais acessíveis. A competição por materiais avançados, principalmente relacionados ao armazenamento de energia, como o vanádio, e aqueles usados para gerar bens mais leves e/ou resistentes, como a fibra de carbono e o nióbio, irão aumentar à medida que se tornem centrais para os próximos elos da cadeia produtiva. O desenvolvimento de uma variedade de produtos de alta tecnologia e ecologicamente corretos, como baterias, *smartphones* e *laptops*, depende fundamentalmente da capacidade de tornar viável a exploração desses materiais, condicionando também a expansão de sua própria demanda (MITCHELL, 2019b).

Quando levado em consideração o consumo de energia elétrica, diesel, gás natural liquefeito (GNL) e gás natural comprimido (GNC), o gasto energético pode responder por até 30% dos custos operacionais totais de uma mina (SWART, 2018). Segundo a Mitsubishi Electric, os inversores com tecnologia *Energy Saving*, quando usadas em motores elétricos, gerenciam o consumo de energia e prometem reduzir até 30% do consumo (ABM, 2019).

Mas é a eletrificação do transporte que promete ser a verdadeira mudança do jogo. As melhorias tecnológicas colocarão o desempenho e o preço dos veículos elétricos (EVs) a par com os veículos com motor de combustão interna já em meados da década de 2020. De fato, de acordo com Laclau (2019), espera-se que os EVs representem 66% das vendas globais de veículos até 2050.

Mark Smith, da Largo Resources, aposta que a mudança da estrutura de demanda por minerais será impulsionada pelo crescimento da necessidade de estocagem de energia, projetando um crescimento da demanda por baterias da ordem de 900% nos próximos cinco anos. Como resposta a isso a Largo Resources está investindo na produção de vanádio, principal matéria-prima para a *Vanadium Redox Battery* (VRB), considerada uma das melhores formas de estocagem de energia, pois a vida útil desse tipo de bateria pode ser considerada praticamente infinita se medida em número de ciclos de carga e descarga (ALVES, 2019c).

Por conta da questão ambiental, novas máquinas não poluentes estão sendo desenvolvidas para o setor minerador, como é o caso do protótipo LX2 da Volvo (EQUIPAMENTOS, 2018), que possui motor 100% elétrico e promete oferecer a mesma

eficiência ou até mesmo maior que os motores a combustão interna, além de menores custos operacionais e não emitir materiais particulados.

A análise dos *clusters* tecnológicos relevantes na mineração demonstrou que a trajetória tecnológica da Indústria 4.0 no mesmo está intimamente relacionada aos princípios de assistência técnica e interconectividade, discutidos no capítulo 2 por Hermann, Pentek e Otto (2016), e visa a transformar dados em insumos críticos, na forma em que as tecnologias informacionais apresentam diversas possibilidades de aplicação no setor. O objetivo da implementação das mesmas na área de pesquisa geológica é, certamente, melhorar a capacidade de planejamento da lavra e reduzir o volume de rejeitos gerados no processo.

Em relação à atividade de transportes, a mineração está buscando implementar soluções baseadas na redução do dano ambiental dos combustíveis e do desgaste de equipamentos, além da diminuição do número de paradas indesejáveis para manutenção. Esse conjunto de problemas causam grandes impactos financeiros para as companhias por meio da criação de ociosidade indesejada de máquinas e equipamentos.

No beneficiamento dos minérios, os objetivos da implantação da Indústria 4.0 estão intimamente relacionados à procura por maior eficiência hídrica e energética, ao aperfeiçoamento da qualidade dos produtos do setor e à redução do impacto ambiental da indústria extrativa mineral. De forma abrangente a toda a cadeia produtiva, o setor demonstra buscar estratégias baseadas na interconectividade e tem como objetivo reduzir acidentes, melhorar a eficiência produtiva e proporcionar aos trabalhadores a capacidade de analisar o processo de uma forma que seria impossível para os mesmos a olho nu. O quadro 4 busca apresentar uma síntese dos principais resultados observados ao longo do presente capítulo, explicitando as principais aplicações na mineração, resultados esperados e desvantagens no uso de cada *cluster* observado.

Quadro 4: Síntese dos resultados

Cluster tecnológico	Principais aplicações	Resultados esperados	Desvantagens
IA	Sistemas de transportes autônomos, otimização de processos, estimação geológica, balizamento de P&D	Melhora da eficiência produtiva, redução de custos, impacto ambiental e riscos aos trabalhadores	Possibilidade de violações de privacidade, discriminação e violação de sistemas fechados
<i>Big data</i>	Análise de desempenho, auto ajuste de processos, estimação de mineralizações	Melhora da produtividade e previsibilidade do produto, redução de gargalos produtivos	Estimações baseadas em amostras incompletas podem comprometer toda a análise de dados
IoT	Auto ajuste de processos, <i>blockchain</i> para rastreamento de produtos,	Serve de base para o desenvolvimento de todas as tecnologias informacionais	Riscos relacionados à segurança informacional, falta de padronização de dados e fraca infraestrutura de telecomunicações
Produção inteligente e conectada	Simulações de cenários, mapeamento da lavra, planejamento de frentes de desenvolvimento, prospecção mineral e segurança do trabalho	Melhora na segurança do trabalhador, produtividade da lavra e previsibilidade do produto	Riscos relacionados à segurança informacional
Nanotecnologia, biotecnologia e materiais avançados	Imobilização de equipamentos, anticorrosivos, redução do consumo hídrico, controle térmico, redução de resíduos	Redução do impacto ambiental, consumo hídrico e liberação de CO ₂	Não é possível prever no momento se esses materiais terão resultados satisfatórios no longo prazo
Armazenamento de energia	No setor, substituição energética de máquinas e equipamentos Nos elos posteriores, relacionado ao desenvolvimento de melhores baterias	No setor, pelo menos manter a produtividade constante com menor poluição Nos elos posteriores, desenvolver baterias com melhor vida-útil	Necessidade de reestruturar todo o fornecimento de energia para adequar à nova situação

Apesar das possibilidades de implementação de tecnologias apresentadas, ainda há forte resistência por parte das mineradoras à sua implementação. Tendo isso em mente, a próxima seção buscará responder por que as tecnologias disponíveis ainda não apresentam forte difusão no setor e o que as impede de alcançar seu pleno potencial disruptivo.

3.8. As principais barreiras à implementação das novas tecnologias

A evolução da mineração levou-a a uma trajetória que não é mais sustentável: é preciso movimentar cada vez mais estéril para obter minérios. Da mesma forma, dobrou-se nos últimos anos o consumo médio de água e eletricidade por cada tonelada de minério produzida. O grande desafio da mineração como um todo é sair desse cenário insustentável ou terá cada vez mais impactos negativos sobre a vida das pessoas. Apesar disso, há grandes riscos ao se usar tecnologias de forma desconexa “só porque está na moda” (RE-IMAGINAR, 2018).

Comparado aos setores de telecomunicação, bancário e de varejo, a mineração está ficando para trás no processo de digitalização. Os principais motivos para o fenômeno são o perfil fortemente conservador de sua indústria e a falta de integração entre os elos da cadeia. O setor, juntamente com áreas como agricultura e imobiliário, ainda registra classificações inferiores a outros setores quando se trata de indicadores de investimento em TICs (SIRINANDA, 2019).

Segundo BSA (2018), os principais obstáculos para as empresas adotarem a Indústria 4.0 no Brasil, não limitado à mineração, são estruturais, sendo principalmente os altos custos relacionados à digitalização, à dificuldade de implantação/integração de TI, à falta de proteção contra ameaças cibernéticas, à falta de força de trabalho qualificada, a fraca infraestrutura de comunicações no país, à existência de dificuldades para identificar parceiros tecnológicos e à pesada burocracia governamental.

Segundo Marcos Hillal, da ABB, fornecedora especializada de equipamentos e automação, a mineração demorou a engatar projetos de digitalização e está na lanterna,

mas nos últimos anos o setor mergulhou no processo de modernização. Os projetos de coleta de dados e usos de sensores são, para ele, a área mais avançada, e o que anima as mineradoras a implementar sistemas avançados são as evidências de retornos quase imediatos e a melhor flexibilidade do processo produtivo, além de contribuírem para reduzir custos e elevar a segurança operacional (TIAGO, 2019b). De outro lado, grande parte dessas tecnologias são oferecidas por fornecedores especializados, o que contribui para mitigar a apropriabilidade de retornos extraordinários pelas mineradoras num horizonte temporal maior.

Moorhead (GALEA-PACE, 2019b) acredita que a mineração pode demorar a adotar novas tecnologias por conta de sua forma tradicional de operação. Os investimentos no setor são intensivos em capital e grande parte das tecnologias empregadas sofrem de um *lock-in* tecnológico. Dado que pode ser muito caro e arriscado mudar a estratégia tecnológica da empresa paralelamente à evolução das tecnologias e que esse risco possa até mesmo ser maior que os retornos esperados, talvez seja melhor esperar que algumas tecnologias se desenvolvam melhor antes de aplica-las, podendo ser racional aguardar por mais provas acerca de seus resultados.

Moilanen (2018 *apud* Mexico, 2018) compreende que há uma resistência generalizada à novas tecnologias na mineração, definida pelo mesmo como uma “Síndrome da Tecnologia Comprovada”: Todas as empresas querem se beneficiar de novas tecnologias, mas por conta do fato de que são tecnologias recentes e sem provas concretas de sua eficácia num horizonte temporal maior, nenhuma quer ser a primeira a testá-las. Liezl van Wyk (BENTON, 2019) afirma que entre gastar dinheiro em perfurações de exploração ou em algum tipo de plataforma de dados, é mais provável que a companhia invista na primeira opção, já que isso é historicamente a mentalidade do setor.

De acordo com De Paula (2018), a mineração em geral prioriza projetos mais incrementais do que transformacionais e as tecnologias de fronteira estão apenas em estágio preliminar, com raros modelos de aplicação. Segundo Rendón (MEXICO, 2018), IoT e *machine learning* permitem que as empresas prevejam falhas sem precisar investir em uma equipe de pessoas para fazer isso manualmente, permitindo uma melhor utilização de recursos. Apesar disso, compreende que as mineradoras não desejam ser as primeiras a testar novas tecnologias, mas sempre querem ser as segundas.

Graças à IoT, objetos inanimados podem comunicar entre si, mas ao mesmo tempo que essa tecnologia está fazendo as minas ficarem mais seguras do que nunca, ela também abre a possibilidade de que *hackers* consigam entrar nos dados da companhia e acessar informações confidenciais. Ataques cibernéticos podem causar grandes impactos nas operações: podem causar desligamentos operacionais, danos aos equipamentos e à reputação, entre outros problemas. Isso significa que as empresas têm a responsabilidade adicional de cuidar de informações confidenciais (MEXICO, 2018).

A eficácia digital é fundamental para obter vantagens comparativas. Entretanto, segundo Mitchell (2019b), numa pesquisa recente com mais de 600 executivos de mineração e metais, foi revelado que 37% da administração tem pouco ou nenhum conhecimento do cenário digital. Em comparação, segundo uma pesquisa realizada pela Forrester (DELOITTE, 2017b), 74% dos executivos entrevistados afirma ter alguma estratégia de digitalização, mas apenas 15% acreditam ter as capacidades e habilidades necessárias para executá-la.

Segundo Deloitte (2017a), a maioria das companhias considera a inovação algo “desafiador e assustador” e não sabem por onde começar a inovar ou o que vai gerar mais valor para a empresa. Muitas vezes a companhia está limitada em quão inovadora ela pode ser porque são apenas um elo de uma grande cadeia de valor e não quer ter sua rotina perturbada pela inovação.

A automação dos processos pode otimizar as operações de mineração. De acordo com Juanes (MEXICO, 2018), as mineradoras estão começando a perceber que a inovação não é uma resposta para problemas específicos de curto prazo, mas sim uma solução estrutural de longo prazo. O processo de mineração é perigoso e complexo, várias tecnologias já foram desenvolvidas para melhorar as condições de segurança, mas elas ainda não estão suficientemente difundidas.

Fayad (MEXICO, 2018) afirma que a indústria mineradora reconhece que existe uma tendência ao avanço tecnológico, mas faltam iniciativas de implementação das inovações. O setor é resistente à adoção de novas tecnologias, geralmente causando sobreutilização de equipamentos, mas sabe que está correndo contra o tempo e, se falhar, as empresas do setor perderão sua competitividade.

Ives (2018) afirma que o grande desafio das mineradoras agora é determinar como operar em um mercado caracterizado por constantes interrupções, volatilidade,

dificuldades de acesso a insumos essenciais como água e energia, e uma economia chinesa crescendo abaixo de 7% em vez de 12% ao ano. Nesta nova ordem mundial, as mineradoras não conseguirão atrair talentos, investimentos ou apoio comunitário se se concentrarem apenas em comunicar o valor que atualmente trazem para as comunidades. Precisarão dar um passo adiante e articular o que defendem ao desenvolver negócios diferenciados e modelos projetados para gerar valor a longo prazo.

Sirinanda (2019) compreende que a próxima década na mineração será marcada por modelos de negócios digitais, porém, há desafios a serem superados: faltam estratégias digitais e de sustentabilidade claramente articuladas, as empresas não fazem ideia de por onde começar e não tem prioridades de onde investir. Dado a mentalidade conservadora do setor, não há grandes ambições e nem líderes corajosos o suficiente para desbravar a inovação, além da falta de pessoas talentosas e motivadas dentro das organizações, que levam a uma falta de competências para realizar a transformação digital.

De acordo com Chism, a digitalização é o futuro de toda a indústria e faz com que as empresas estejam mais abertas a experimentar novas tecnologias. Apesar disso, elas ainda estão resistindo a esses avanços. Juanes afirma que *“A questão que as mineradoras deveriam estar se perguntando é quando devem saltar para o trem da inovação”* (MEXICO, 2018).

A digitalização da mineração pode envolver uma revisão dos modelos de negócios vigentes para construir e desenvolver novas fontes de receita, mas sem avanços nos protocolos de autenticação e criptografia, as companhias hesitarão em implantar novas tecnologias, sendo necessário desenvolver soluções técnicas para desenvolver a confiabilidade da Indústria 4.0 (BSA, 2018).

As iniciativas digitais geralmente se concentram em soluções de assistência técnica e de procedimentos e nem sempre são direcionadas por uma estratégia bem articulada, nem por um vínculo com o valor gerado pelo negócio. Em vez de tomar iniciativas desconectadas entre si, a estratégia de digitalização da mina deve definir claramente o objetivo para a organização como um todo. Para desenvolver o sistema nervoso da mina digital, as companhias devem buscar melhorar sua capacidade de transformar dados em insumos importantes para resolver a ampla gama de problemas enfrentado pelo setor. A maioria das organizações usa apenas uma fração dos dados que

coletam, que muitas vezes é menor do que o volume potencial que poderia ser utilizado via IoT, e muitas ainda enfrentam dificuldades relacionadas à capacidade limitada de análise por conta da falta de integração entre seus sistemas operacionais (DELOITTE, 2017b).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou contribuir para a literatura de inovação apresentando as aplicações e implicações das tecnologias da Indústria 4.0 para a indústria mineradora. Os resultados indicam que as mineradoras estão cientes da necessidade de implementar as novas tecnologias, mas se mostram inseguras em relação aos riscos envolvidos em sua aplicação, além de terem receio de serem as primeiras a adotar novos equipamentos e não obterem resultados que compensem esse esforço. As inovações têm demonstrado possuir um caráter majoritariamente incremental e se concentram em melhorias de processos, buscando elevar a eficiência produtiva e mitigar os riscos físicos.

Foi analisado o fornecimento de aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 para a mineração, demonstrando que os principais esforços no desenvolvimento dessas tecnologias parte majoritariamente de fornecedores especializados, reforçando as evidências que comprovam a classificação setorial de Pavitt, além de tornar difícil assegurar a apropriabilidade num horizonte temporal maior pelas mineradoras. De modo geral, as novas tecnologias se concentram em *clusters* informacionais (IA, *big data*, IoT, produção conectada) e buscam principalmente aumentar a interconectividade de máquinas e equipamentos, reduzir a necessidade de manter trabalhadores diretamente na lavra, transferindo-os para centrais de controle remoto, bem como mitigar o impacto ambiental dessa atividade. As principais vantagens do uso destas tecnologias se apoiam na avaliação de grandes volumes de dados, o que dá apoio à tomada de decisão, tanto em relação às questões geofísicas, quanto em busca de novas oportunidades de lucros e de otimização de equipamentos. Os principais riscos estão relacionados à segurança informacional, principalmente a transmissão, armazenamento de dados e geração de modelos baseados em informações, além de não existir garantia de apropriabilidade dos resultados da aplicação dessas estratégias tecnológicas.

Não foi possível observar se o desenvolvimento da Indústria 4.0 será capaz de remodelar a estrutura produtiva da mineração, sendo explicado parcialmente pela existência de empecilhos relacionados aos riscos de prototipagem. Apesar disso, é possível concluir que o desenvolvimento dos *clusters* tecnológicos será essencial para o desenvolvimento da mineração, principalmente pelo desenvolvimento de processos mais eficientes e flexíveis diante das demandas minerais causadas por elas posteriores das diversas cadeias de valor.

Em relação à visão das mineradoras quanto à aplicação dos *clusters* tecnológicos no processo produtivo, estas acreditam que a aplicação será postergada pela existência de uma postura majoritariamente conservadora do setor em que estão inseridas. A respeito do ritmo de difusão esperado, os resultados apontam uma difusão acelerada das tecnologias relacionadas à produção conectada e ocorrerá mediante o melhoramento da infraestrutura de comunicações e de segurança informacional. Quanto à difusão e impacto esperado dos *clusters* tecnológicos, as tecnologias relacionadas ao armazenamento de energia aparentam se distanciar das expectativas, visto que os fornecedores de equipamentos demonstram apostar no desenvolvimento de fontes de combustíveis alternativas, indo contra as expectativas das mineradoras de impacto mediano desse *cluster* no setor.

Outro ponto importante acerca do impacto das tecnologias desse novo paradigma técnico-econômico é a questão da apropriabilidade dos resultados. Nota-se que grande parte das tecnologias apresentadas não são criadas dentro das mineradoras, mas sim por fornecedores especializados. O fato de que essas tecnologias são externas às mineradoras as transformam num produto a ser demandado pelas mesmas, o que lhes deixa incapazes de exercer o domínio estrito da tecnologia ou do serviço. Dessa forma, o uso das inovações relacionadas à Indústria 4.0 não garante lucros extraordinários em um horizonte de tempo maior, estando a apropriabilidade limitada pela capacidade de difusão tecnológica.

Sendo assim, a sugestão para futuros trabalhos é investigar como as políticas direcionadas à Indústria 4.0, tanto públicas quanto de associações privadas, podem ampliar e dinamizar as parcerias com os sistemas de inovações, de modo a aumentar a difusão dessas tecnologias. Também pode-se buscar entender de que forma os fornecedores especializados serão impactados pelo desenvolvimento da Indústria 4.0 e como essa tecnologia será repassada para as próximas etapas da cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

- A IMPORTÂNCIA de se investir em tecnologia e inovação. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.387, p.20-21. jan/fev. 2019.
- A TECNOLOGIA do Ore Sorting. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.385, p.16-16. out. 2018.
- ABM, Revista. *Energia limpa*. n.650, v.74, out/nov/dez/2018. 2018.
- _____ *Turbinando a inovação*. n.651, v.75, jan/fev/mar/2019. 2019.
- ALLIANZ Global Investors. *The Sixth Kondratieff – Long Waves of Prosperity*. Frankfurt am Main. 2010.
- ALMEIDA, C. M. *Indústria 4.0: O Plano Estratégico da Manufatura Avançada nos EUA*. 2019.
- ALMEIDA, P. R. O Brasil e a nanotecnologia: rumo à quarta revolução industrial. 2005. *Espaço Acadêmico*, Maringá, a. VI, n. 52, set. 2005.
- ALVES, R. A participação brasileira na maior convenção de exploração mineral. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.388, p.18-20. mar. 2019a.
- _____ Concentração no setor se mantém. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.392, p.20-21. jul. 2019b.
- _____ Largo Resources expande capacidade em Maracás. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.388, p.6-17. mar. 2019c.
- _____ Mudanças na lei podem tornar o setor mais atrativo. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.392, p.6-19. jul. 2019d.
- ARNOLD, C.; KIEL, D.; VOIGT K-I. Innovative Business Models for the Industrial Internet of Things. *Conference: International Association for Management of Technology (IAMOT)*. Vienna, Austria, v.26, 2017.
- AUTOMAÇÃO e controle tem foco na segurança das pessoas. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.391, p.45-47. jun. 2019
- BCG – Boston Consulting Group. *Value creation in mining 2019: Return to Strategy*. 2019.

BENTON, D. The future of the coal industry. *Mining Global Magazine*. p.30-51, nov. 2018.

_____ SSR Mining: Technology and growth through operational excellence. *Mining Global Magazine*. p.98-113, fev. 2019.

BITKOM; VDMA; ZVI. Implementation Strategy Industrie 4.0: report on the results of the industrie 4.0 platform. *Plattform Industrie 4.0 (2013-2015)*. Frankfurt, Alemanha, 2016.

BMNT. *World Mining Data 2019*. Vienna, abr. 2019. Disponível em: <<https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2019.pdf>>. Acesso em dez. 2019.

BRIGHTMORE, D. Chile: A country of opportunities in investment and development. *Mining Global Magazine*. p.62-71, jul. 2019a.

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

_____ Immersive virtual mining tours in the palm of your hand. *Mining Global Magazine*. p.62-71, abr. 2019c.

_____ Rethinking Natural Resources. *Mining Global Magazine*. p.52-61, out. 2019e.

_____ Top 10 Trends transforming the future of mining. *Mining Global Magazine*. p.84-97, abr. 2019e.

BSA FOUNDATION. *Brasil 4.0: O Futuro Impulsionado Pelos Dados das Indústrias Brasileiras*. 2018.

CAMPOS, B.; URRACA-RUIZ, A. Padrões Setoriais de Inovação na Indústria Brasileira. *Revista Brasileira de Inovação*. Rio de Janeiro, v.8, p.167-220. 2009.

CHEATHAM, B.; JAVANMARDIAN, K.; SAMANDARI, H. Confronting the risks of artificial intelligence. *McKinsey Quarterly*. abr. 2019.

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. *Mining Equipment, Technology and Services: A Roadmap for unlocking future growth opportunities for Australia*. mai. 2017.

DE PAULA, G. M. Consolidando Posições na mineração. *Minas Gerais do Século XXI*. Belo Horizonte; Rona Editora, 2002.

_____ Estudo de Sistema Produtivo Insumos Básicos. *Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil Diante de Inovações Disruptivas*. Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP, 2018.

DELOITTE. *Innovation in mining: Latin America 2017*. 2017a.

_____ *The digital revolution. Mining starts to reinvent the future*. 2017b.

_____ *Tracking the trends 2019: The top 10 issues transforming the future of mining*. 2018.

DERNIS et. al. World Corporate Top RandD investors: *Shaping the Future of Technologies and of AI*. EUR 29831 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

DIE BUNDESREGIERUNG. *Die neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland*. 2011.

EQUIPAMENTOS e tecnologias. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.385, p.41-44. out. 2018.

_____ *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.387, p.29-36. jan/fev. 2019a.

_____ *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.388, p.31-36. mar. 2019b.

FAGERBERG, J. Innovation: A Guide to the Literature. In: FAGERBERG, J.; MOWERY, D. C; NELSON, R. R. *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford University Press, USA. p.1-26. 2004.

FERRAZ et. al. Snapshots of a state of flux: how Brazilian industrial firms differ in the adoption of digital technologies and policy implications. *Journal of Economic Policy Reform*. 2019.

FILHO et. al. Concentração e centralização do capital na indústria de laticínios brasileira (2000-2011). *Revista de Administração e Negócios da Amazônia*. v.5, n.3, set/dez. 2013.

FITCH Solutions. *Copper Quarterly Report (Q4 2018)*. London, set. 2018a.

_____ *Iron Ore Quarterly Report (Q4 2018)*. London, ago. 2018b.

FORTES, R. V. Sobre o conceito de Exército Industrial de Reserva: aspectos históricos e atualidade. *Ética, direitos humanos e serviço social*. Temporalis, Brasília (DF), ano 18, n.36, p.256-273, jul/dez. 2018.

FREEMAN, C; SOETE, L. *A Economia da Inovação Industrial*. 3.ed. 2008.

FUCHS, C. *Industry 4.0: The Digital German Ideology*. 2018. TripleC. v.16, n.1, 2018.

GALEA-PACE, S. Leveraging digital transformation in the evolving mining sector. *Mining Global Magazine*. p.88-105, jul. 2019a.

_____ PT Merdeka Copper Gold: Achieving success with the Tujuh Bukit mine. *Mining Global Magazine*. p.12-37, abr. 2019b.

_____ SSR Mining: Leveraging technology amidst transformation in the space. *Mining Global Magazine*. p.114-128, out. 2019c.

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

GEOMETALURGIA automatizada. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.385, p.12-13. out. 2018.

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

HERMIDA, C. C.; XAVIER, C. L. Competitividade da indústria brasileira no período recente: desempenho de categorias selecionadas a partir da taxonomia de Pavitt. *Revista Brasileira de Inovação*. Campinas (SP), v.11, p.365-396, jul/dez. 2012.

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.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0. *International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry (IITI’16)”*, 1., 2016. Sochi, Russia, p.15–26, 2016.

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

KONDRATIEFF, N. D; STOLPER, W. F. *The Review of Economics and Statistics*, The Long Waves in Economic Life. v. 17, n. 6, p. 105-115. 1935.

KUPFER, D. Uma abordagem neo-schumpeteriana da competitividade industrial. *Ensaio FEE*. v.17, n.1 p.355-372, 1996.

LACLAU, B. *In the transition to electrification, will flexibility be your greatest asset?* 2019.

MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L.; OGANDO, L. D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. *BNDES Setorial*. v.43, p.325-361, 2016.

MEXICO *Mining Report 2019*. 2018.

MINE of the Future™. *Rio Tinto*. s.d. Disponível em: <<http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx>>. Acesso em 30 de out. de 2019.

MINERAÇÃO 4.0. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.385, p.8-9. out. 2018.

MITCHELL, P. Can mining decode the opportunities of the future? *EY*. 12 de abr. de 2019a. Disponível em: <https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/can-mining-decode-the-opportunities-of-the-future>. Acesso em 10 de set. de 2019.

_____ Top 10 business risks and opportunities 2020. *EY*. 24 de set. de 2019b. Disponível em: <https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/10-business-risks-facing-mining-and-metals>. Acesso em 10 de out. de 2019.

MULLAN, L. Swedish mining automation group: promoting digital transformation in Canada's mines. *Mining global magazine*. p.114-130, fev. 2019.

NETO, A. A. et al. A busca de uma identidade para a indústria 4.0. *Brazilian Journal of Development*. v.4, n.4, p.1379-1395, 2018.

NOGUEIRA, M. Vale iniciará testes com caminhões autônomos na mina de Carajás. *Notícias agrícolas*. Rio de Janeiro (Reuters). 24 de out. de 2019. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/maquinas-e-tecnologias/245521-vale->

[iniciara-testes-com-caminhoes-autonomos-na-mina-de-carajas.html#.Xb8e6TNKhPY>](#).

Acesso em 03 de nov. de 2019.

NOLAN, A, Artificial intelligence and the technologies of the Next Production Revolution. In: OECD. *Science, Technology and Innovation Outlook 2018*. p.51-74. 2019.

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

PAUNOV, C; GUELLEC, D. Perspectives on innovation policies in the digital age. In: OECD. *Science, Technology and Innovation Outlook 2018*. p.75-94. 2019.

PAVITT, K. Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory. In: *Research Policy*, 13, p.343-373, 1984.

PORTNOFF, A-Y; SOUPIZET, J-F. *Inteligência artificial: oportunidades e riscos*. Fundação FHC. 2019.

QUINTELLA, R. H.; DIAS, C. C. O papel dos paradigmas técnico-econômicos nos estudos organizacionais e no pensamento estratégico-empresarial. *Revista de Administração Pública*. 36(6):905-32. Rio de Janeiro, nov./dez. 2002.

RE-IMAGINAR a mineração. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXV, n.385, p.10-11. out. 2018.

RICARDO, D. *Princípios de Economia Política e Tributação*, Londres. 1817.

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

SANTOS, B. P. et. al. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*. v.4, n.1, p.111-124, 2018.

SCHUMPETER, J. A. *Capitalismo, Socialismo e Democracia*. 1942. Rio de Janeiro, Editora Fundo de Cultura, traduzido por Ruy Jungmann, 1961.

SERRA Grande pode ampliar aporte de produção. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.391, p.42-44, jun. 2019.

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

SMITH, A. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. 1776.

SWART, A. Rethinking mining strategy. In: DELOITTE. *Tracking the trends 2019: The top 10 issues transforming the future of mining*. 2018. p.4-7. 2018.

TIAGO, E. Empresas e startups buscam novas soluções no setor de mineração. *Valor Econômico*. 09 de set. de 2019a. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/09/09/empresas-e-startups-buscam-novas-solucoes-no-setor-de-mineracao.ghtml>>. Acesso em 10 de set. de 2019.

_____ 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 10 de set. de 2019

TIGRE, P. G. *Gestão da Inovação: a economia da tecnologia no Brasil*. Rio de Janeiro: Campus. 2006.

UM PREVIEW do que há de novo na Exposibram. *Revista Brasil Mineral*. Ano XXXVI, n.393, p.48-59. ago. 2019.

VALLOUREC troca gás natural por pó de carvão vegetal e reduz emissões de CO₂. *Diário do Comércio*. 18 de out. de 2019. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/vallourec-troca-gas-natural-por-po-de-carvao-vegetal-e-reduz-emissoes-de-co2/>>. Acesso em 19 de out. de 2019.

GOLDBERG, S. Setor de mineração traça estratégias para a retomada. *Valor Econômico*. 09 de set. de 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/09/09/setor-de-mineracao-traca-estrategias-para-a-retomada.ghtml>>. Acesso em 10 de set. de 2019.

VASCONCELLOS, P. O que é Gamificação? Conheça a ciência que traz os jogos para o cotidiano. *TechTudo*. 19 de jul. de 2016. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2016/07/o-que-e-gamificacao-conheca-ciencia-que-traz-os-jogos-para-o-cotidiano.html>>. Acesso em 28 de out. de 2019.

WANG, Y.; TOWARA, T.; ANDERL, R. Topological Approach for Mapping Technologies in Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). *Proceedings*

of the World Congress on Engineering and Computer Science 2017 Vol II. WCECS 2019, San Francisco, USA. out. 2017.

WONGTSCHOWSKI, P. *Análise IEDI: A indústria do Futuro no Brasil e no Mundo*. IEDI – Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. 2019.

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