



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS
NA MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Laura Scur Queiroz

Belo Horizonte

2022

Laura Scur Queiroz

**IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS
NA MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. DSc. Daniel Brianezi

Belo Horizonte

2022



LAURA SCUR QUEIROZ

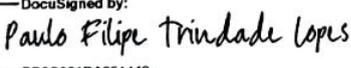
**IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS
NA MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 09 de fevereiro de 2022

Banca examinadora:


Daniel Brianezi, Presidente da Banca Examinadora
Prof. DSc Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador(a)

DocuSigned by:

BDOC901DA651446...
Paulo Filipe Trindade Lopes
DSc. Eng. Minas - CPO e cofundador da Beyond Mining


Evandro Carrusca de Oliveira
Prof. DSc Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, principalmente à minha mãe Simone, minha irmã Beatriz e minha avó Vilma pelo incentivo, por todos os esforços que dedicaram para que eu pudesse chegar onde estou hoje, pelo apoio nos momentos alegres e difíceis e por sempre acreditarem em mim.

Ao professor Daniel por toda atenção neste período de grande dedicação e desafios e também por todos os ensinamentos, pela confiança, pela disponibilidade e pelo incentivo.

A toda equipe do Governo Britânico em Belo Horizonte, que fez parte de grande parte da minha graduação e me permitiu que eu desenvolvesse grande parte dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Douglas Camilo, Anita Silva, Cláudia Diniz, Paulo Lopes e Luiz Henrique Machado, profissionais e colegas do setor de mineração extremamente competentes e grandes exemplos que foram essenciais para a realização deste estudo.

A todos os professores do DCTA do CEFET-MG, que fizeram parte dessa jornada, por todo aprendizado.

Agradeço aos colegas e amigos da Engenharia Ambiental e Sanitária, por todo apoio, convivência e momentos compartilhados ao longo desses anos, em especial: Arthur, Carol, Isabela, Julinha e Rafael.

Por fim, dedico este trabalho ao meu falecido pai, Marcus Vinícius.

RESUMO

QUEIROZ, LAURA SCUR. **Impactos da Indústria 4.0 no consumo e produção responsáveis na mineração de minério de ferro**. 2022. 106 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

A mineração tem uma grande importância para a existência da sociedade contemporânea é uma das principais atividades econômicas do Brasil gerando mais de 180 mil empregos diretos e respondendo por 30% do saldo da balança comercial. Nos últimos anos, o setor brasileiro presenciou tragédias que provocaram questionamentos sobre segurança, sustentabilidade e responsabilidade das mineradoras. Deste modo, torna-se extremamente necessário que as empresas e organizações ligadas ao setor busquem soluções que garantam processos que gerem menos impactos negativos. Até 2030, o Objetivo 12 de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) visa assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis e, caso a mineração entre em consonância com tais metas, as mineradoras estarão cada vez mais perto de cumprirem com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Como aliada desse processo, tecnologias da Indústria 4.0, como Inteligência Artificial, Internet das Coisas e Ciência dos Dados, se mostraram capazes de trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais para as empresas que as aplicaram. O presente trabalho identificou as principais tecnologias aplicadas nas três maiores mineradoras de minério de ferro em Minas Gerais e avaliou os impactos da Indústria 4.0 focados principalmente na contribuição para o desenvolvimento de uma exploração minerária mais responsável e sustentável. Foi observado que tais tecnologias aumentam a eficiência da exploração e produção, minimizam falhas, reduzem custos, reduzem o consumo de combustíveis, de água, diminuem a geração de rejeitos, o uso de produtos químicos, emissão de poluentes atmosféricos, entre outros impactos positivos que contribuem com o alcance das metas-chave 12.2, 12.4 e 12.5 do ODS 12. Apesar dos benefícios, a inovação enfrenta desafios no setor, como a mentalidade conservadora das lideranças da mineração, a falta de incentivos para desenvolvimento de tecnologias na

academia e grande burocracia no país, o que acaba por dificultar a implementação em grande escala das tecnologias digitais e o consequente aproveitamento dos seus benefícios.

Palavras-chave: Mineração Responsável. Inovação Tecnológica. ODS 12.

ABSTRACT

QUEIROZ, LAURA SCUR. **Impacts of Industry 4.0 on responsible consumption and production in iron ore mining**. 2022. 106 p. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

Mining has a great importance for the existence of contemporary society and is one of the main economic activities in Brazil, generating more than 180 thousand direct jobs and accounting for 30% of the balance of trade. In recent years, the Brazilian mining sector has witnessed tragedies that have raised questions about the safety, sustainability and responsibility of mining companies. In this way, it is extremely necessary for companies and organizations linked to the sector to seek solutions that guarantee processes that generate less negative impacts. By 2030, Sustainable Development Goal 12 of the United Nations (UN) Agenda 2030 aims to ensure sustainable production and consumption patterns, and if mining gets in line with these principles, mining companies will be close to meeting the Sustainable Development Goals (SDGs). As an ally of this process, Industry 4.0 technologies, such as Artificial Intelligence, Internet of Things and Data Science, have proved capable of bringing economic, environmental and social benefits to companies that have applied them. The present work identified the main technologies applied in the three largest iron ore mining companies in Minas Gerais and evaluated the impacts of Industry 4.0 focused mainly on the contribution to the development of a more responsible and sustainable mining exploration. It was observed that such technologies increase exploration and production efficiency, minimize failures, reduce costs, reduce fuel and water consumption, diminish waste generation, use of chemicals, emission of atmospheric pollutants, among other positive impacts that contribute to the achievement of key targets 12.2, 12.4 and 12.5 of SDG 12. Despite the benefits, innovation faces challenges in the sector, such as the conservative mentality of mining leaders, the lack of incentives for the development of technologies in the academy and large bureaucracy in the country, which ends up hindering the large-scale implementation of digital technologies and the consequent use of its benefits.

Keywords: Responsible Mining. Technological innovation. SDG12.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Expansão da Mineração em Minas Gerais desde 1980 até 2014.....	19
Figura 3.2 – Distribuição de algumas minas de ferro no Quadrilátero Ferrífero.....	20
Figura 3.3 – Quadro dos principais impactos negativos das operações de mineração.....	22
Figura 3.4 – Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.....	25
Figura 3.5 – Objetivo de desenvolvimento sustentável nº 12.....	26
Figura 3.6 – Linha do tempo da Revolução Industrial.....	29
Figura 3.7 – Os nove pilares da Indústria 4.0.....	31
Figura 3.8 – Principais tecnologias da Indústria 4.0 utilizadas por empresas brasileiras.....	32
Figura 3.9 – Influência quantitativa da Indústria 4.0 nos ODS.....	33
Figura 3.10 – As influências dos capacitadores I4.0 nos ODS.....	34
Figura 3.11 – Possibilidades de implementação de tecnologias de I4.0 na cadeia de valor da mineração.....	36
Figura 5.1 – Complexo Minas-Rio.....	44
Figura 5.2 – Quadro de Tecnologias da I4.0 na Operação de Minas-Rio.....	46
Figura 5.3 – Monitoramento remoto e automatizado dos caminhões autônomos.....	47
Figura 5.4 – Quadro de Tecnologias 4.0 aplicadas nas Operações de Ferro da Vale em MG.....	48
Figura 5.5 – Caminhão autônomo em operação na empresa Vale.....	49
Figura 5.6 – Quadro de Tecnologias 4.0 aplicadas nas Operações de Ferro da CSN em MG.....	51
Figura 5.7 – Monitoramento remoto e digital de poços e vertedouros.....	53

Figura 5.8 – Quadro de parâmetros usados na otimização do desmonte de rochas com <i>Data Science</i>	54
Figura 5.9 – Esquema representativo do desafio e da tecnologia aplicada.....	57
Figura 5.10 – Esquema ilustrativo do desafio de Gestão de Energia e Emissão.....	59
Figura 5.11 – Esquema ilustrativo da solução para medição da massa da pilha de minério de ferro.....	62
Figura 5.12 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento da solução para medição da umidade do minério.....	64
Figura 5.13 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento da tecnologia de monitoramento da água em tempo real.....	66
Figura 5.14 – Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados.....	67
Figura 5.15 – Quadro de correlação das áreas de impacto com as metas da ODS 12.....	83
Figura 5.16 – Contabilização das tecnologias aplicadas pelas mineradoras estudadas.....	84
Figura 5.17 – Principais áreas de impacto relacionados ao ODS 12 com a aplicação das tecnologias de I4.0.....	85
Figura 5.18 – Contabilização das metas do ODS 12 afetadas pelas tecnologias aplicadas....	86
Figura 5.19 – Correlação das tecnologias de I4.0 e as metas do ODS 12.....	87
Figura 5.20 – Quadro dos impactos da I4.0 correlacionado com outros ODS.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AHS	Sistema de Transporte Autônomo (em inglês)
ANM	Agência Nacional de Mineração
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ESG	Ambiente, Sociedade e Governança (em inglês)
I4.0	Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IMM	Monitoramento Integrado de Mina (em inglês)
IoT	Internet das Coisas (em inglês)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PNI	Política Nacional de Inovação
PRI	Princípios de Investimentos Responsáveis (em inglês)
TWA	<i>Total Water Analyser</i>
UI	Interfaces de Usuário (em inglês)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 As Atividades de Mineração e o Desenvolvimento Sustentável	19
<i>3.1.1 A Mineração em Minas Gerais</i>	<i>19</i>
<i>3.1.1.1 Os Impactos Ambientais e Sociais da Mineração em Minas Gerais</i>	<i>21</i>
<i>3.1.2 Os Critérios ESG</i>	<i>23</i>
<i>3.1.3 Agenda 2030</i>	<i>24</i>
<i>3.1.3.1 Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12</i>	<i>25</i>
<i>3.1.4. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 na Mineração</i>	<i>27</i>
3.2 A Indústria 4.0	28
<i>3.2.1 Contexto Histórico</i>	<i>28</i>
3.2.2 Tecnologias da Indústria 4.0	30
<i>3.2.3 A Indústria 4.0 no Brasil</i>	<i>31</i>
3.2.4 A Indústria 4.0 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	33
3.3 A Mineração 4.0	34
3.3.1 Mineração 4.0 e o ODS 12	37
<i>3.3.1.1 Inteligência Artificial (IA)</i>	<i>37</i>
<i>3.3.1.2 Internet das Coisas (IoT)</i>	<i>38</i>

	13
3.3.1.3. Sensores	39
3.3.1.4 Gêmeos digitais (Digital Twins)	39
<i>3.3.2 Mineração 4.0 e o ODS 12 na Mineração de Ferro de Minas Gerais</i>	<i>40</i>
4 METODOLOGIA	41
4.1 Pesquisa bibliográfica	41
4.2 Coleta de dados das mineradoras	42
<i>4.2.1 Definição das Organizações Estudadas</i>	<i>42</i>
4.3 Estudos de caso	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 Relatórios das mineradoras	44
<i>5.1.1 Anglo American</i>	<i>44</i>
<i>5.1.2 Vale</i>	<i>46</i>
<i>5.1.3 CSN Mineração</i>	<i>50</i>
5.2 Estudos de caso	53
<i>5.2.1 DataScience no desmonte de rochas com explosivos</i>	<i>53</i>
<i>5.2.2 Otimização do processo de amostragem do minério de ferro</i>	<i>56</i>
<i>5.2.3 Gestão de Energia e Emissão de poluentes</i>	<i>58</i>
<i>5.2.4 Medição de Massa de Pilha de Minério</i>	<i>60</i>
<i>5.2.5 Medição da umidade de minério de ferro</i>	<i>62</i>
<i>5.2.6 Monitoramento Quantitativo e Qualitativo da água em tempo real</i>	<i>65</i>
5.3 Análise dos relatórios de sustentabilidade das mineradoras e estudos de caso	66
5.4 Desafios e perspectivas futuras	88

	14
6 CONCLUSÃO	96
7 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
8 REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

A mineração tem sido a base da sociedade desde os primórdios da civilização, sendo impulsionada a partir da 1ª Revolução Industrial, que aconteceu entre final do século XVIII e início do século XIX. Nos últimos anos houve um significativo aumento da necessidade de metais por habitante e isso se deu principalmente por dois fatores: primeiramente pelo crescimento exponencial da população mundial e, em segundo lugar, pela procura crescente de produtos que possuam metais. Além disso, a mineração é a principal base para as tecnologias de baixo carbono, uma vez que para a produção de painéis solares, turbinas eólicas e baterias, há uma grande necessidade de minerais (THE WORLD BANK, 2018).

Além da expressiva necessidade de metais para o desenvolvimento da sociedade moderna, a mineração é uma atividade importante para o crescimento econômico de vários países, como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Moçambique e dentre eles, o Brasil, que ocupa uma posição mundial de destaque como detentor de grandes reservas mundiais. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (2016), a mineração é uma das principais atividades econômicas do país, servindo de base para todas as indústrias e sendo fonte de geração de riqueza para o Brasil. De acordo com o IBRAM (2020), no país existem 9.415 minas em operação, que geram mais de 180 mil empregos diretos e aproximadamente dois milhões indiretos, além de responder por 30% do saldo da balança comercial.

De acordo com Christofolletti *et al.* (2012), a atividade minerária é responsável por diversos impactos positivos e negativos, sendo exemplos de negativos o alto consumo de água, a alta produção de resíduos e rejeitos, a poluição sonora e do ar, o grande consumo de energia, entre outros. São considerados impactos positivos a geração de empregos, o desenvolvimento econômico e o aumento da receita dos governos municipais e estaduais. Nos últimos anos, o setor no Brasil presenciou tragédias que provocaram questionamentos sobre segurança, sustentabilidade e responsabilidade das mineradoras. Deste modo, torna-se extremamente necessário que as empresas e organizações ligadas ao setor busquem soluções cada vez mais sustentáveis e garantam processos e atividades que gerem menos impactos negativos.

Até 2030, o Objetivo 12 de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) visa assegurar padrões de produção e de consumo responsáveis (PLATAFORMA AGENDA 2030, 2022). Levando em consideração o contexto da mineração, as metas 12.2 (até 2030, alcançar gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais), 12.4 (até 2030, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente) e 12.5 (até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso) são de grande valia para o setor. Caso a atividade entre em consonância com tais metas, as mineradoras estarão cada vez mais perto de cumprirem com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), garantindo operações mais responsáveis, seguras e sustentáveis. Contudo, caso em desconformidade com tais objetivos, podem gerar danos ambientais, aumento das desigualdades sociais, além de outros significativos impactos negativos (OLIVEIRA; MORONG, 2019).

Como aliada desse processo de alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente de recursos naturais, a Indústria 4.0 é capaz de trazer tecnologias que aumentam a eficiência da exploração e produção que podem contribuir para a realização e fortalecimento da economia circular (ANDRADE *et al.*, 2018). No setor de mineração, a Quarta Revolução Industrial é chamada internacionalmente como Mineração 4.0, e de acordo com Byrne *et al.* (2016), ela facilitará recursos como digitalização, automação, análise, inteligência artificial e aprendizado de máquina. Os benefícios da transformação tecnológica têm o potencial de transformar as operações de mineração, pois permitem gerenciar e minimizar falhas, aumentar a eficiência do processo, reduzir os custos e atender aos requisitos ambientais (BYRNE *et al.*, 2016).

Neste contexto, diante da relevância que o tema supracitado representa, o presente trabalho visa avaliar os impactos da Indústria 4.0 para as operações de minério de ferro no estado de Minas Gerais, focados principalmente na contribuição para o desenvolvimento de uma

exploração mineral mais responsável e sustentável, permitindo alcançar as metas-chave 12.2, 12.4 e 12.5 do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 da Agenda 2030.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos da Indústria 4.0 de algumas operações de minério de ferro no estado de Minas Gerais, focados principalmente na contribuição para o desenvolvimento de uma exploração minerária mais responsável e sustentável, permitindo alcançar as metas-chave 12.2, 12.4 e 12.5 do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 da Agenda 2030.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantar as principais tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 e práticas sustentáveis adotadas pelas mineradoras de minério de ferro em Minas Gerais;
- Avaliar as mudanças geradas nos processos e operações das mineradoras com a adoção de tecnologias e práticas sustentáveis; e
- Verificar como as práticas adotadas pelas mineradoras contribuem para o atendimento do ODS 12 e de outros compromissos ligados à sustentabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

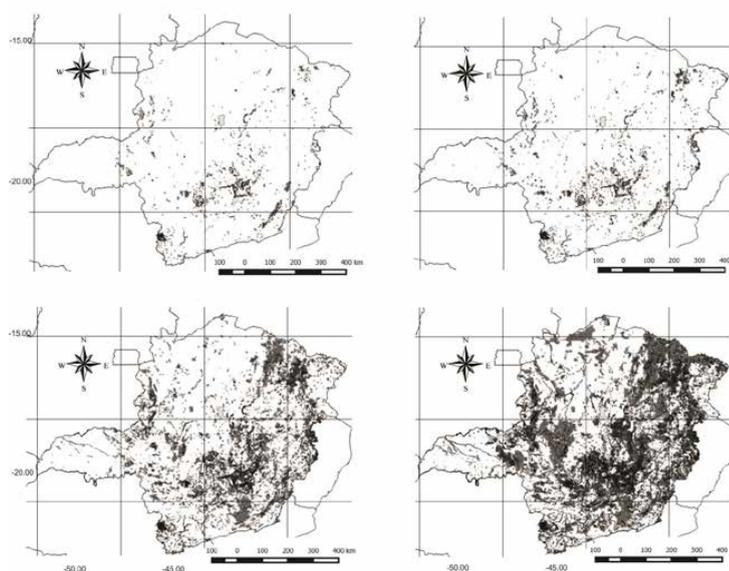
3.1 As Atividades de Mineração e o Desenvolvimento Sustentável

3.1.1 A Mineração em Minas Gerais

A mineração é uma indústria global que sempre esteve presente e em destaque na economia brasileira e é considerada um de seus principais pilares, uma vez que o setor contribui há anos de forma expressiva para o desenvolvimento econômico e social do Brasil (NEVES, 2019). Segundo o IBRAM (2020), dentro do território nacional, o estado que ganha destaque no setor de mineração é Minas Gerais, com 3.399 minas das 18.040 totais no Brasil. Em 2019, 59% do total de produtos comercializados em Minas Gerais foram minerais. Assim, observa-se a relevância do setor para a economia do estado.

Segundo Oliveira (2017), a mineração no estado de Minas Gerais iniciou-se no final do século XVII, com a descoberta do ouro. A Figura 3.1 mostra a evolução da mineração em Minas Gerais entre os anos 1980 até 2014.

Figura 3.1 – Expansão da Mineração em Minas Gerais desde 1980 até 2014.

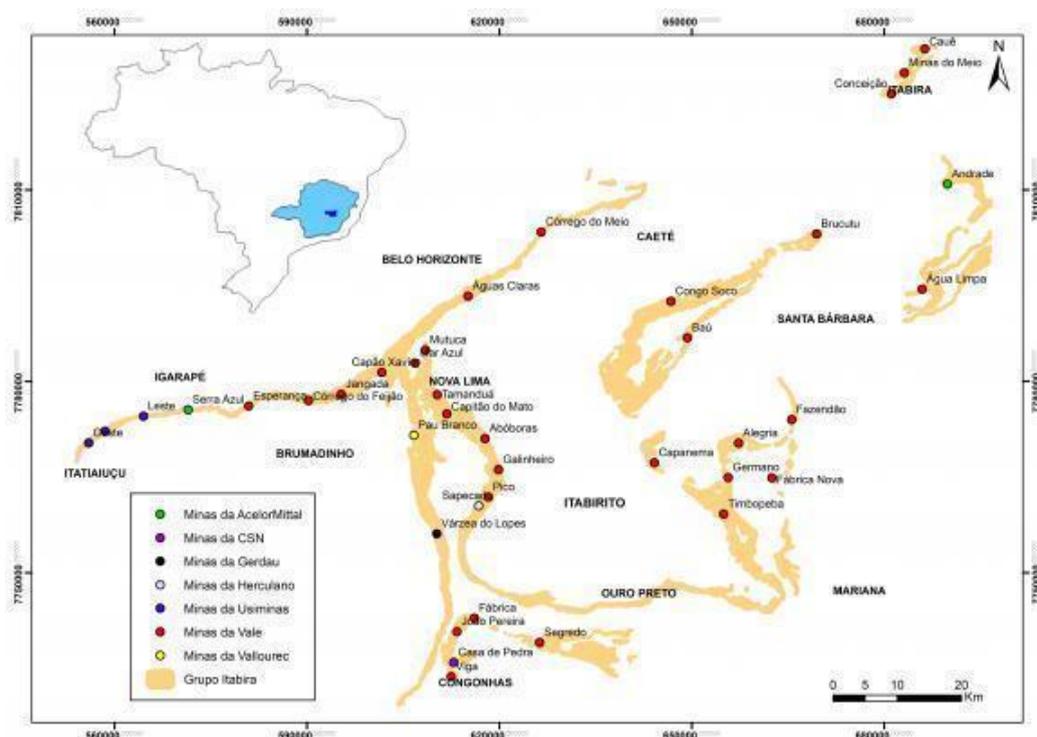


Fonte: Rezende (2016).

Na Figura 3.1 acima, o primeiro mapa mostra as áreas de mineração no período de 1980 a 1989; o segundo mapa mostra as áreas de mineração no período de 1990 a 1999; o terceiro mapa mostra as áreas de mineração no período de 2000 a 2010; e o quarto mapa mostra as áreas de mineração de 2010 a 2014 (REZENDE, 2016).

A atenção voltou-se para o minério de ferro de Minas Gerais no início do século XX, quando foram descobertas enormes jazidas de minério de ferro nas cidades de Itabira do Mato Dentro. Nessas minas, originalmente, se extraía o ouro, ocorrente no meio do minério de ferro. Com o fim do ouro nesses locais, atentou-se então para os enormes e ricos depósitos de minério de ferro. A partir dessas descobertas, diversas foram as empresas estrangeiras que se instalaram no estado para explorar o minério de ferro e até hoje, Minas é o estado com o maior número de mineradoras de ferro no Brasil (IBRAM, 2018).

Figura 3.2 – Distribuição de algumas minas de ferro no Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Ruchkys *et al.* (2019).

Atualmente, as maiores produtoras de minério de ferro no país estão localizadas no estado, que segundo Alves (2019), em termos de capacidade instalada, são a Vale, seguida pela CSN, Anglo American, Mineração Usiminas (MUSA) e Gerdau Açominas, que estão majoritariamente localizadas no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, como mostrado na Figura 3.2 acima.

3.1.1.1 Os Impactos Ambientais e Sociais da Mineração em Minas Gerais

Apesar de indubitavelmente gerar riqueza e crescimento econômico, sendo um dos importantes setores da economia brasileira e mineira, a indústria extrativa mineral está entre as atividades que mais causam impactos sociais e ambientais negativos, afetando o território onde se realiza a mineração de diversas formas (ARAÚJO, 2014).

Os efeitos ambientais negativos da atividade minerária estão associados às diversas fases de exploração dos bens minerais, desde a lavra até o transporte e beneficiamento do minério, muitas vezes estendendo-se até após o fechamento da mina. A mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, o que diversas vezes afeta a fauna e a flora da região (ARAÚJO, 2014). Além dessas questões, o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno são muito afetadas, principalmente com ruídos, tremores, poluição do ar, contaminação da água e também em relação à segurança, uma vez que as estruturas das operações como barragens, podem vir a romper e causar desastres.

Minas Gerais sofre com as consequências da exploração inadequada de muitos anos de exploração, mais especificamente, desde o século XVII. O alto número de operações, juntamente com a execução de práticas exercidas sem preocupações com o meio ambiente levou o estado a ser considerado uma região com alto índice de impactos ambientais e sociais (GONELLA *et al.*, 2015). Na Figura 3.3 pode-se verificar quais são os principais impactos ambientais negativos da mineração de acordo com o tipo de operação.

Figura 3.3 – Quadro dos principais impactos negativos das operações de mineração.

MÉTODO COMPONENTE	EXTRAÇÃO A SECO	EXTRAÇÃO ÚMIDA
Superfície terrestre	Devastação da superfície; Alteração de morfologia; Destruição de bens culturais; Perigo de desmoronamento.	Devastação da superfície; Alteração de morfologia; Alteração dos cursos d'água; Formação de grandes depósitos de resíduos e rejeitos.
Ar	Ruídos e vibrações em geral; Poeira; Vapores; Gases nocivos.	Ruídos e vibrações em geral; Poeira; Vapores; Gases nocivos.
Águas superficiais	Alteração do ciclo de nutrientes; Contaminação de águas residuais; Contaminação causada por erosão; Assoreamento.	Desnitrificação; Contaminação do leito receptor de águas residuais.
Solo	Erosão na Zona de Lavra; Dissecação e desidratação do solo; Perigo de alagamento.	Erosão de zona de lavra.
Flora	Destruição da flora na área de exploração; Destruição parcial/alteração na área circundante devido à alteração do nível freático.	Destruição de flora na área de exploração.
Fauna	Deslocamento da fauna.	Deslocamento da fauna.
População	Conflitos relacionados com o uso do solo; Estabelecimento ou aumento de populações a partir do local das atividades de mineração; Destruição das zonas de recreação.	Conflitos relacionados com o uso do solo; Estabelecimento ou aumento de populações a partir do local das atividades de mineração; Conflitos relacionados a barragens de rejeitos; Potenciais óbitos pelo rompimento de barragens.
Outros	Possível alteração de microclima.	Modificação do microclima; Proliferação de agentes patogênicos.

Fonte: Adaptado Gonella *et al.* (2015).

Nos últimos anos tem-se observado uma mudança de postura do setor minerário em relação às questões de sustentabilidade. Com o rompimento da barragem do Fundão da empresa Samarco na cidade de Bento Rodrigues – MG, em 2015, e do desastre do rompimento da barragem I da operação da Vale em Brumadinho – MG, em 2019, o setor tem enfatizado os componentes de proteção ao meio ambiente, responsabilidade social e aprimoramento de governança. Essa ênfase e preocupação com questões de sustentabilidade acompanham o impulsionamento dos critérios ESG (ambiental, social e de governança – ASG, em português), que estão sendo exigidos cada vez mais pelos investidores internacionais (IBRAM, 2021b).

3.1.2 Os Critérios ESG

De acordo com Ramos e Gomes (2021), a verificação dos critérios ESG (ambiental, social e de governança – ASG, em português) constitui um movimento global, voltado ao conhecimento, entendimento e monitoramento da prática de sustentabilidade das corporações por todas as partes interessadas (*stakeholders*), especialmente investidores, que têm liderado essa discussão nos últimos anos. O movimento é baseado nos Princípios para o Investimento Responsável (PRIs), lançados pela ONU em 2006. Os PRIs constituem diretrizes voluntárias e aspiracionais para que os critérios ESG sejam incorporados na prática de investimentos.

De acordo com Iberdrola (2021), os critérios ambientais analisam a contribuição e o desempenho de uma empresa em relação aos desafios ambientais, tais como as emissões de gases de efeito estufa, o desmatamento, a proteção da biodiversidade, a poluição do ar e os recursos hídricos. Para isso, o sistema utiliza métricas para avaliar o impacto ambiental das empresas e seus esforços para reduzi-los. Os critérios sociais avaliam a relação das empresas com trabalhadores, comunidades locais e cidadãos em geral, levando em consideração aspectos como emprego, saúde, segurança e diversidade. Os critérios de governança corporativa estão relacionados aos mecanismos de governança das empresas, aos direitos dos acionistas e às responsabilidades dos executivos. Para isso, são analisados os procedimentos

de decisão das empresas, a estrutura organizacional, os mecanismos de controle, entre outras questões de gestão.

Segundo a CNN (2021), o Brasil está em terceiro lugar no ranking das 19 economias mais vulneráveis do mundo, organizado pela MB Consultoria, baseado nos critérios ESG. Para o critério ambiental, foi utilizado um ranking da Universidade de Yale (Environmental Performance Index), que faz compilação de mais de 40 critérios diferentes sobre meio ambiente. Para o social, foi usado o índice de Gini, que mede o nível de desigualdade de renda de cada país. E, para o indicador de governança, foram usados os dados do Banco Mundial (World Governance Indicator). Os três indicadores foram ranqueados do pior para o melhor, sendo 100% o pior e 0% o melhor, e o Brasil ficou com 62%, atrás somente de Filipinas (64%) e África do Sul (68%). De acordo com a CNN (2021), não há perspectivas de melhoras no curto prazo, dado que a piora da desigualdade de renda pela pandemia de Covid-19 e a piora de governança do país nos últimos anos também tendem a se manter.

A abordagem ESG e a Agenda 2030 da ONU estão muito conectadas e reforçam a responsabilidade de organizações e lideranças para sustentar e fomentar negócios responsáveis e prósperos.

3.1.3 Agenda 2030

A Agenda 2030 é um plano de ação global desenvolvido em setembro de 2015, durante uma reunião entre 193 representantes dos Estados-membros da Organização das Nações Unidas, que busca o desenvolvimento sustentável em diversos âmbitos da sociedade e do planeta. O plano indica 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, para erradicar a pobreza e promover vida digna para todos, dentro dos limites do planeta. Esses objetivos e metas foram desenvolvidos de forma clara, para que todos os países adotem de acordo com suas próprias prioridades e orientem as suas escolhas para melhorar a vida da população atual e futura (PLATAFORMA AGENDA 2030, 2022).

Os ODS são integrados e mesclam as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental (FIGURA 3.4). Além disso, eles são o núcleo da Agenda e deverão ser alcançados até o ano 2030.

Figura 3.4 – Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.



Fonte: Plataforma Agenda 2030 (2022).

Os 17 objetivos representam um grande desafio para serem alcançados pelos países e pela população mundial, entretanto são indispensáveis ao desenvolvimento sustentável.

3.1.3.1 Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12

Segundo a Plataforma Agenda 2030 (2022), o objetivo 12 trata do “Consumo e Produções Responsáveis”, visando assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.

Figura 3.5 – Objetivo de desenvolvimento sustentável nº 12.



Fonte: Plataforma Agenda 2030 (2022).

De acordo com a Agenda 2030, as metas do ODS 12 visam promover a eficiência do uso de recursos energéticos e naturais, o acesso a serviços básicos e a infraestrutura sustentável. O objetivo prioriza também a informação, a gestão coordenada, a transparência e a responsabilização dos atores consumidores de recursos naturais como meios de alcançar padrões mais sustentáveis de produção e consumo (PLATAFORMA AGENDA 2030, 2022).

As metas propostas para alcançar o objetivo número 12 são as seguintes:

12.1. Implementar o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com todos os países tomando medidas, e os países desenvolvidos assumindo a liderança, tendo em conta o desenvolvimento e as capacidades dos países em desenvolvimento;

12.2 Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais;

12.3 Até 2030, reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial, nos níveis de varejo e do consumidor, e reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento, incluindo as perdas pós-colheita;

12.4 Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente;

12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso;

12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios;

12.7 Promover práticas de compras públicas sustentáveis, de acordo com as políticas e prioridades nacionais;

12.8 Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza;

12.a. Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo;

12.b. Desenvolver e implementar ferramentas para monitorar os impactos do desenvolvimento sustentável para o turismo sustentável, que gera empregos, promove a cultura e os produtos locais;

12.c. Racionalizar subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis, que encorajam o consumo exagerado, eliminando as distorções de mercado, de acordo com as circunstâncias nacionais, inclusive por meio da reestruturação fiscal e a eliminação gradual desses subsídios prejudiciais, caso existam, para refletir os seus impactos ambientais, tendo plenamente em conta as necessidades específicas e condições dos países em desenvolvimento e minimizando os possíveis impactos adversos sobre o seu desenvolvimento de uma forma que proteja os pobres e as comunidades afetadas. (PLATAFORMA AGENDA 2030, ODS 12, 2021).

3.1.4. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 na Mineração

Segundo o Fórum Econômico Mundial (2017), a integração do ODS 12 nas operações de mineração pode contribuir para uma produção mais sustentável ao impor metas para minimizar o uso e desperdício de recursos, como por exemplo, minimizando o uso de água e energia, terra e químicos; a produção de rejeitos, efluentes e emissões.

De acordo com o Atlas produzido pelo Fórum Econômico Mundial (2017), as metas-chave do ODS 12 da ONU relevantes para a atividade de mineração são:

12.2 Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

12.4. Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida desses, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente sua liberação para o

ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.

12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios. (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, p. 74, 2017).

Para que essas metas sejam alcançadas, a inovação e aplicação de novas tecnologias nas operações de mineração são imprescindíveis. Segundo Bertayeva *et al.* (2019), atualmente são diversas as soluções que podem auxiliar a mineração em todo o seu ciclo produtivo, viabilizando a significativa redução dos custos, aumento da eficiência da produção e da sustentabilidade da operação. De acordo com Mutanov *et al.* (2019), a intensidade da tecnologia digital e da inovação tem se refletido amplamente no nível de desenvolvimento econômico sustentável, o que além de beneficiar o meio ambiente é também um diferencial competitivo para as empresas.

Dentro do contexto da inovação industrial está a chamada Indústria 4.0 que engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem que estão mudando as formas de produção das indústrias no mundo todo. A interação entre sustentabilidade e Indústria 4.0 pode gerar resultados satisfatórios e de grande impacto na mineração, pois as tecnologias podem contribuir para a realização da economia circular na operação, além de apoiar a otimização de uso, reuso, remanufatura e reciclagem dos recursos, o que contribui para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (ANDRADE *et al.*, 2018).

3.2 A Indústria 4.0

3.2.1 Contexto Histórico

De acordo com Dastbaz e Cochrane (2019), a Revolução Industrial iniciou na Inglaterra, nos anos 1760. Com o surgimento da força a vapor no alvorecer da Primeira Revolução Industrial,

ocorreu uma mudança significativa no modo de produção, evoluindo do modelo artesanal para a mecanização em grande escala. Segundo Da Costa (2017), a Segunda Revolução Industrial, após a Segunda Guerra Mundial, foi marcada por diversas inovações tecnológicas desenvolvidas na época, com destaque para barcos de aço movidos por motores a vapor potentes, para as linhas de produção e para o uso de energia elétrica.

A Terceira Revolução Industrial, conhecida por “revolução digital”, começou entre os anos de 1950 e 1970, e destacou-se pela automação e robotização em linhas de produção, pelo amplo uso de semicondutores, dos computadores, do armazenamento e processamento digital, dos telefones móveis e da internet (DA COSTA, 2017) (FIGURA 3.6).

Figura 3.6 – Linha do tempo da Revolução Industrial.



Fonte: PwC (2016).

Indústria 4.0 é uma estratégia desenvolvida pelo governo alemão em 2013 e é descrita como a Quarta Revolução Industrial. Nessa era, o desenvolvimento da Internet, dos sensores, a sofisticação de softwares e hardwares, entre outras tecnologias, permitiu que todo o processo de produção fosse incluído em redes baseadas na Internet que transformam fábricas comuns em fábricas inteligentes (LÖÖW *et al.* 2019).

A digitalização será o mais poderoso impulsionador da inovação nas próximas décadas e, segundo Tartarotti *et al.* (2018), ela transformará todas as infraestruturas essenciais nos setores de energia, automobilística, saúde, mineração, entre outras. Estima-se que o benefício econômico da digitalização e o aumento das redes do mundo real nos campos de energia,

saúde, transporte, educação e governo estão em um nível de 56 bilhões de euros por ano (TARTAROTTI *et al.*, 2018).

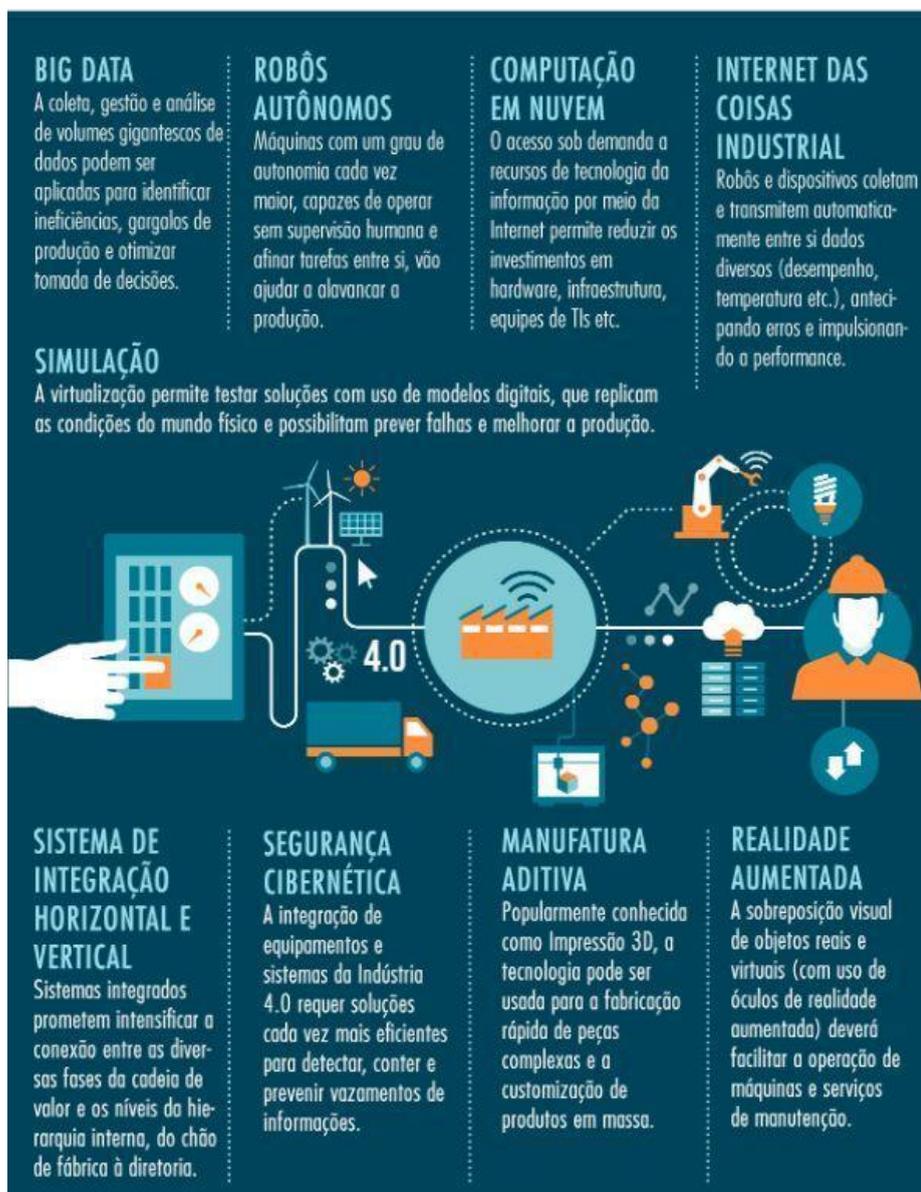
Ao considerar a Indústria 4.0 juntamente com os fatores da sustentabilidade (meio ambiente, equilíbrio econômico e social), pode-se gerar ótimos resultados. Com essa interação, tais fatores da sustentabilidade são diretamente e indiretamente afetados pelos principais pontos da aplicação da Indústria 4.0 nas operações em geral, como segurança nos processos, a eficiência no consumo de recursos e o desenvolvimento de processos mais flexíveis e inteligentes (ANDRADE *et al.*, 2018).

Segundo Andrade *et al.* (2018), considerando as operações fabris, os conceitos que permeiam a Indústria 4.0 poderiam ser aplicados para desenvolver processos de fabricação mais sustentáveis, e até mesmo contribuir para a aplicação da economia circular. Algumas tecnologias podem ser utilizadas para o design do produto, monitoramento, manutenção (preventiva, preditiva e corretiva), otimização de uso e dos recursos, reuso, remanufatura e reciclagem.

3.2.2 Tecnologias da Indústria 4.0

A literatura existente identifica vários componentes no que diz respeito à Indústria 4.0, porém de acordo com um relatório da consultoria Boston Consulting Group, de 2015, as tecnologias que se estabeleceram como os pilares da Indústria 4.0 podem ser observados na Figura 3.7 abaixo.

Figura 3.7 – Os nove pilares da Indústria 4.0.



Fonte: Adaptado Leuzinger (2018).

3.2.3 A Indústria 4.0 no Brasil

Segundo um estudo realizado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp), em 2018, mostrou que o Brasil quase não tem relevância em nenhuma das áreas-chave da Quarta Revolução Industrial, como *Big Data*, Internet das Coisas e Inteligência Artificial. Porém, nos últimos anos foi observado um aumento significativo no número de indústrias brasileiras que utilizam tecnologias digitais, mesmo que em estágio inicial. De acordo com uma pesquisa de 2018 da Confederação Nacional da Indústria (CNI), entre o início de 2016 e

o ano de 2018, o percentual das grandes empresas que utilizam pelo menos uma tecnologia digital passou de 63% para 73%.

Figura 3.8 – Principais tecnologias da Indústria 4.0 utilizadas por empresas brasileiras.

FOCO	TECNOLOGIA	UTILIZA
Processo de produção/ gestão dos negócios	Automação digital sem sensores, uso de Controlador Lógico Programável (CLP) sem sensores	30
	Automação digital com sensores para controle de processo	46
	Automação digital com sensores com identificação de produtos e condições operacionais, linhas flexíveis	23
	Coleta, processamento e análise de grandes quantidades de dados (<i>big data</i>) da empresa	21
	Monitoramento e controle remoto da produção com sistemas do tipo MES e SCADA*	19
	Manufatura aditiva, robôs colaborativos (<i>cobots</i>)	13
	Sistemas inteligentes de gestão, como comunicação M2M (máquina-máquina), gêmeo digital (<i>Digital Twin</i>) e Inteligência artificial (IA)	9
Desenvolvimento de produto	Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento e manufatura de produtos	37
	Prototipagem rápida, impressão 3D e similares	16
	Simulações/análise de modelos virtuais para projeto e comissionamento (Elementos Finitos, Fluidodinâmica Computacional, etc.)	13
Produto/novos modelos de negócio	Coleta, processamento e análise de grandes quantidades de dados (<i>big data</i>) sobre o mercado; monitoramento do uso dos produtos pelos consumidores	9
	Utilização de serviços em nuvem associados ao produto	16
	Incorporação de serviços digitais nos produtos (Internet das Coisas ou <i>Product Service Systems</i>)	11

Nota: A soma dos percentuais supera 100% devido a possibilidade de múltiplas respostas.

**MES – Manufacturing Execution Systems; SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.*

Fonte: CNI (2018).

Segundo a CNI, a automação digital com sensores para controle de processos é a tecnologia mais utilizada pelas empresas (46% de assinalações). Em segundo, aparece sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento e manufatura de produtos (37% de assinalações) (FIGURA 3.8).

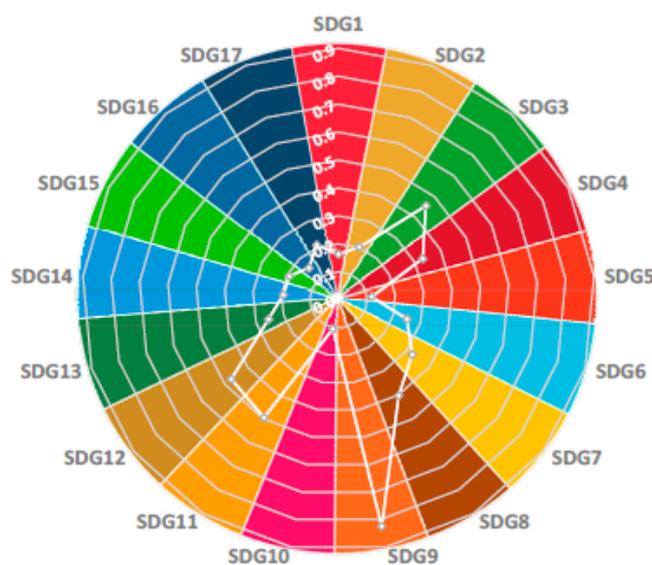
Com a pressão de investidores e aumento da competitividade, a mineração, uma indústria conservadora e tradicional, mudou seu foco para eficiência e produtividade apenas na última década. A busca por tecnologias da Indústria 4.0 no setor se tornou cada vez mais comum nos últimos anos e, como consequência, os avanços e desenvolvimentos da Indústria 4.0 e fábricas

inteligentes, uma vez adaptados e transferidos para os requisitos específicos da produção da mina e da cadeia de valor da mineração criaram a Mineração 4.0.

3.2.4 A Indústria 4.0 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Um ponto importante da transformação digital é que, pela primeira vez, a tecnologia não é vista simplesmente como um novo meio de promover somente o crescimento econômico das empresas, mas também como um elemento que permitirá um futuro mais sustentável. De acordo com Mabkhot *et al.* (2021), as tecnologias I4.0 têm um impacto significativo no cumprimento dos ODS. Essa influência é explicitamente declarada nas 8 metas do ODS 9; indústria, inovação e infraestrutura, e podem ser deduzidas implicitamente da maioria dos outros 161 alvos. As influências quantitativas das tecnologias nos ODS podem ser observadas na Figura 3.9, na qual estão indicadas quais Objetivos de Desenvolvimento Sustentável possuem maior sinergia com as soluções da Indústria 4.0 (MABKHOT *et al.*, 2021).

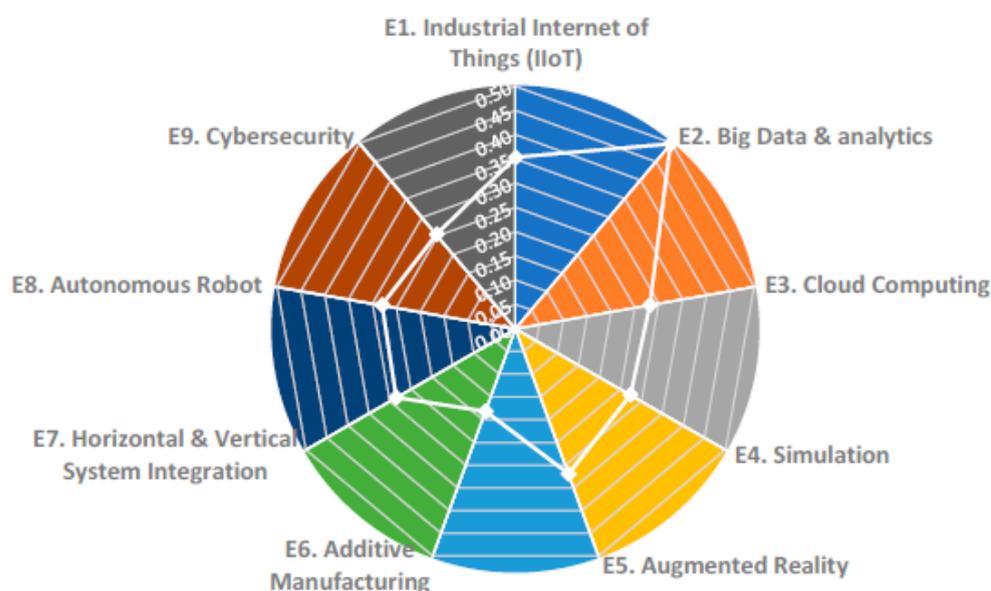
Figura 3.9 – Influência quantitativa da Indústria 4.0 nos ODS.



Fonte: Mabkhot *et al.* (2021).

A pesquisa traz também quais são as tecnologias da Indústria 4.0 que possuem os maiores impactos positivos no cumprimento das ODS nas operações industriais como um todo. Segundo Mabkhot *et al.* (2021), *Big Data* e *Internet of Things* são as tecnologias que são responsáveis pelas maiores influências neste contexto.

Figura 3.10 – As influências dos capacitadores I4.0 nos ODS.



Fonte: Mabkhot *et al.* (2021).

3.3 A Mineração 4.0

A Quarta Revolução Industrial está mudando o cenário da mineração. Uma série de esforços estão sendo feitos no desenvolvimento e inovação de sistemas e processos de produção mais eficientes. A Mineração 4.0 (Indústria 4.0 na indústria de mineração) está conectando pessoas para promover grandes mudanças e melhorar a eficiência operacional em seus negócios.

De acordo com Insight Editor (2020), o desenvolvimento de uma mina totalmente automatizada e controlada envolve uma série de etapas e tecnologias. Na primeira fase de automação isolada, inicia-se a instalação da infraestrutura de telecomunicações em todos os espaços das minas subterrâneas e a céu aberto, tais como: cabeamento estruturado, fibra ótica, salas de controle, links sem fio, redes Wi-Fi, equipamentos de telefonia, servidores, dispositivos para expansão do sinal de celular, nós de comunicação móvel, circuito fechado de televisão, controle de acesso, e comunicação por rádio. O objetivo da instalação dessa infraestrutura é oferecer serviços de telecomunicações, como comunicação digital por rádio,

telefonia pela internet, vídeo, sinal de celular e conectividade sem fio Wi-Fi (WORLD ECONOMIC FORUM, 2017).

Posteriormente, continua-se a digitalização do processo e a integração de todos os sistemas descritos anteriormente através da criação de cópias virtuais em tempo real de cada uma das atividades de mineração, por meio das informações fornecidas por sensores ou dispositivos eletrônicos localizados em equipamentos, máquinas, veículos, pessoas, etc (INSIGHT EDITOR (2020). Entre os sistemas a serem digitalizados e integrados estão sistemas de localização e rastreamento, sistemas de evacuação, sistemas anticolisão, monitoramento de energia, monitoramento de gases, telemetria de equipamentos, vídeo em movimento. A ideia é gerenciar as informações de todos os sistemas do processo de mineração em um único banco de dados centralizado, para posteriormente operá-los e controlá-los remotamente, bem como planejar ações futuras na mina (WORLD ECONOMIC FORUM, 2017).

De acordo com a MAPFRE Global Risks (2021), as principais tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) para a mineração são automação e robótica, inteligência artificial, a Internet das coisas, sensores, drones, realidade virtual e gêmeos digitais. Caso essas tecnologias sejam adotadas, as empresas de mineração podem não apenas dar um grande salto tecnológico, mas também abordar questões críticas dos critérios ESG e da Agenda 2030, aderindo aos padrões recentes da indústria. A Figura 3.11 mostra quais são as principais tecnologias e possibilidades de aplicação em toda a cadeia de valor de mineração.

Figura 3.11 – Possibilidades de implementação de tecnologias de I4.0 na cadeia de valor da mineração.



Fonte: Adaptado Mine Connect (2018).

A mina de ouro de Boliden, na Suécia, foi a primeira operação totalmente digital conectada no mundo (ABB, 2021). Em 2012, a mina foi a primeira do globo a empregar uma combinação de redes sem fio (*wireless*), telefonia IP e posicionamento. Hoje, toda a comunicação ocorre via rede sem fio, o que levou a mina de Garpenberg de Boliden ser considerada a mina mais moderna da Suécia.

Toda essa conexão permitiu o monitoramento remoto constante do status operacional de cada aspecto da mina. Além disso, as necessidades de manutenção podem ser previstas com base na análise contínua dos *big data* coletados da eficiência operacional da mina subterrânea. Essas soluções digitais contribuíram para um aumento de produção de 60% da mina de Garpenberg, e garantiu uma redução drástica da poluição sonora, do consumo de energia e água. O aspecto de sustentabilidade das operações também foi aprimorado. Os sistemas de ventilação inteligentes ajustam os ventiladores para necessidades específicas, economizando até 50% de energia em comparação com os sistemas anteriores.

3.3.1 Mineração 4.0 e o ODS 12

Levando em consideração as principais tecnologias da Indústria 4.0 que foram apresentadas pela literatura como mais relevantes para a mineração, o presente tópico busca analisar as possíveis aplicações das soluções que têm correlação com a sustentabilidade, especialmente focado no ODS 12, compilando e discorrendo acerca dos possíveis impactos das tecnologias existentes.

3.3.1.1 Inteligência Artificial (IA)

Em aplicações industriais, a Inteligência Artificial se refere a uma coleção de técnicas que permitem a automação de tarefas humanas por máquinas, como por exemplo: compreensão da linguagem, aprendizado, raciocínio e resolução de problemas (GLOBAL MINES GUIDELINES GROUP, 2019). Avanços tecnológicos recentes e amplo financiamento contribuíram para a implementação mais abrangente da IA. O avanço da computação e armazenamento baseados em nuvens revolucionaram ainda mais esse campo. Pesquisadores e profissionais estão agora fazendo novos avanços e descobertas em um ritmo mais acelerado.

De acordo com Klein (2019), uma das principais aplicações do princípio da IA na mineração são os Sistemas de Transporte Autônomos (AHS, em inglês), que permitem auxiliar no controle dos veículos utilizados na operação, sendo capaz de melhorar a segurança, expandir o tempo de vida útil do equipamento e elevar a eficiência produtiva. Segundo a Jadoul (2020), a introdução de AHS, por exemplo, pode ajudar a produtividade e a eficiência energética, uma vez que a frota de transportes autônomos poderia reduzir o consumo de combustível em aproximadamente 12,4 litros por hora e as emissões de gás carbônico em 236 toneladas métricas por veículo. Assim, em uma mina de minério de ferro média com uma produção de 150 milhões de toneladas por ano, uma frota AHS reduziria o fluxo de carbono em mais de 15.000 toneladas por ano. Isso equivale a 3.300 carros sendo retirados da rua.

Outro exemplo de aplicação de Inteligência Artificial e sensores é na análise de concentração de minerais valiosos (*Ore Sorting*, em inglês). Quando aplicada no início do processo, a tecnologia é capaz de identificar e selecionar os minerais com maior concentração e, assim,

conservar os recursos, evitando a geração de rejeitos e resíduos. A separação antecipada de material de baixo valor na cadeia do processo não aumenta apenas a eficiência do tratamento, mas também reduz o consumo de água e energia nas etapas seguintes do processo (FRAUNHOFER IIS, 2018).

O Aprendizado de Máquina (*machine learning*), que é uma das tecnologias que faz parte da Inteligência Artificial, se concentra em máquinas que pegam dados relacionados a uma tarefa específica e aprendem com esses dados para construir um modelo. Este processo permite a geração de uma resposta inteligente aos novos dados apresentados ao sistema por meio do uso de algoritmos e modelos estatísticos que identificam padrões e fazem inferências (GLOBAL MINES GUIDELINES GROUP, 2019).

O *Machine Learning* é utilizado pela mineração para analisar dados geofísicos com o objetivo de detectar possíveis mineralizações, resultando na identificação de oportunidades de exploração viáveis, tanto geologicamente quanto economicamente. Segundo Neto (2019), sem essa tecnologia esses lugares seriam amplamente detonados por explosivos para que pudessem ser analisados, porém com a sua aplicação, é possível classificar o tipo de rocha a ser extraída, o que otimiza o posicionamento de explosivos para a detonação e, conseqüentemente, diminui os impactos ambientais negativos do amplo uso de explosivos. Com essa identificação assertiva, há uma diminuição de locais amplamente explorados, diminuição na geração de resíduos, na emissão de particulados, na área desmatada e no uso de recursos hídricos (KLEIN, 2019).

3.3.1.2 Internet das Coisas (IoT)

A utilização da IoT possibilita melhor controle da produção, uma vez que com ela é possível realizar o monitoramento em tempo real de todas as atividades da operação. Segundo Salam (2020), o monitoramento adequado da mina usando a IoT ajudará a reduzir o potencial de escoamento, percolação, lixiviação química para os recursos hídricos subterrâneos e superficiais, e reduzir a erosão do solo e o movimento de contaminantes da mina para as águas superficiais e subterrâneas. As soluções IoT para uma mineração sustentável fornecem

monitoramento integrado de minas (IMM, em inglês), nas quais os sistemas de mineração estão fortemente acoplados ao monitoramento adequado.

De acordo com Neto (2019), a interconectividade, por meio da IoT, não pode ser completamente destrinchada das outras tecnologias citadas anteriormente (IA e *machine learning*), uma vez que a IoT é imprescindível para garantir que a comunicação entre equipamentos e seres humanos consiga trazer os benefícios previstos pela IA e pela análise de dados.

3.3.1.3. Sensores

Os sensores microeletrônicos distribuídos nos equipamentos compõem os sistemas de coleta e processamento de dados e estão diretamente ligados ao IoT. Com eles é possível realizar o monitoramento de diversos equipamentos, de estruturas, do ambiente e do pessoal, permitindo um maior controle das informações pelos profissionais que realizam a análise desses dados e, conseqüentemente, garante maior estabilidade operacional, melhoria da produtividade e redução do impacto ambiental (NETO, 2019).

3.3.1.4 Gêmeos digitais (Digital Twins)

A Digital Twin é uma representação virtual do mundo físico digitalmente no qual fazem uso de interfaces de usuário (UI, em inglês) modernas e visualizações avançadas para ajudar o operador a entender o que está acontecendo na operação (INSIGHT EDITOR, 2020). Os dados do Digital Twins vêm da conectividade baseada na Internet das Coisas (IoT) em toda a sua operação de mineração. Os sensores coletam dados sobre o status em tempo real, condições de trabalho ou posição dentro de um sistema físico. A nuvem recebe e processa todos os dados que os sensores monitoram, com a entrada sendo analisada em relação aos dados de negócios e contextuais. Oportunidades de melhoria são identificadas no mundo virtual e, em seguida, aplicadas ao mundo físico.

De acordo com Beloglazov *et al.* (2020), um dos alvos prioritários dos sistemas digitais para minas é a análise de parâmetros dinâmicos em um fluxograma de processo. Como exemplo, os autores citam o processo de moagem, que é o processo com maior demanda energética na

operação de mineração. A modelagem dinâmica possibilita a implantação do controle da velocidade de rotação do tambor com o objetivo de otimizar o processo de moagem, com isso os sistemas ficam mais confiáveis e exigem menores trocas de equipamentos e manutenções, o que diminui o consumo de equipamentos novos nas operações e a consequente geração de resíduos.

3.3.2 Mineração 4.0 e o ODS 12 na Mineração de Ferro de Minas Gerais

Mesmo que ainda incipientes, grandes mineradoras localizadas no Brasil estão investindo nessas tecnologias para suas operações, e a pandemia foi um fator de alto impacto para impulsionar esses investimentos. Com as proibições de viagens, fechamentos de fronteiras e restrições de movimento, processos automatizados e remotos provaram seu valor, uma vez que estão permitindo a continuidade da produção, tornando possível entregar o mesmo ou até melhor padrão de prestação de serviços em tempo real (NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO, 2021).

Empresas como Anglo American, Vale e CSN apresentaram em seus recentes relatórios de sustentabilidade do ano de 2020, soluções para problemas de sustentabilidade que possuem ligações com as tecnologias da Indústria 4.0. Programas de inovação aberta, como o *Mining Hub* (MH) e o FiemgLab, recentemente criados no Brasil, têm impulsionado o desenvolvimento e aplicações dessas tecnologias nas operações brasileiras e principalmente mineiras.

Dessa maneira, são diversas as empresas e startups no Brasil que estão desenvolvendo soluções dentro da perspectiva da Indústria 4.0 e que possuem casos de sucesso dentro das principais mineradoras estudadas por esta pesquisa. Sendo assim, o intuito do presente trabalho é trazer quais são as principais soluções da I4.0 aplicadas nessas operações de minério de ferro e também expor quais são os resultados e impactos dessas aplicações, com enfoque na produção e consumo responsáveis.

4 METODOLOGIA

4.1 Pesquisa bibliográfica

Com o intuito de cumprir os objetivos desta pesquisa, primeiramente, foi realizada uma pesquisa de revisão bibliográfica, que consistiu em consultas a publicações, artigos técnicos e científicos, livros e teses. O trabalho foi desenvolvido de forma descritiva e analítica, demandando uma coleta dos dados disponibilizados por organizações chave dos setores de mineração, de sustentabilidade e de tecnologia, como o Fórum Econômico Mundial, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o Banco Mundial (The World Bank), a Organização das Nações Unidas (ONU), a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e o grupo de Especialistas Internacionais para Enriquecimento de Pesquisa e Intercâmbio de Conhecimento (IEREK).

A pesquisa bibliográfica iniciou-se com o mapeamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ligados à Mineração, com base no levantamento de dados realizado pelo Centro de Columbia sobre Investimento Sustentável, de 2017, que consistiu em um trabalho de conectar todos os 17 ODS com as operações de mineração, identificando como as empresas de mineração de todos os portes podem incorporar os ODS relevantes em seus negócios e operações.

O presente trabalho baseou-se no levantamento de dados relacionados ao ODS número 12 (Consumo Responsável e Produção), focando especificamente nas metas-chave 12.2 (Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais), 12.4 (Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente) e 12.5 (Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso).

Levando as metas-chave pontuadas em consideração, a pesquisa busca identificar como a Indústria 4.0 contribui para que as empresas de mineração de ferro cumpram essas metas e fiquem cada vez mais próximas de ter operações mais sustentáveis e responsáveis.

4.2 Coleta de dados das mineradoras

Os dados das tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas nas mineradoras que apoiam a economia circular em suas operações foram coletados através da análise dos respectivos relatórios de sustentabilidade e dos cases de sucesso das mineradoras escolhidas que participaram de *hubs* de inovação para mineração, como o *Mining Hub*. Os pontos de destaque coletados nesses materiais são as tecnologias utilizadas, os objetivos da aplicação das soluções e os resultados da aplicação.

4.2.1 Definição das Organizações Estudadas

Os critérios adotados para a escolha das organizações avaliadas foram: os empreendimentos deveriam estar localizados no estado de Minas Gerais; os empreendimentos deveriam ser mineradores de ferro; e os empreendimentos deveriam possuir diferentes portes.

Os critérios supracitados foram utilizados com o intuito de padronizar o objeto de estudo, uma vez que, tais requisitos permitiram que pudesse ser feita uma comparação das tecnologias utilizadas nas empresas, visto que o produto explorado é similar e o porte da empresa pode influenciar nos tipos de tecnologia utilizados, garantindo uma maior variedade.

Sendo assim, foram escolhidas as 3 maiores mineradoras de ferro, em termos de produção anual, localizadas no estado de Minas Gerais, baseadas no levantamento da revista Brasil Mineral (2021): Vale S.A, Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A e CSN Mineração S.A.

4.3 Estudos de caso

Com o objetivo de fazer análises específicas sobre algumas tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas nas mineradoras elencadas para o presente trabalho, foram elencadas empresas e

startups que aplicaram suas soluções em algumas das operações das mineradoras estudadas e que possuem resultados correlacionados com o apoio ao cumprimento do ODS 12. Foi realizada uma análise dos principais resultados das aplicações das tecnologias, buscando realizar uma comparação entre as operações antes e depois das soluções.

No contexto geral, a análise de dados foi realizada de forma qualitativa, em que o método quantitativo é caracterizado pelo levantamento de dados nos relatórios de sustentabilidade e estudos de caso informados pelas empresas. Já no caso da pesquisa qualitativa, a metodologia possui um caráter exploratório. A análise foi definida como exploratória e descritiva, baseando-se na definição das informações coletadas, de forma a explicitar as situações, classificar e identificar os principais impactos da Indústria 4.0 na sustentabilidade das operações de mineração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Relatórios das mineradoras

5.1.1 Anglo American

Em Minas Gerais, a Anglo American opera o projeto Minas-Rio, que consiste em uma operação de exportação de minério de ferro totalmente integrada, com a mina e a planta de beneficiamento no município de Conceição do Mato Dentro. Além disso, o projeto conta com um mineroduto de 529 km e uma instalação de exportação dedicada no Porto do Açu, no Rio de Janeiro (ANGLO AMERICAN, 2021b?). De acordo com o relatório da empresa, a sua produção anual média é de 23,1Mt (base úmida), o que a caracteriza como uma mineradora de grande porte, de acordo com a base da Agência Nacional de Mineração (2019), que classifica minas com produção bruta anual maior que 1.000.000 t como de grande porte (FIGURA 5.1).

Figura 5.1 – Complexo Minas-Rio.



Fonte: Anglo American (2021b?).

A mineradora possui um novo modelo operacional baseado no seu programa *Future Smart Mining*, que foca na congruência de tecnologia, digitalização e sustentabilidade (ANGLO AMERICAN, 2021a?). Através do *Future Smart Mining*, a empresa lançou o seu Plano de Mineração Sustentável, que visa alinhar a empresa aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

No que tange às tecnologias da Indústria 4.0, a Anglo American (2021c?) focou os seus esforços nas iniciativas:

- **Mina Concentrada:** visa atender à necessidade de maior precisão na mineração, com o mínimo de energia, água e intensidade de capital. A empresa está aplicando tecnologias que selecionam com mais precisão os metais ou minerais desejados, proporcionando reduções superiores a 30% no uso de água, energia e intensidade de capital e produzindo menos resíduos no processo. Isso inclui a recuperação de partículas grossas, classificação em massa e recuperação ultrafina.
- **Mina sem Água:** Aplicação de soluções para redução da dependência em relação à água, para a plena recuperação e reciclagem de rejeitos secos. Para isso, o foco da empresa se deu na recuperação de partículas grossas; lixiviação inovadora e rejeitos secos.
- **Recuperação de partículas grossas:** Este processo esmaga as partículas 2,5 vezes maiores do que o normal, reduzindo o consumo de energia e o tempo de moagem e levando a um aumento de 20% na produção e 85% na recuperação de água.
- **Classificação em massa:** Elimina o desperdício no início do processo, o que leva a um aumento de 5 a 7% na classificação inicial de minérios. As recuperações dos produtos são ainda maiores quando combinadas com princípios de engenharia de grau, onde graus mais altos tendem a ser encontrados em frações mais finas, garantindo maior recuperação.
- **Recuperação ultrafina:** A empresa perde cerca de 10-15% da recuperação de ultrafinos atualmente porque as partículas minerais são muito pequenas. Com isso, estão testando diferentes métodos de recuperação ultrafinos e esperam aumentar as recuperações no futuro em mais 4%.

De acordo com informações fornecidas na página do programa *Future Smart Mining* da empresa, existem dois exemplos aplicados de tecnologias da Mineração 4.0 que podem ser relacionados ao ODS 12 na operação da Anglo American em Minas Gerais, como pode ser observado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Quadro de Tecnologias da I4.0 na Operação de Minas-Rio.

Desafios relacionados ao ODS 12	Tecnologia	Solução
Consumo de combustível, água, exploração do solo, geração de rejeitos, poluição sonora, emissão de particulados	Gêmeos Digitais	Através dos modelos gerados pelos gêmeos digitais, é possível prever e controlar todo o processo de produção mineral de maneira avançada. Com a sua aplicação, houve a melhoria de 7% no desempenho da planta impulsionada pelo descongelamento sistemático e reconfiguração do circuito. Basicamente, trata-se de mudanças no bombeamento e na tubulação para modificar o circuito, garantindo a eliminação de gargalos e configurando a planta para operar da forma mais eficiente possível, utilizando a infraestrutura existente.
Geração de rejeitos	Sensores, visão computacional, Inteligência Artificial	A empresa aplicou sensores e visão computacional para triagem em massa do minério e seleção assertiva. A solução elimina o desperdício antecipadamente, o que leva a um aumento de 5 a 7% na classificação do minério.

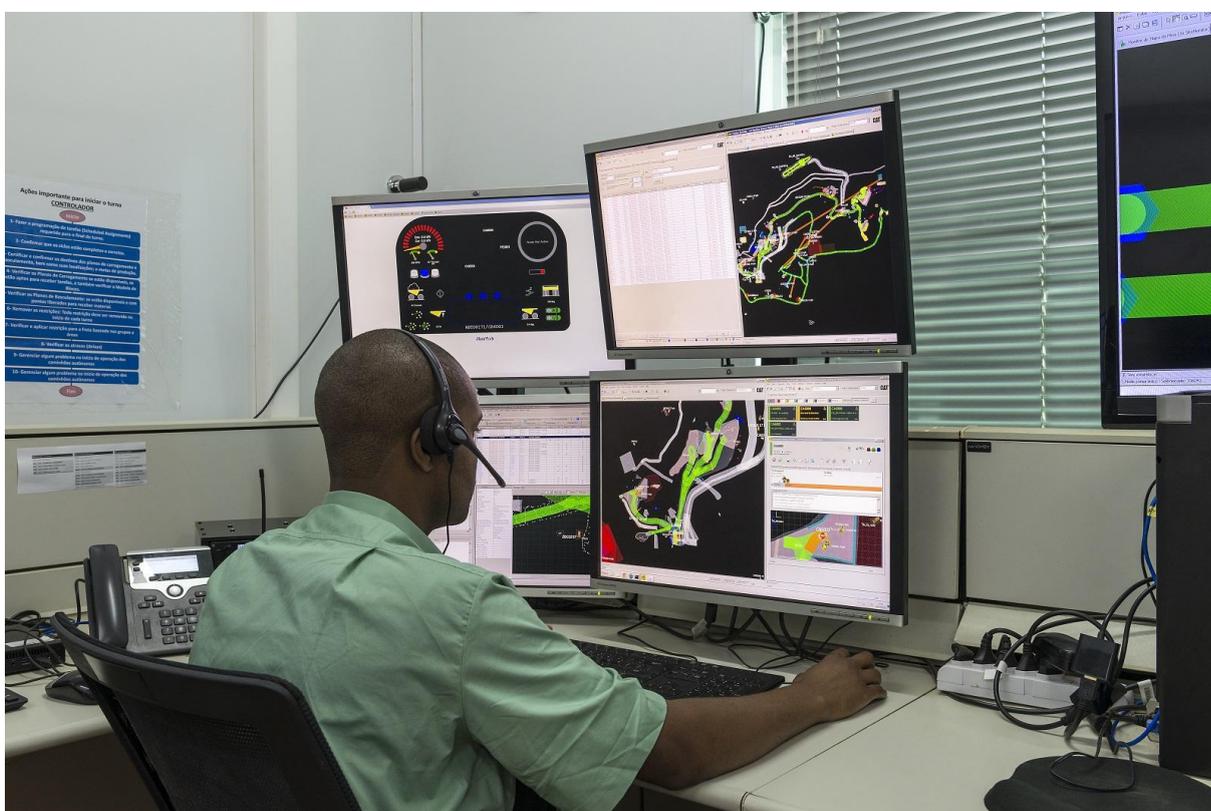
Fonte: A autora (2022).

5.1.2 Vale

Vale S.A. é uma das maiores mineradoras do mundo e também a maior produtora de minério de ferro, de pelotas de ferro e de níquel no Brasil. Além desses materiais, a empresa também produz manganês, ferro liga, cobre, bauxita, potássio, caulim, alumina e alumínio (VALE, 2021a?). Minas Gerais é o berço da empresa, mais especificamente, a cidade de Itabira. Segundo a Vale (2021a?), após 70 anos de operação, o estado continua respondendo por mais da metade da produção de minério de ferro, com mais de 20 minas em operação. A produção de finos de minério de ferro da empresa totalizou 300,4 Mt em 2020, e a produção de pelotas totalizou 29,7 Mt no mesmo ano, o que a caracteriza como uma empresa de grande porte, de acordo com a classificação da Agência Nacional de Mineração (2019).

A Vale começou a implantar em 2016 um programa de transformação digital para se adequar à Indústria 4.0, o que permite que a empresa promova integração entre as operações, reduzir custos, simplificar processos, aumentar a produtividade e a eficiência operacional, e alcançar os melhores índices de saúde e segurança, como exemplo da Figura 5.3. O programa se baseia em quatro pilares: 1) *Analytics*, 2) Sistemas e cadeias integradas, 3) Robotização e 4) Equipamentos autônomos. A empresa está utilizando Internet das Coisas, *Advanced Analytics*, *Machine Learning*, Inteligência Artificial e aplicativos móveis, entre outras inovações tecnológicas (VALE, 2018b).

Figura 5.3 – Monitoramento remoto e automatizado dos caminhões autônomos.



Fonte: Vale (2018a).

Suas principais ações são focadas no aumento de produtividade, que visam elevar a eficiência operacional e sustentabilidade da empresa por meio do uso de tecnologias (VALE, 2021b?).

Na Figura 5.4 pode-se observar algumas tecnologias da Mineração 4.0 implementadas pela empresa nos últimos anos.

Figura 5.4 – Quadro de Tecnologias 4.0 aplicadas nas Operações de Ferro da Vale em MG.

Desafios relacionados ao ODS 12	Tecnologia	Solução
Consumo de água	Internet das Coisas, Inteligência Artificial	A solução contempla a gestão em tempo real da captação e controle do reservatório principal, até o abastecimento da usina, dispondo de alertas em caso de situações críticas. Além disso, gera relatórios gerenciais para entender consumos setoriais, taxa de reaproveitamento de água e taxa de utilização (VALE, 2021b?).
Consumo de combustível, emissão de particulados, consumo de matéria prima	Sistema autônomo, GPS, radares e inteligência artificial	Caminhões autônomos fora de estrada com capacidade para 240 toneladas de minério (FIGURA 5.5). A produtividade de caminhões fora de estrada tem ganhos expressivos. A operação autônoma também aumenta a vida útil do equipamento, gera menor desgaste de peças e redução dos custos de manutenção. A Vale espera conseguir aumento da vida útil de equipamentos da ordem de 15%. Estima-se ainda que o consumo de combustível e os custos de manutenção sejam reduzidos em 10%. A economia de combustível usado nas máquinas resulta em volume mais baixo de emissões de dióxido de carbono e materiais particulados (VALE, 2018a).

Fonte: A autora (2022).

Figura 5.5 – Caminhão autônomo em operação na empresa Vale.



Fonte: Vale (2018a).

5.1.3 CSN Mineração

Com mais de cem anos de produção de minério de ferro, a CSN Mineração opera de forma integrada por meio de operações em minas próprias (Casa de Pedra e Engenho); beneficiamento de minério; participação na MRS Logística, transportando produto para mercado nacional e terminal portuário; e fornecimento de minério de ferro de qualidade para o mercado transoceânico. Além disso, possui uma das maiores reservas de minério de ferro no mundo, certificada em mais de 3,02 bilhões de toneladas. A operação fica localizada no Quadrilátero Ferrífero, na cidade de Congonhas-MG, e possuem uma capacidade instalada de produção de 33,0 milhões toneladas de minério de ferro por ano nas plantas de beneficiamento em Casa de Pedra (Planta Central) e Pires (Plantas à Seco) (CSN MINERAÇÃO, 2021).

De acordo com o Relatório Integrado da empresa (2020), a CSN Mineração constantemente desenvolve pesquisas, busca soluções e inovação para seus processos. Recentemente, a empresa criou a CSN Inova e com o Centro de Pesquisas do grupo CSN, como suporte para os projetos da CSN Mineração. A CSN Inova foi criada em 2018 e é o braço de inovação do Grupo CSN, com o objetivo de sistematizar e liderar o processo de inovação da empresa. Também em 2018 foi criada a Coordenação de Automação da CSN Mineração, com a finalidade de concentrar esforços em busca de soluções de melhorias e aumento de disponibilidade dos ativos de automação (CSN MINERAÇÃO, 2021).

Referente à inovação, a CSN Mineração desenvolveu uma estratégia de implementação de automação e futuramente, muitas das operações que atualmente são realizadas por colaboradores presencialmente, passarão a ser feitas a distância. Além disso, a empresa possui planos de implementar equipamentos e processos de Internet das Coisas (IoT) e Manufatura 4.0, nas quais as máquinas são integradas com o uso de sensores e atuadores, e permitem também que pessoas e máquinas possam alterar seu modo de funcionamento remotamente (CSN MINERAÇÃO, 2021) (FIGURA 5.6).

Figura 5.6 – Quadro de Tecnologias 4.0 aplicadas nas Operações de Ferro da CSN em MG.

Desafios relacionados ao ODS 12	Tecnologia	Solução
Consumo de combustível, geração de resíduos, poeira e poluição sonora	Sistema autônomo, GPS, Internet das Coisas, radares e inteligência artificial	Caminhões autônomos com capacidade para transportar 240 toneladas, controlados por meio de sistemas de computador, Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), radares, sensores laser e inteligência artificial. A tecnologia possui um sistema de georreferenciamento, que comanda o tráfego virtualmente e contém todos os parâmetros reais das vias e áreas de manobras do local. Caso haja qualquer obstáculo, o veículo interrompe imediatamente suas operações, até que o operador o ative novamente. O projeto prevê reduzir até vinte caminhões utilizados na mina Casa de Pedra, nas movimentações de minério de ferro e estéril. Isso permitirá significativa redução de custos operacionais, redução de emissões de pelo menos 5%, geração de resíduos, poeira e poluição sonora (CSN MINERAÇÃO, 2021).
Consumo de combustível, geração de resíduos, poeira e poluição sonora	Sistema de satélite e inteligência artificial	O Sistema de Gerenciamento de Frota permite otimizar as rotas de transporte de material ao longo das áreas operacionais e reduzir o uso de veículos. Além disso, auxilia no sistema de manejo de rejeito filtrado da barragem Casa de Pedra e é utilizado em conjunto com o sistema de telemetria para monitorar as condições do equipamento (CSN MINERAÇÃO, 2021).
Consumo de combustível	Realidade virtual, Internet das Coisas	A teleoperação de Trator de esteiras permite que o colaborador opere de forma remota o trator de esteiras de grande porte, por meio de uma cabine com visão em tempo real da mina e dados operacionais. É um processo mais seguro, mais rápido e eficiente, e reduz o tempo da máquina parada, o consumo de combustível e a consequente emissão de CO ₂ , garantindo também maior produtividade do equipamento (CSN MINERAÇÃO, 2021).
Consumo de combustível, geração de resíduos	Robotização, Internet das Coisas, automação	A Perfuratriz Semi Autônoma permite monitorar e operar remotamente o trabalho da perfuratriz. O equipamento permite maior segurança, aumento de produtividade, redução de consumo de combustível, emissão de CO ₂ , geração de resíduos e custos operacionais (CSN MINERAÇÃO, 2021).

Fonte: A autora (2022). (continua)

Desafios relacionados ao ODS 12	Tecnologia	Solução
Produção de rejeitos e resíduos	Robotização e automação	Reprocessamento de rejeitos: Dentro do conceito de economia circular, na CSN Mineração, os rejeitos dispostos nas Barragens passarão por rebeneficiamento nas Plantas de Concentração Magnética de Alta Intensidade, por ainda conterem elevado teor de ferro. Neste processo, os potentes concentradores magnéticos são capazes de retirar minério de ferro do rejeito e, conseqüentemente, há redução da quantidade de rejeito que vai para o empilhamento (CSN MINERAÇÃO, 2021).
Consumo de combustível, água, exploração do solo, geração de rejeitos, poluição sonora, emissão de particulados	Gêmeos digitais	Integração de informações e dados da companhia: O software realiza a otimização do sistema de produção da CSN Mineração, desde a mina até o porto. A plataforma objetiva o aumento do desempenho operacional por meio da integração de dados e simulações que auxiliam na tomada de decisão. Um dos principais recursos da tecnologia é o <i>digital twin</i> , que possibilita a criação de modelos virtuais idênticos aos reais, permitindo a simulação de eventos que viabilizarão o mapeamento de possíveis cenários, além de traçar o perfil de funcionamento de um novo sistema e/ ou equipamento, antes mesmo de sua implementação (CSN MINERAÇÃO, 2021).
Consumo de água	Internet das Coisas	O monitoramento remoto e digital de poços artesianos e vertedouros da mina, que pode ser observado na Figura 5.5, garante o maior controle do nível do lençol freático, assim como o abastecimento dos processos industriais e a manutenção do curso d'água que abastece as comunidades locais. Esse sistema de monitoramento impede a inundação de áreas de lavra e a otimização do consumo de recursos hídricos nesses locais.

Fonte: A autora (2022). (conclusão)

Figura 5.7 – Monitoramento remoto e digital de poços e vertedouros.



Fonte: CSN Mineração (2021).

5.2 Estudos de caso

5.2.1 DataScience no desmonte de rochas com explosivos

O desmonte de rochas é a forma mais barata e eficiente para desmembrar a rocha do solo e transportá-la para exploração dos seus minérios. A explosão da rocha é uma forma de cominuição, ou seja, é a quebra do material em partes menores. Esse processo explosivo é extremamente complexo, pois possui muitos parâmetros e variáveis que ocorrem simultaneamente, como parâmetros geométricos, parâmetros da rocha, questões operacionais,

porte dos equipamentos etc. Tais dados possuem relações e interdependências simultâneas, por isso é possível usar a Ciência dos Dados (*Data Science*) para criar ferramentas e automatizações para processar esses dados e otimizar o desmonte de rochas. Para isso, a empresa Beyond Mining desenvolveu uma tecnologia baseada nos parâmetros listados na Figura 5.8, abaixo.

Figura 5.8 – Quadro de parâmetros usados na otimização do desmonte de rochas com *Data Science*.

parâmetro	descrição
site	mina estudada
S/B	razão espaçamentos/afastamento
H/B	razão altura de bancada/afastamento
B/D	razão afastamento/diâmetro de furo
T/B	razão pé de bancada/afastamento
PF[kg/m ³]	razão de carregamento
xB[m]	tamanho característico de blocos in situ
E[Gpa]	módulo de elasticidade da rocha
x50[m]	tamanho característico de bloco fragmentados
FI	índice de fragmentação

Fonte: Lopes (2020).

A correlação desses parâmetros de maneira estatística, em mesma escala, permite que se encontre uma variabilidade entre eles. Com a aplicação de uma regressão múltipla, é possível obter uma fórmula com os parâmetros especificados, e assim prever nos pontos de detonação com uma margem de erro aceitável, qual fragmentação será alcançada (LOPES, 2020).

As configurações de malhas de perfuração têm um profundo impacto na fragmentação gerada pelo desmonte de rochas. Malhas muito espaçadas geralmente tendem a gerar fragmentos maiores, dependendo do material. Tais fragmentos, de modo geral, geram custos como a necessidade de realizar desmontes secundários e aumento dos custos de manutenção dos equipamentos, pois se deterioram mais rapidamente com o impacto. Já as malhas de explosivos muito fechadas podem gerar finos em excesso, que também são refletidos em custos, dada a dificuldade ou até mesmo incapacidade de beneficiá-los e a consequente

necessidade de barragens e sistemas de filtragem. Em operações de minério de ferro, obter uma quantidade de finos muito grande pode ser prejudicial ao processo como um todo, devido a dificuldades de concentração e aos impactos ambientais, como geração de material particulado e necessidade de barragens de rejeitos.

A simulação e previsão da fragmentação dos produtos de desmonte de rochas por explosivos pode ser empregada para estabelecimento de cenários de produtos mais adequados do desmonte para operações subsequentes de cominuição. Deve-se definir qual a granulometria esperada de cada desmonte a fim de se otimizar as operações de carregamento e transporte e, principalmente, de britagem.

Com a implementação da tecnologia de previsão e otimização, é possível obter os seguintes benefícios:

Benefícios econômicos: A previsão permite uma melhor distribuição das malhas de perfuração, o que reduz custos e, conseqüentemente, garante um melhor aproveitamento das aparelhagens de explosão. Além disso, há uma otimização do consumo energético da empresa, uma vez que o material terá a granulometria em tamanho adequado, e todo o processo após explosão será regularizado para tais dimensões, evitando usos desnecessários de grandes equipamentos, manutenções inesperadas, paradas obrigatórias, entre outros. Como há uma menor geração de finos, haverá um maior aproveitamento econômico do material que passou pelo processo de explosão.

Benefícios ambientais: Como as malhas serão otimizadas, pode haver uma diminuição no uso de explosivos, o que impacta diretamente na geração de ruídos e também na produção de particulados, Com a otimização da área explorada, há um uso do solo de maneira mais inteligente, o que torna os impactos negativos no solo e na área de exploração mais espaçados e menos intensos. Além disso, com a otimização, há uma menor geração de finos, o que diminui a produção de particulados, e também diminui a necessidade de barragens de rejeito, uma vez que há um melhor aproveitamento do produto gerado nas explosões.

Benefícios sociais: Dois dos grandes desafios na relação entre mineradoras e comunidades vizinhas são a produção de ruídos e vibrações derivados das explosões. Com a otimização é possível que tenha um número menor de explosões ao longo dos dias e, conseqüentemente, diminua esses impactos para a sociedade. Além disso, como descrito nos outros tópicos, haverá uma menor produção de finos, o que diminui a produção e espalhamento de particulados no ar que atingem comunidades próximas, aumentando a qualidade do ar dessa população.

5.2.2 Otimização do processo de amostragem do minério de ferro

A Vale tinha como necessidade otimizar o processo de amostragem, reduzindo o número de amostras que são enviadas ao laboratório diariamente com um processo de medição automática, em campo e em tempo real que permita tomadas de decisão mais eficientes. Sem a aplicação de uma nova tecnologia de otimização, a empresa necessitava que uma amostra fosse coletada em campo, e logo depois, o laboratório levaria cerca de 2 horas para liberação dos resultados. Esse tempo para a obtenção da informação é inadequado para a operação, pois durante a análise, toneladas de minério podem ter sido processadas fora das especificações desejadas, o que leva a um consumo maior de energia, recursos e maior geração de rejeitos (MINING HUB, 2021a).

A empresa LLK apresentou uma solução em visão computacional, baseada em espectrometria, que foi capaz de quantificar os elementos químicos que compõem o material sobre correia transportadora. De acordo com Mining Hub (2021a), a tecnologia faz o mapeamento de ferro em amostras de minério utilizando-se sensores hiperespectrais com alto grau de confiabilidade e em tempo real, com obtenção de modelos de calibração do teor de ferro presente na amostra. Durante o desenvolvimento da tecnologia, a empresa foi capaz de realizar a análise das assinaturas espectrais de amostras de minério de ferro em diferentes granulometrias e teores; a aquisição de imagens hiperespectrais em tempo real para análise e o algoritmo de segmentação e caracterização de assinatura, que é capaz de analisar a assinatura espectral do material e retornar o teor de ferro, como pode ser observado na Figura 5.7 abaixo.

Figura 5.9 – Esquema representativo do desafio e da tecnologia aplicada.



Fonte: Mining Hub (2021a).

Após a aplicação da tecnologia desenvolvida, houve a redução em mais de 2 horas no tempo de resposta da composição química de ferro e sílica do material. Segundo o Mining Hub (2021a), houve redução de perdas da produção ocasionados por contaminação de pilhas com minério fora da especificação desejada; o tempo de resposta foi 60 vezes mais rápido quando comparado com a análise laboratorial e controle de processo ficou mais sensível, o que evita a contaminação por material fora de especificação. Com isso, foi possível alcançar os seguintes benefícios:

Benefícios econômicos: De acordo com a empresa, a solução permite ganho de tempo e redução de custos, uma vez que a aplicação da ferramenta não necessitará das análises laboratoriais para medição de Óxido de Ferro nas amostras. Com isso, evitará então a compra

de materiais químicos e materiais de laboratório; pagamento de serviços profissionais; custos de energia e água; custos com processamento de rejeitos, entre outros.

Benefícios ambientais: Como a tecnologia substitui a análise laboratorial, isso possibilita que o processo utilize menor quantidade de água, menor quantidade de energia, e menor quantidade de produtos químicos. Isso contribui para uma operação mais sustentável e com menores impactos ambientais negativos, uma vez que menos recursos naturais serão demandados e menor será a quantidade de químicos descartados, diminuindo a possibilidade de contaminações. Além disso, como uma menor quantidade de minério será processada fora das especificações, menor será a geração de rejeitos.

Benefícios sociais: Com o menor uso de produtos químicos para análise laboratorial, terá uma menor possibilidade de contaminações pontuais e até acidentes de maiores proporções com a comunidade local. Além disso, com o menor uso de recursos hídricos a comunidade localizada próxima à operação também é beneficiada, uma vez que haverá menores chances de conflito pelo uso da água, melhoria da qualidade da água com a redução do lançamento de efluentes, entre outros.

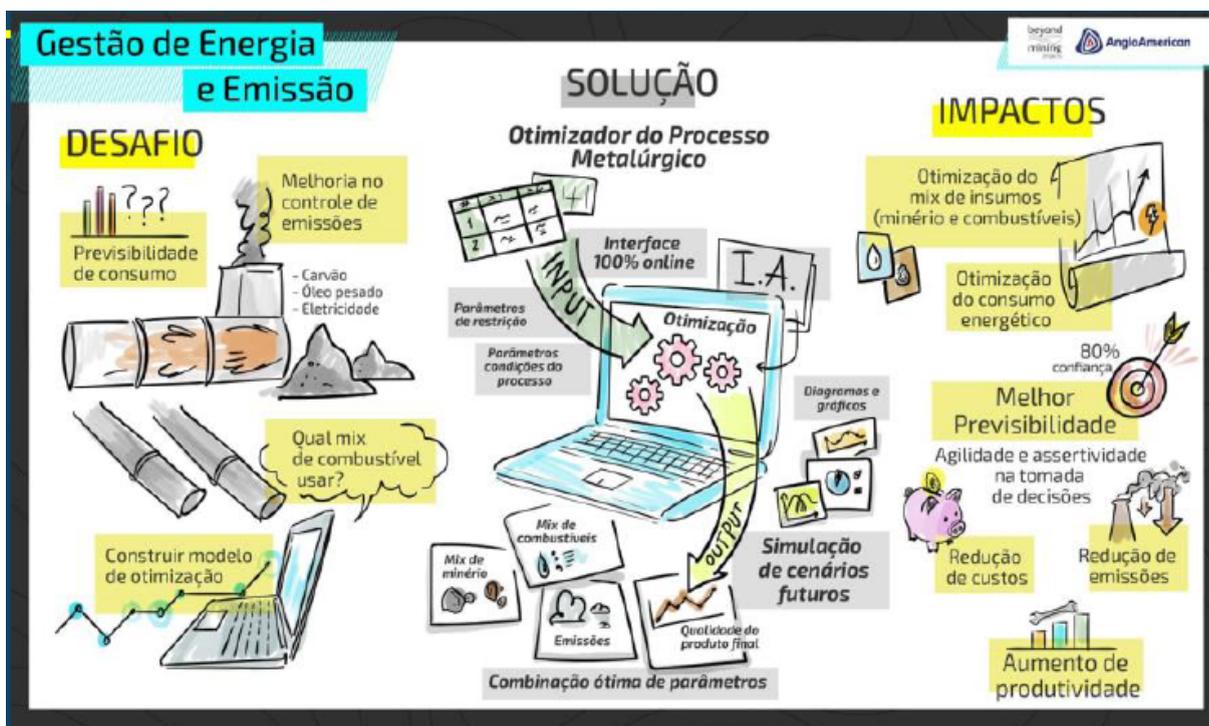
5.2.3 Gestão de Energia e Emissão de poluentes

A mineradora Anglo American tinha como desafio a mistura de insumos (minério e combustível) ao longo do processo de calcinação e redução dos fornos. O processo contém inúmeros parâmetros e diversas características físico-químicas do combustível, do minério, além de sazonalidades e fatores econômicos.

Para solucionar tal demanda, a empresa Beyond Mining aplicou a sua solução de Inteligência Artificial para criar um otimizador de processo, que é capaz de simular e otimizar diversos cenários da produção, integrando todas as variáveis descritas acima em função das características dos insumos usados, como pode ser observado no esquema da Figura 5.10 abaixo. Como o otimizador é capaz de simular cenários passados e futuros, foram feitas comparações com dados passados da operação ao longo de 2 anos de processo, e foi

alcançada uma correlação de 80,8%. Deste modo, indicou-se uma alta relação entre as variáveis diretamente relacionadas e então uma maior taxa de sucesso da aplicação da otimização (MINING HUB, 2021a).

Figura 5.10 – Esquema ilustrativo do desafio de Gestão de Energia e Emissão.



Fonte: Mining Hub (2021a).

Com a implementação da tecnologia de otimização da gestão de energia e emissão, é possível obter os seguintes benefícios:

Benefícios econômicos: Com a otimização da mistura, haverá uma melhora significativa no consumo energético, o que consequentemente diminuirá os custos da operação. Além disso, o aumento da agilidade, da assertividade e da produtividade são outros fatores que têm relação direta com a otimização dos custos de produção.

Benefícios ambientais: Como a tecnologia garante uma otimização do consumo energético, consequentemente menos recursos naturais serão consumidos para a produção desses

combustíveis. Além disso, isso impacta diretamente na diminuição da emissão de gases de efeito estufa.

Benefícios sociais: com a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, a comunidade local é beneficiada pela melhora da qualidade do ar e também do microclima local, que será menos impactado pela presença desses gases na atmosfera próxima à operação.

5.2.4 Medição de Massa de Pilha de Minério

A empresa Anglo American estava em busca de novas tecnologias para medir a massa da pilha de minério, processo minerário que está entre a lavra e a usina de concentração. De acordo com Mining Hub (2021a), saber o volume de minério e o formato da pilha é essencial para as definições e configurações de lavra e usinagem na operação. Em geral, essa medição é feita de 1 a 2 vezes ao mês, e esse grande intervalo gera desvios que impactam diretamente o planejamento e a variância no volume de minério produzido por dia. Na medição convencional, há ainda o fator das questões climáticas, como poeira, chuvas e raios, que impedem a execução das medições.

Para solucionar esses desafios, a empresa Konker criou um tomógrafo de montanhas que registra a passagem de muons da radiação cósmica e que permite reconstruí-la sinteticamente. A partir dessa medida, é gerada a visão 3D e é realizada a medição da massa existente. O equipamento é capaz de trabalhar diariamente, e gera medidas contínuas da pilha, sem ser afetado por questões climáticas. Além disso, o equipamento não necessita de especialista para ser operado e é considerado sustentável, pois utiliza radiação cósmica, que é um recurso amplamente disponível em qualquer lugar do planeta (MINING HUB, 2021a).

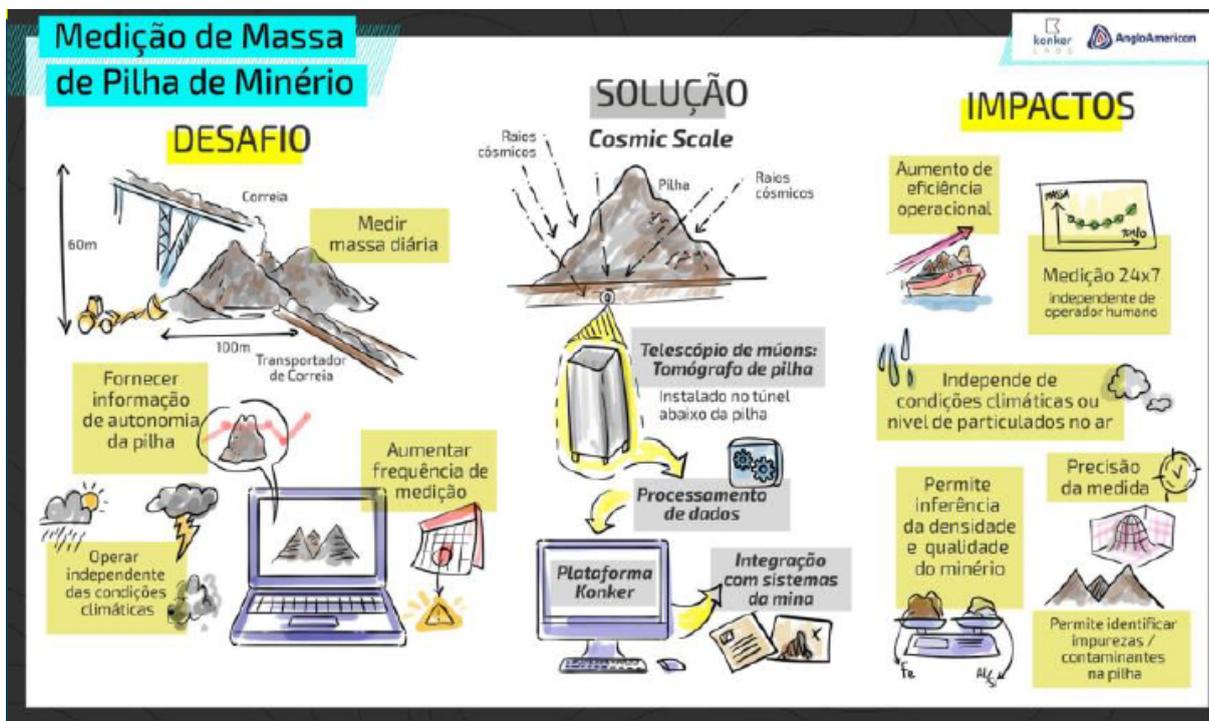
Com a aplicação da solução houve uma redução significativa do erro na informação do tamanho, formato e volume das pilhas, e conseqüentemente houve o aumento da eficiência operacional dos processos de lavra e usinagem de concentração, como ilustrado na Figura 5.11. Além desses pontos, foi possível identificar os seguintes benefícios com a implementação da tecnologia de medição :

Benefícios econômicos: A tecnologia permite que tanto a lavra quanto a usinagem sejam planejados corretamente, evitando assim excessos de energia investida nos dois processos por quantidades inadequadas de material na pilha. Além disso, esse melhor planejamento garante que haja uma diminuição de material desperdiçado no processo, pois somente será processado a quantidade ideal para a operação e aparelhagem local.

Benefícios ambientais: A solução também apoia na identificação de impurezas e contaminantes na pilha, o que pode ser benéfico para o processo como um todo, pois evita a geração de rejeitos e permite uma destinação adequada previamente dos materiais impuros. Além disso, a tecnologia é sustentável, pois utiliza radiação cósmica, que é um recurso amplamente disponível no planeta.

Benefícios sociais: A partir da diminuição de geração de rejeitos, a sociedade é beneficiada pela redução da necessidade de locais de disposição, como barragens e pilhas de rejeito processado a seco que possuem diferentes impactos ambientais em sua construção e riscos de acidentes durante e pós uso.

Figura 5.11 – Esquema ilustrativo da solução para medição da massa da pilha de minério de ferro.



Fonte: Mining Hub (2021a).

5.2.5 Medição da umidade de minério de ferro

A medição da umidade de minério é extremamente importante para garantir a qualidade do produto final e no controle da recuperação de massa obtida nas dosagens dos reagentes no processo de flotação. Em operações convencionais, o material tem que ser amostrado e levado para o laboratório, o que faz com que o resultado seja obtido em 1h e 30 minutos aproximadamente. Neste meio tempo, a operação continua funcionando, o que faz com que uma parte do produto tenha uma qualidade que provavelmente está fora das especificações desejadas.

A empresa Anglo American lançou o desafio para se obter essa umidade do minério de forma automática em no máximo 15 minutos, garantindo a precisão do resultado com variação de até 0,3 em número absoluto da umidade aferida em amostra no laboratório e com no mínimo 80% de confiabilidade. A start-up LLK iniciou o desenvolvimento de um Medidor Online

utilizando a análise da imagem hiperespectral do minério que passa diretamente na correia transportadora, sem necessidade de amostragem, como principal tecnologia. Utilizando algoritmos específicos e *machine learning*, a empresa criou um novo sistema que foi capaz de realizar a medição da umidade em 2 minutos com variação de até 0,3 em número absoluto e 96% de confiabilidade (MINING HUB, 2021a).

Com o novo sistema, a Anglo American conseguiu uma maior agilidade para controle e redução da umidade, reduzindo as quantidades de análise em laboratório para controle de qualidade, e garantindo maior assertividade dos dados de produção, bem como maior controle na dosagem e recuperação da massa, resultado ilustrado na Figura 5.10. Além disso, com a implementação da tecnologia de medição, é possível obter os seguintes benefícios:

Benefícios econômicos: Com a medição precisa e rápida da umidade a empresa pode adaptar os seus aparelhos de filtragem e de redução de umidade para que o minério fique com as características adequadas para o processamento, reduzindo assim os custos com o uso inadequados ou exagerados de reagentes químicos; o peso do produto no transporte (o que diminui também o gasto energético dos veículos e, conseqüentemente, o frete); despesas das análises em laboratórios e os gastos com consumo de água, que quando filtrada, pode ser reutilizada na operação.

Figura 5.12 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento da solução para medição da umidade do minério.



Fonte: Mining Hub (2021a).

Benefícios ambientais: Como supracitado, haverá uma redução no consumo energético do transporte e, conseqüentemente, uma redução de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Além disso, com a possibilidade da reutilização da água retirada do minério será possível diminuir o consumo de água vindas dos corpos d'água próximas à operação. Outro fator importante é a diminuição do uso de químicos e reagentes, o que evita acidentes e possíveis contaminações ambientais locais por descartes inadequados.

Benefícios sociais: a tecnologia pode trazer indiretamente uma redução nas emissões atmosféricas, e conseqüentemente uma melhora na qualidade do ar da população localizada próxima aos locais de transporte do produto. Com a reutilização da água e potencial redução do consumo dos corpos d'água, a população também se beneficia, assim como com a redução

do uso de produtos químicos, que podem evitar possíveis contaminações de locais próximos à operação.

5.2.6 Monitoramento Quantitativo e Qualitativo da água em tempo real

Nas operações atuais de mineração são raros os métodos contínuos e qualitativos para a medição da qualidade da água presente nos corpos d'água usados pela empresa. Segundo Mining Hub (2021a), a Vale estava em busca de uma solução robusta o suficiente para ser implantada em campo e que mesmo sujeita a intempéries, continue entregando bons resultados. O grande desafio consiste em obter informações de qualidade para que se possa realizar uma gestão eficaz dos recursos hídricos usados na operação.

A empresa Semset desenvolveu para a Vale a *Total Water Analyzer* (TWA), que consiste em uma tecnologia de *Big Data* capaz de monitorar a qualidade da água de forma abrangente e em tempo real. O TWA é 100% contínuo, quantitativo e automatizado, e é capaz de medir até 50 propriedades de cada gota d'água, a qualidade da água a cada 5 minutos, os metais com sensibilidade à parte por milhão durante 24 horas por dia, por 7 dias por semana sem usar produtos químicos caros (MINING HUB, 2021a). Na aplicação da tecnologia com a Vale, a empresa foi capaz de monitorar constantemente os seguintes parâmetros da água: Ferro, Manganês, turbidez, cor, condutividade elétrica e temperatura, como representado na Figura 5.11.

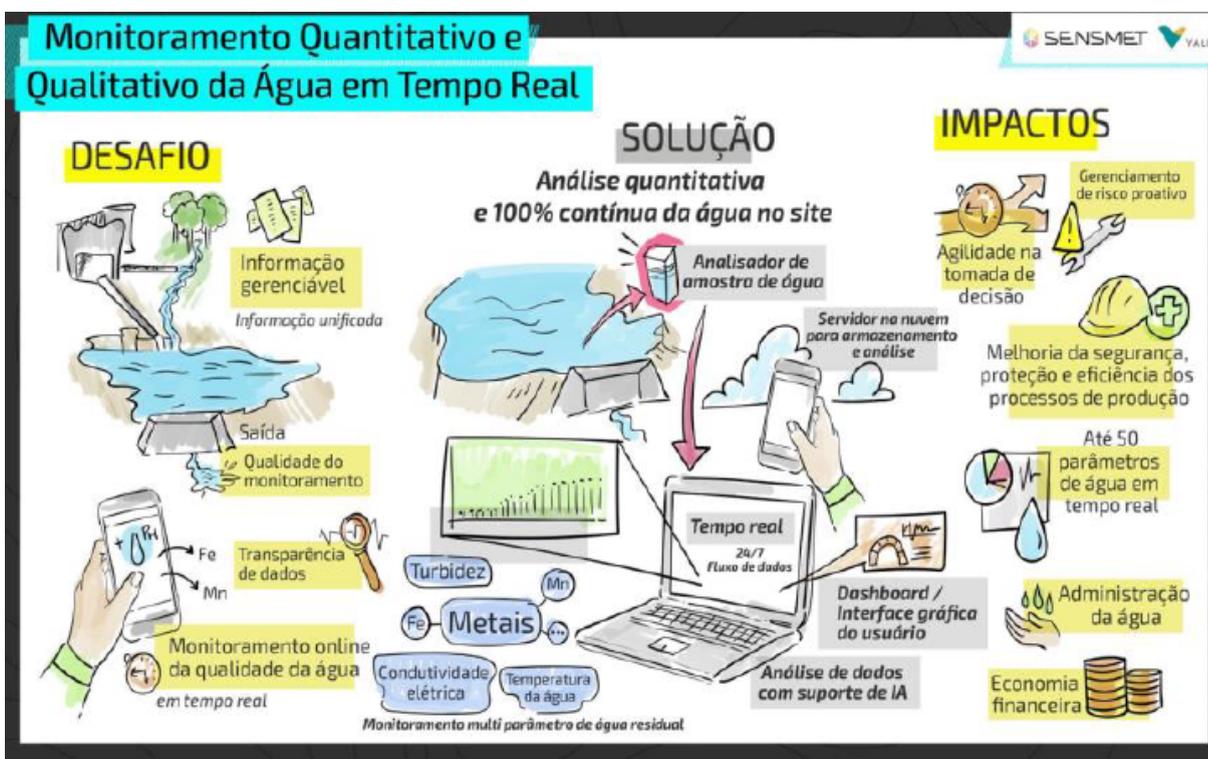
A mudança na obtenção eficaz e eficiente dessas informações permitirá eliminar vazios de dados de monitoramento e, conseqüentemente, a empresa poderá adotar uma nova postura na gestão da informação de recursos hídricos, onde a atuação passará a ser na prevenção e não na correção de situações anômalas, pois terá acesso a informações rápidas e acuradas. Ademais, a implementação da solução de monitoramento permitirá obter os seguintes benefícios:

Benefícios econômicos: A tecnologia permitirá uma gestão proativa dos riscos de situações adversas dos recursos hídricos, evitando assim grandes gastos corretivos ou multas

de órgãos fiscalizadores. Além disso, o processo ficará mais eficaz e mais seguro, permitindo um direcionamento mais assertivo de recursos humanos e materiais para esse monitoramento.

Benefícios ambientais e sociais: Como a água terá uma taxa de monitoramento muito maior, as chances de ocorrerem situações anômalas, como contaminações e outras situações maléficas, é mais baixa. Mesmo quando ocorrer, a taxa de resposta será muito mais rápida, evitando assim impactos ambientais e sociais negativos de grande significância relacionados à contaminação dos recursos hídricos.

Figura 5.13 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento da tecnologia de monitoramento da água em tempo real.



Fonte: Mining Hub (2021a).

5.3 Análise dos relatórios de sustentabilidade das mineradoras e estudos de caso

Para melhor análise das tecnologias e seus impactos nas operações relacionados ao ODS 12, foi desenvolvido um quadro resumo (FIGURA 5.13) que permite melhor visualização das

soluções. No quadro, foram compiladas todas as informações encontradas nos relatórios das empresas relacionados à Indústria 4.0 e nos estudos de caso desenvolvidos pelas *startups* que aplicaram ou testaram as tecnologias nas operações das mineradoras.

Figura 5.14 – Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados.

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Gêmeos digitais	Consumo de água, energia, produtos químicos, geração de rejeitos, emissão de poluentes do ar	<p>Anglo American <i>Sistema para eficiência operacional de todo o processo produtivo.</i></p> <p>Benefícios Econômicos: - Eliminação de gargalos existentes em toda a operação; - Novas configurações para operar da forma mais eficiente possível, utilizando a infraestrutura existente;</p> <p>Benefícios Ambientais: - Identificação de áreas de melhoria em todo o processo, como otimização do consumo de recursos naturais, aplicação de práticas circulares, testes de possíveis acidentes, entre outros; - Possibilita o teste de novas soluções e previsão de resultados;</p> <p>Benefícios Sociais: - Transparência de dados, monitoramento constante da operação, simulações virtuais com dados similares aos reais.</p>	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continua)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Sensores, Visão computacional, Ciência dos Dados, Inteligência Artificial	Geração de rejeitos	<p>Anglo American</p> <p><i>Sensores e visão computacional para triagem em massa do minério e seleção assertiva:</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elimina o desperdício antecipadamente; - Aumento de 5 a 7% na classificação do minério, então consequentemente há maior geração de produto na mesma quantidade de material explorado; - Aumento da vida útil da mina; <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da geração de rejeitos, pois mais material é aproveitado; - Redução da necessidade de disposição de rejeitos, uma vez que tanto barragens quanto a disposição a seco possuem impactos negativos no meio ambiente. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Com a diminuição da necessidade de disposição de rejeitos, há menos impactos para a comunidade local. 	12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Inteligência Artificial, Ciência dos dados	Consumo de combustível e Emissão de poluentes do ar	<p>Anglo American <i>Otimizador de processo para gestão de energia e emissão</i></p> <p>Benefícios Econômicos: - Eficiência energética e diminuição dos custos de operação</p> <p>Benefícios Ambientais: - Diminuição do consumo de combustíveis e energia; - Diminuição de emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos, aumentando a qualidade do ar e evitando consequências como chuva ácida e outros impactos negativos;</p> <p>Benefícios Sociais: - Maior qualidade do ar; - Redução de chances de chuva ácida e outros impactos negativos provenientes de poluição atmosférica.</p>	12.2, 12.4

Fonte: A autora (2022) (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Visão Computacional	Geração de rejeitos	<p>Anglo American <i>Criação de um tomógrafo de pilhas de minério por radiação cósmica</i></p> <p>Benefícios Econômicos: - Redução significativa do erro na informação do tamanho, formato e volume das pilhas, aumentando a assertividade de informações e serviços; - Maior produtividade; - Aumento da eficiência operacional dos processos de lavra e usinagem de concentração.</p> <p>Benefícios Ambientais: - Identificação de impurezas e contaminantes na pilha; - Diminuição na geração de rejeitos; - Tecnologia é sustentável, pois não demanda recursos naturais finitos.</p> <p>Benefícios Sociais: Diminuição da necessidade de locais de disposição de rejeitos como barragens e pátios de rejeito processado a seco.</p>	12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Visão computacional, Inteligência Artificial, Automação, Internet das Coisas	Consumo de combustível, consumo de água e de produtos químicos, emissão de poluentes do ar	<p>Anglo American <i>Medidor Online da umidade de minério</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Minério com características mais adequadas para o processamento, reduzindo assim os custos com o uso inadequados ou exagerados de reagentes químicos; - Material com menor peso proporciona economia no frete e diminui o consumo de combustíveis dos transportes; - Redução das despesas com laboratórios e materiais químicos. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução do consumo de água com a reutilização, diminuindo riscos de assoreamento e rebaixamento do lençol freático; - Redução do consumo energético; - Redução de emissões de gases de efeito estufa; - Diminuição do uso de produtos químicos e potenciais acidentes. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhor qualidade do ar; - Maior disponibilidade de recursos hídricos; - Menores chances de acidentes com produtos químicos. 	12.2, 12.4

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Sistema autônomo, GPS, radares e Inteligência Artificial, Internet das Coisas	Consumo de combustível, geração de resíduos, geração de poluentes do ar	<p>CSN Mineração <i>Caminhões autônomos</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução de até vinte caminhões utilizados na mina; - Redução do gasto com combustíveis; - Redução de custos operacionais e manutenção; - Redução do custo profissional; - Redução de acidentes de trabalho. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução do consumo de combustíveis; - Redução de emissões de pelo menos 5%; - Diminuição da geração de resíduos devido a maior durabilidade do caminhão, pneus e maquinário; - Redução da emissão de particulados; - Menor poluição sonora. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhor qualidade do ar; - Menor poluição sonora. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Sistema de satélite, Inteligência Artificial, Ciência dos dados	Consumo de combustível, geração de resíduos, emissão de poluentes do ar	<p align="center">CSN Mineração Sistema de Gerenciamento de Frota</p> <p>Benefícios Econômicos: - A otimização das rotas diminui o uso de veículos na operação; - Diminuição do gasto com combustíveis; - Menores gastos com manutenção e maquinário.</p> <p>Benefícios Ambientais: - Diminuição do consumo de combustíveis; - Diminuição da geração de resíduos devido o menor uso de veículos; - Diminuição da emissão de poluentes; - Menor poluição sonora.</p> <p>Benefícios Sociais: - Melhor qualidade do ar; - Menor poluição sonora.</p>	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Realidade virtual, Internet das Coisas	Consumo de combustível, emissão de poluentes do ar	<p align="center">CSN Mineração</p> <p align="center"><i>Operação remota do trator de esteiras de grande porte</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diminuição de gastos com combustíveis; - Maior produtividade do equipamento. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução do consumo de combustíveis; - Redução da emissão de poluentes atmosféricos. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maior qualidade do ar. 	12.2, 12.4
Robotização, automação, Internet das Coisas	Consumo de combustível, geração de resíduos, emissão de poluentes do ar	<p align="center">CSN Mineração</p> <p align="center"><i>Monitoramento e operação remota do trabalho da perfuratriz</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aumento de produtividade; - Redução de gastos com combustível; - Menores custos operacionais. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Menor emissão de poluentes atmosféricos; - Menor geração de resíduos com a melhor conservação do equipamento. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhor qualidade do ar. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Robotização e automação	Produção de rejeitos e resíduos, consumo de combustíveis, consumo de água, geração de resíduos, emissão de poluentes do ar	<p align="center">CSN Mineração</p> <p align="center"><i>Rebeneficiamento de rejeitos nas Plantas de Concentração Magnética de Alta Intensidade</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução de gastos com novos processamentos; - Redução de gastos com monitoramento e manutenção dos locais de disposição de rejeitos; - Redução do consumo energético em toda a operação; - Redução de gastos com manutenção; - Aumento da vida útil da mina. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da produção de rejeitos; - Redução da necessidade de locais para disposição de rejeitos; - Redução da emissão de poluentes atmosféricos; - Preservação de áreas não exploradas; - Redução do consumo de água. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da necessidade de locais de disposição de rejeitos como barragens (menor probabilidade de acidentes); - Melhoria da qualidade do ar. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Gêmeos digitais	Consumo de combustível, água, geração de rejeitos, emissão de poluentes do ar	<p>CSN Mineração <i>Integração de informações e dados da companhia</i></p> <p>Benefícios Econômicos: - Otimização de todo o sistema de produção com a identificação de pontos de melhoria operacional, diminuindo custos; - Aumento do desempenho operacional por meio da integração de dados e simulações.</p> <p>Benefícios Ambientais: - Identificação de áreas para diminuição do consumo energético, consumo de água, geração de rejeitos, emissão de poluentes, uso de produtos químicos, entre outros.</p>	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Gêmeos digitais	Consumo de combustível, água, geração de rejeitos, emissão de poluentes do ar	<p>CSN Mineração</p> <p><i>O monitoramento remoto e digital de poços artesianos e vertedouros</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Otimização do consumo de recursos hídricos; - Diminuição de gastos com potenciais inundações. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maior controle do nível do lençol freático, diminuindo as chances de rebaixamento; - Diminuição do consumo de água com a otimização; - Diminuição de contaminações ambientais após inundações. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maior transparência sobre os dados dos reservatórios locais; - Maior disponibilidade de recursos hídricos. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Internet das Coisas	Consumo de água	<p>Vale</p> <p><i>Gestão em tempo real da captação e controle do reservatório de água principal</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Otimização do consumo de recursos hídricos; - Diminuição de gastos com potenciais inundações. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maior controle do nível do lençol freático, diminuindo as chances de rebaixamento; - Diminuição do consumo de água com a otimização; - Diminuição de contaminações ambientais após inundações. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maior transparência sobre os dados dos reservatórios locais; - Maior disponibilidade de recursos hídricos. 	12.2

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Visão Computacional, Internet das Coisas, Ciência dos Dados e Aprendizado de máquina	Consumo de água, consumo de energia e produtos químicos; geração de rejeitos, emissão de poluentes no ar	<p>Vale</p> <p><i>Câmeras hiperspectrais para análise do teor de minérios</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ganho de tempo no processamento; - Diminuição do gasto com produtos químicos; - Redução de gastos com análises laboratoriais. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Menor consumo de água, energia e produtos químicos; - Menor geração de rejeitos, uma vez que uma menor quantidade de minério será processada fora das especificações. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhor qualidade do ar; - Maior disponibilidade de recursos hídricos; - Menores chances de acidentes com produtos químicos. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Inteligência Artificial e Ciência dos Dados	Consumo energético, emissão de poluentes do ar e geração de rejeitos	<p>Vale</p> <p><i>Sistema de inteligência artificial para desmonte de rochas</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Otimização do plano de fogo e melhor aproveitamento de explosivos; - Redução do ciclo de carregamento e consequente diminuição do gasto energético. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da produção de finos, o que diminui a geração de rejeitos e a consequente necessidade de locais de disposição como barragens; - Redução da emissão de particulados proveniente das explosões; - Redução da poluição sonora com a otimização do plano de fogo. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhora da qualidade do ar; - Redução da necessidade de locais de disposição de rejeitos como barragens; - Redução da poluição sonora. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Sistema autônomo, GPS, radares, Inteligência Artificial, Internet das Coisas.	Consumo de combustível, emissão de poluentes do ar, geração de resíduos	<p>Vale <i>Caminhões autônomos fora de estrada</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da quantidade de caminhões; - Redução do gasto com combustíveis; - Redução de custos operacionais e manutenção; - Redução do custo profissional; - Redução de acidentes de trabalho. <p>Benefícios Ambientais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução do consumo de combustíveis; - Redução de emissões de poluentes em pelo menos 10%; - Diminuição da geração de resíduos devido a maior durabilidade do caminhão, pneus e maquinário; - Redução da emissão de particulados; - Menor poluição sonora. <p>Benefícios Sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melhor qualidade do ar; - Menor poluição sonora. 	12.2, 12.4, 12.5

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Quadro resumo de tecnologias e desafios relacionados ao ODS 12 solucionados			
Tecnologias	Desafios relacionados ao ODS 12	Solução e benefícios gerados por mineradora	Metas da ODS 12
Big data, automação e inteligência artificial	Poluição de recursos hídricos	<p>Vale</p> <p><i>Monitoramento da qualidade da água em tempo real</i></p> <p>Benefícios Econômicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gestão proativa dos riscos de situações adversas dos recursos hídricos, evitando grandes gastos corretivos ou multas; - Processo de monitoramento mais eficaz e mais seguro; - Direcionamento assertivo de recursos humanos e materiais. <p>Benefícios Ambientais e sociais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Menores chances de ocorrerem situações anômalas, como contaminações; - Taxa de resposta em caso de contaminação será muito mais rápida, evitando assim impactos ambientais e sociais negativos de grande significância. 	12.2

Fonte: A autora (2022). (conclusão)

Para que fosse realizada a correlação entre as metas da ODS 12 na Figura 5.14, as áreas de impacto identificadas foram classificadas de acordo com a Figura 5.15 para a definição das metas do ODS 12 afetadas pelas soluções.

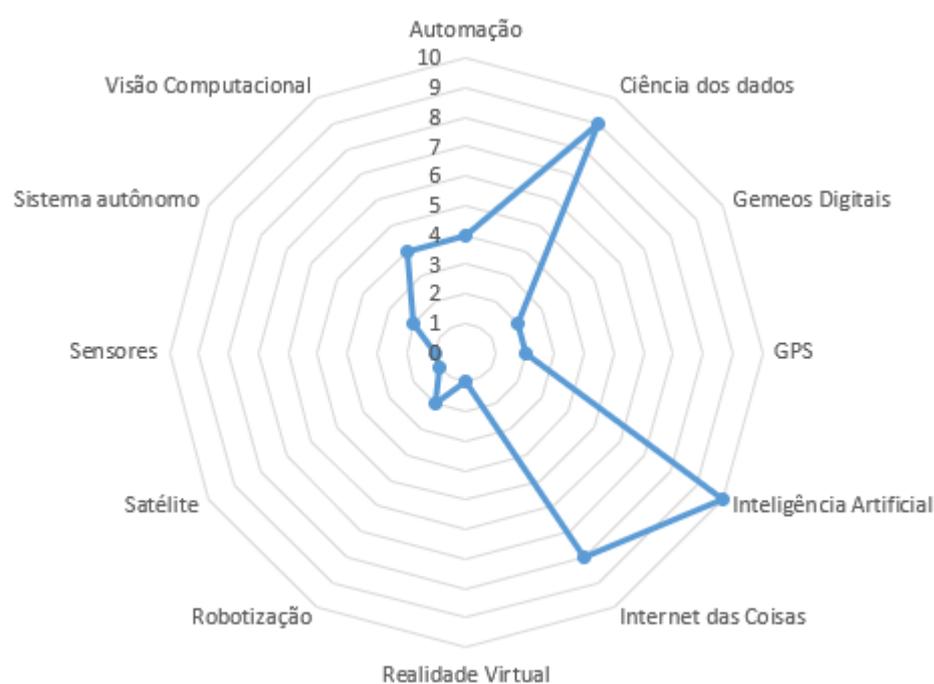
Figura 5.15 – Quadro de correlação das áreas de impacto com as metas da ODS 12.

Área de impacto	Metas ODS 12	Descrição
Consumo de água	12.2	Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.
Consumo de energia e/ou combustíveis	12.2	Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.
Consumo de produtos químicos	12.4	Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.
Emissão de poluentes do ar	12.4	Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.
Geração de resíduos	12.5	Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.
Geração de rejeitos	12.5	Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.
Poluição de recursos hídricos	12.2	Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

Fonte: A autora (2022).

A partir da análise dos dados compilados na Figura 5.15, foi possível gerar o gráfico da Figura 5.16, que contém a contabilização das tecnologias da Indústria 4.0 mais utilizadas pelas mineradoras levantadas nos estudos de caso apresentados no presente trabalho. A contabilização identificou que as inovações mais aplicadas são: Inteligência Artificial (com 10 pontos de aplicação), Ciência dos Dados (com 9 pontos de aplicação) e Internet das Coisas (IoT) (com 8 pontos de aplicação).

Figura 5.16 – Contabilização das tecnologias aplicadas pelas mineradoras estudadas.

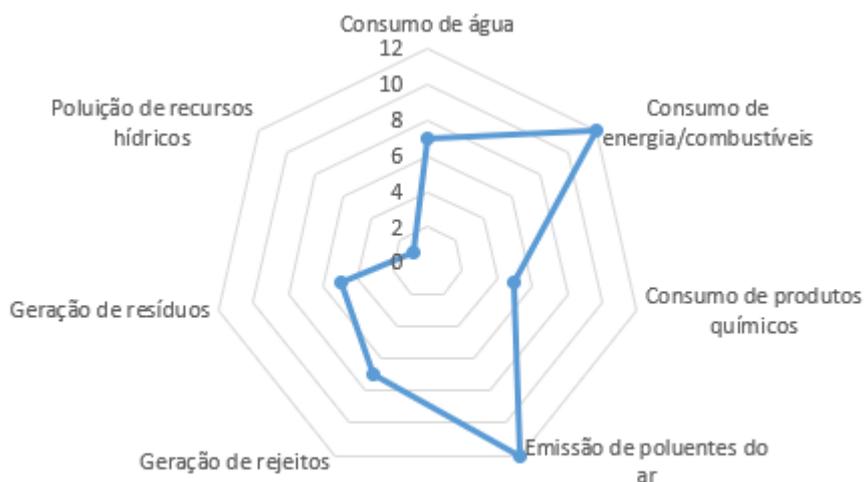


Fonte: A autora (2022).

Com a definição das principais áreas de impacto das tecnologias nas operações de mineração estudadas correlacionadas com o ODS 12, foi possível identificar quais são as que tiveram maior enfoque das empresas e, conseqüentemente, as que possuem maior impacto da aplicação das tecnologias. Os principais pontos afetados positivamente pela aplicação das tecnologias são o consumo de energia e/ou combustíveis (11 pontos de aplicação), a emissão

de poluentes do ar (11 pontos de aplicação), a geração de rejeitos (7 pontos de aplicação) e o consumo de água (6 pontos de aplicação) (FIGURA 5.17).

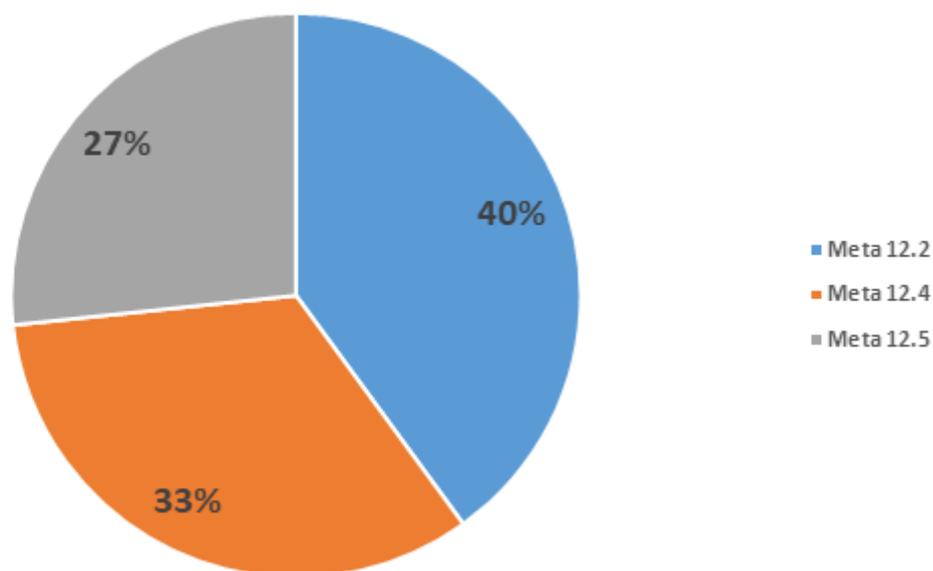
Figura 5.17 – Principais áreas de impacto relacionados ao ODS 12 com a aplicação das tecnologias de I4.0.



Fonte: A autora (2022).

Levando em consideração a correlação das áreas de impacto com as metas do ODS 12 afetadas pela aplicação das tecnologias, foi possível gerar o gráfico da Figura 5.18, que indica que a meta 12.2 (alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais) é a mais abrangida pelas tecnologias estudadas, seguida pela meta 12.4 (manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, reduzindo significativamente a liberação destes para o ar, água e solo), e pela meta 12.5 (redução da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso).

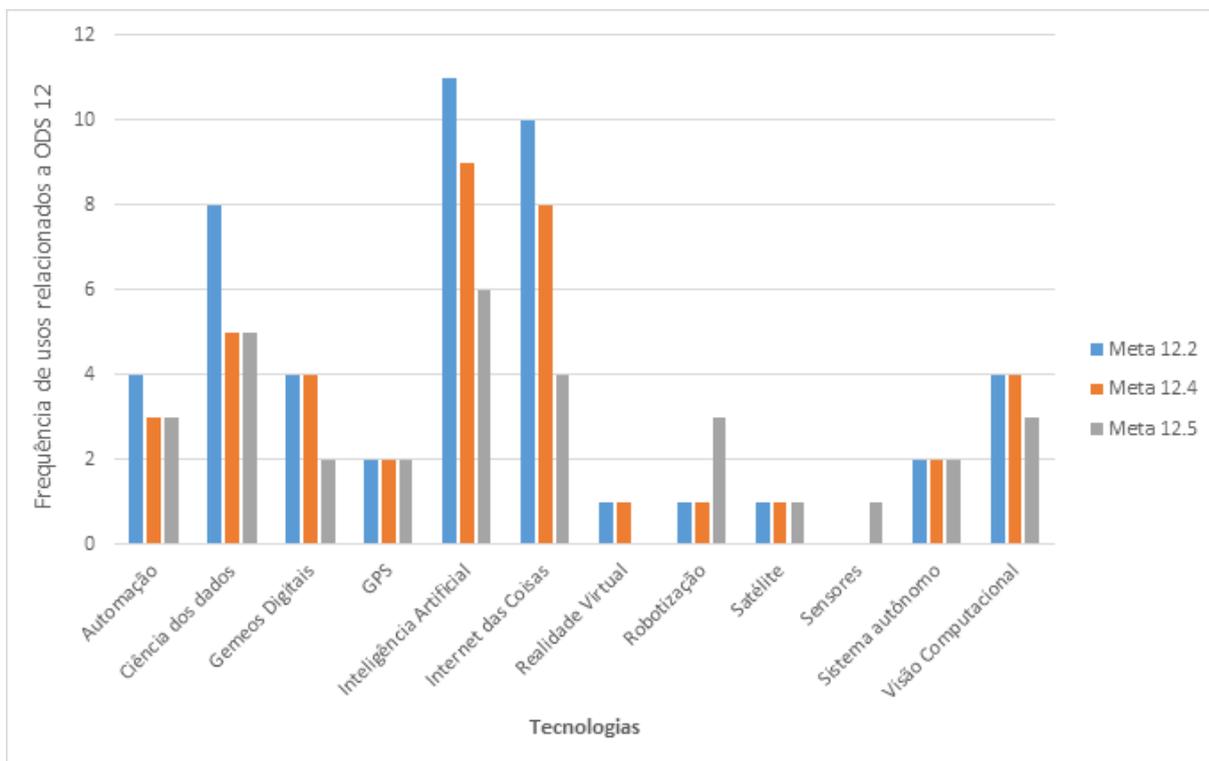
Figura 5.18 – Contabilização das metas do ODS 12 afetadas pelas tecnologias aplicadas.



Fonte: A autora (2022).

Além da constatação das principais metas da ODS 12 que tiveram maior enfoque com a aplicação das tecnologias estudadas, o gráfico da Figura 5.19 identifica a colaboração que a Inteligência Artificial, a Internet das Coisas e a Ciência dos Dados têm para o cumprimento das metas 12.2, 12.4 e 12.5 nas empresas estudadas.

Figura 5.19 – Correlação das tecnologias de I4.0 e as metas do ODS 12.



Fonte: A autora (2022).

A Inteligência Artificial, por ser muito abrangente e por ser uma solução que engloba várias outras, como Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), Aprendizagem Profunda (*Deep Learning*) e *Big Data*, tem uma alta frequência de uso nas inovações aplicadas pelas empresas estudadas. Tal inovação tem uma alta taxa de resolução de problemas e desafios, e os custos do investimento da tecnologia são rapidamente compensados, pois possuem alto impacto dentro das operações com a otimização dos processos e melhoria dos processos (RIBEIRO, 2017).

Houve também uma alta aplicação de Ciência dos Dados (*Data Science*), o que já era esperado após a revisão de literatura, pois é um dos fatores de maior importância dentro da Indústria 4.0, uma vez que a análise dos dados realizada pela tecnologia é essencial para a

produção de inteligência de negócio e *insights* para a empresa. (GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP, 2019).

A maior aplicação da Internet das Coisas (IoT) também era esperada, pois é uma tecnologia que serve de base para que várias outras da Indústria 4.0 possam ser implementadas nas operações. Tal solução permite a conexão e a comunicação entre equipamentos e seres humanos, e garante que o maquinário possa ser monitorado constantemente devido à contínua conexão e geração de dados. O monitoramento adequado é essencial para evitar acidentes, mau funcionamento de equipamentos e estruturas, contaminações ambientais diversas, entre outros. Além disso, o monitoramento, quando bem trabalhado, pode ser compartilhado com as comunidades locais, o que garante maior transparência da empresa para com a comunidade afetada.

Apesar da constatação desses fatos, as tecnologias muitas vezes não são aplicadas sozinhas, e o sucesso das suas aplicações somente é possível devido à combinação correta entre as inovações. Como pode ser observado na Figura 5.14, as soluções dos desafios elencados pelas mineradoras somente foi possível graças às combinações inovadoras das tecnologias da Indústria 4.0.

5.4 Desafios e perspectivas futuras

O processo minerário convencional tornou-se insustentável. As operações atuais enfrentam o grande desafio de operações que irão explorar cada vez mais e menor será a quantidade de minério. Consequentemente, mais elevada será a quantidade de rejeitos e estéreis, que indica a maior necessidade de estruturas de disposição desses materiais. Minas Gerais é um estado extremamente impactado pela grande presença de barragens de rejeitos de operações antigas e atuais, que trazem diversos riscos ambientais e sociais. Após os rompimentos de duas dessas estruturas em 2015 e 2019, a pressão de investidores e da legislação governamental sobre as mineradoras aumentou consideravelmente, uma vez que, de acordo com a Lei 23.291/2019, as barragens à montante (consideradas inseguras do ponto de vista estrutural) estão proibidas de serem construídas e as estruturas existentes devem ser desativadas até fevereiro de 2022

(MINAS GERAIS, 2019). Dessa forma, essa quantidade cada vez maior de rejeitos representa um grande risco, não somente para as comunidades e para o meio ambiente, mas também para a empresa, que enfrenta desafios relacionados à perda de capital e de imagem.

Além disso, com essa diminuição da qualidade do produto, é necessário cada vez mais água, energia e produtos químicos para produzir a mesma tonelada de minério, gerando diversos impactos ambientais e sociais negativos (NETO, 2019). A pressão sobre o setor de mineração é crescente, fazendo com que o setor invista cada vez mais em ações de baixo impacto e com maior responsabilidade ambiental e social, colaborando para um processo mais responsável e sustentável.

De acordo com o Boston Consulting Group (2021), o setor de metais e mineração em nível global é cerca de 30% a 40% menos maduro digitalmente do que indústrias como a automotiva e química. O perfil altamente conservador dos profissionais do setor, e a falta de integração entre os processos da cadeia minerária são os principais motivos para tal dificuldade de implementação e inovação nas empresas. A mineração juntamente com a agricultura e com o setor imobiliário, ainda registra classificações inferiores a outros setores quando são analisados os investimentos em tecnologias de digitalização e comunicação (SIRINANDA, 2019). No entanto, a indústria minerária atingiu um ponto de inflexão onde as mineradoras devem se adaptar a este mercado em evolução se quiserem sobreviver (NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO, 2021).

Quando comparadas com outras mineradoras no mundo, as grandes mineradoras atuantes na América Latina se mostram defasadas na aplicação de digitalização. Segundo o relatório da Inmarsat (2020), a aplicação de Internet das Coisas, que é considerada uma tecnologia de base para o desenvolvimento digital das empresas, teve somente 38% de aplicação na América do Sul, comparando com 98% da América do Norte.

Segundo Deloitte (2018), os principais obstáculos para as empresas de mineração adotarem a Indústria 4.0 no Brasil são estruturais, relacionados principalmente com os altos custos de investimentos em novas tecnologias e inovação, a dificuldade de implantação e integração

dessas soluções digitais, a falta de proteção contra ameaças cibernéticas, a falta de força de trabalho qualificada, a fraca infraestrutura de comunicação no país e a burocracia governamental.

Após conversa com o CEO da startup LLK, especializada em engenharia para inovação na mineração, Luiz Henrique Machado (2021) (informação verbal)¹, informou que o setor demorou a engatar projetos de digitalização, mesmo que nos últimos anos a taxa de investimento em projetos inovadores tenha aumentado nas grandes mineradoras. Segundo ele, as mineradoras fazem uso de equipamentos tido como inovadores que eram usados na década de 50 pela indústria aeronáutica. Além disso, são poucas as empresas que fazem a mensuração e o registro de dados, e isso torna ainda mais difícil o processo de implementação da digitalização. De acordo com Luiz, é necessário ter maior competência técnica e comprometimento com a inovação dentro das mineradoras para que realmente seja possível implementar soluções de alto impacto.

Segundo Neto (2019), há uma grande resistência no setor mineral à inovação, pois todas as empresas querem se beneficiar de novas tecnologias, mas por conta do fato de que são soluções recentes e sem provas concretas de sua eficácia a longo prazo, nenhuma quer ser a primeira a testá-las. Com a mentalidade conservadora, é provável que as empresas invistam dinheiro em perfurações de exploração do que em algum tipo de plataforma de dados ou outra tecnologia inovadora (BENTON, 2018).

Para que haja a melhoria da implementação digital dentro das empresas, independente do seu tamanho, é preciso que as iniciativas digitais sejam direcionadas por uma estratégia bem articulada. Como pode ser visto no trabalho, as empresas estudadas desenvolvem iniciativas desconectadas entre si, e a estratégia de digitalização da mina deve definir claramente o objetivo para a organização como um todo. Além disso, para que ocorra o desenvolvimento integrado de toda a cadeia, as mineradoras devem melhorar sua capacidade de transformar dados em insumos importantes para solucionar os desafios das empresas. A maioria das

¹ Informação obtida em entrevista oral com o CEO e co-fundador da empresa LLK, Luiz Henrique Machado, em dezembro de 2021.

organizações usa apenas uma parte dos dados coletados, o que impede a melhor utilização e aplicação mais assertiva das tecnologias de I4.0 (DELOITTE, 2017).

De acordo com IBRAM (2021a), as altas taxas tributárias no Brasil aplicadas nessas tecnologias que muitas vezes são importadas, e os entraves burocráticos, tornam os investimentos em inovação das pequenas mineradoras limitados. Segundo o Instituto, na maioria dos casos, os esforços financeiros são direcionados para a manutenção das suas unidades produtivas e, em algumas vezes, para pequenas expansões. O que se observa, nesses casos, são inovações mais recentes presentes de forma concentrada, restritas às grandes empresas, o que indica que a maior parte da mineração brasileira possui um *gap* tecnológico e de inovações, uma vez que 88% das empresas legalizadas no setor são micro e pequenas (IBRAM, 2020).

Para que mais empresas menores tenham acesso a inovação, foi criado em 2019 o *Mining Hub* (MH), que consiste em um ecossistema de inovação aberta que permite o desenvolvimento de tecnologias entre *startups* e mineradoras que possuem desafios em comum. O Hub oferece tecnologia de ponta não só para as grandes empresas, mas também para empresas menores que não dispõem de uma estrutura econômico-financeira, equipes diversificadas e facilidades de importação de muitas tecnologias. Além disso, o MH foi um marco muito importante para a propagação da importância da inovação dentro das empresas e do início da mudança de mentalidade da liderança do setor (IBRAM, 2019).

Ademais, há uma grande dificuldade do engajamento do setor privado com a academia brasileira, o que acaba por dificultar o desenvolvimento dessas tecnologias no país, uma vez que as universidades possuem um ótimo potencial de pesquisa e desenvolvimento, mas por falta de recursos monetários, tal área fica desfalcada e encarece os serviços e tecnologias, que muitas vezes precisam ser importados de outros países.

A pandemia iniciada em 2020 reforçou que a digitalização é extremamente importante para que a indústria evolua. Somada aos fatores anteriores, como a pressão de investidores, legisladores e reguladores, a segurança operacional, commodities voláteis, restrições de

trabalho, padrões de qualidade, critérios ESG, entre outros, ficou ainda mais evidente que o futuro da mineração será digital. Apesar dos desafios, a tendência da aplicação de tais tecnologias na mineração Brasileira é crescente, e pode ser impulsionada pela Política Nacional de Inovação (PNI), instituída pelo Decreto nº 10.534/2020. A PNI tem a finalidade de

I - orientar, coordenar e articular as estratégias, os programas e as ações de fomento à inovação no setor produtivo, para estimular o aumento da produtividade e da competitividade das empresas e demais instituições que gerem inovação no País, nos termos do disposto na Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004; e

II - estabelecer mecanismos de cooperação entre os Estados, o Distrito Federal e os Municípios para promover o alinhamento das iniciativas e das políticas federais de fomento à inovação com as iniciativas e as políticas formuladas e implementadas pelos outros entes federativos. (BRASIL, art. 1º, 2020).

Com isso, mais empresas de diferentes portes terão incentivos para implementar tais tecnologias em suas operações e assim terão maiores chances de conseguirem cumprir, não somente com o ODS 12, mas também com outros Objetivos da Agenda 2030, como pode ser observado na Figura 5.20 abaixo.

Figura 5.20 – Quadro dos impactos da I4.0 correlacionado com outros ODS.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	Exemplos de impactos da I4.0 na mineração
3 - Saúde e bem-estar	<ul style="list-style-type: none"> ● Maior segurança operacional; ● Monitoramento da saúde dos funcionários em tempo real; ● Prevenção de emissões tóxicas no meio ambiente.
6 - Água potável e saneamento	<ul style="list-style-type: none"> ● Otimização e redução do consumo de água; ● Monitoramento assertivo do consumo e da qualidade de água; ● Compartilhamento de dados com as comunidades.

Fonte: A autora (2022). (continua)

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	Exemplos de impactos da I4.0 na mineração
7 - Energia limpa e acessível	<ul style="list-style-type: none"> ● Aprimoramento da eficiência energética; ● Redução da demanda energética local; ● Monitoramento assertivo do consumo energético;
8 - Trabalho decente e crescimento econômico	<ul style="list-style-type: none"> ● Criação de novas oportunidades de emprego; ● Diversificação de capacitações; ● Diversificação da economia local; ● Trabalho com fornecedores locais e melhoria da qualidade de produtos; ● Conexão com mercados externos.
9 - Indústria, inovação e infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> ● Fomentar a inovação do setor; ● Melhoria de qualidade dos bens produzidos; ● Novos meios de produção;
11 - Cidades e comunidades sustentáveis	<ul style="list-style-type: none"> ● Reaproveitamento de resíduos; ● Diminuição da geração de rejeitos e resíduos; ● Melhor planejamento do uso do solo; ● Recuperação energética de resíduos; ● Menor necessidade de barragens de rejeitos.
13 - Ação contra a mudança global do clima	<ul style="list-style-type: none"> ● Promoção de eficiência energética; ● Diminuição do consumo de combustíveis; ● Monitoramento assertivo de emissões; ● Compilamento e divulgação de dados facilitada; ● Modelagem de impactos;

Fonte: A autora (2022). (continuação)

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	Exemplos de impactos da I4.0 na mineração
14 - Vida debaixo d'água	<ul style="list-style-type: none"> ● Menor disposição inadequada de resíduos; ● Monitoramento assertivo da vida aquática; ● Previsão de impactos e avaliação;
15 - Vida sobre a terra	<ul style="list-style-type: none"> ● Diminuição de áreas de degradação; ● Monitoramento assertivo de espécies e impactos na fauna e flora; ● Realização de avaliação de impactos ambientais mais assertivos.

Fonte: A autora (2022). (conclusão)

De todos os 17 ODS, as tecnologias de digitalização podem dar suporte no cumprimento de 10 objetivos, considerando o ODS 12, de acordo com a análise autoral. Isso indica a grande importância da inovação e das tecnologias para que as mineradoras sejam cada vez mais sustentáveis e tenham menos impactos negativos no meio ambiente e nas comunidades. A inovação é constante, e cada vez mais será necessário que as empresas estejam aptas a essas mudanças e priorizem aquelas tecnologias que trarão, não somente lucro e estabilidade, mas também benefícios ambientais e sociais.

Levando isso em consideração, a tendência é que as operações se tornem totalmente digitalizadas, e a chegada da tecnologia da quinta geração de telefonia celular no Brasil (5G) nos próximos anos contribuirá muito para esse avanço (NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO, 2018). O 5G é uma rede de conectividade sem fio robusta, capaz de lidar com grandes quantidades de dados gerados em uma operação de mineração e a sua velocidade de dados é 10 a 100 vezes mais rápida que a 4G, fornecendo latência muito menor, similar ao tempo real. Com isso, haverá o surgimento de novas aplicações das tecnologias digitais na mineração, garantindo maior capacidade, velocidade e confiabilidade, controle de dispositivos com

tempos de resposta extremamente curtos e capacidade de conectar vários dispositivos e serviços diferentes simultaneamente (EPIROC, 2019).

O 5G ainda não foi implementado no Brasil, e será realizado um leilão das faixas de frequência em 5G para investidores que queiram fornecer a tecnologia. O processo de licitação é feito pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), que estima ser possível usar amplamente o 5G no Brasil em 2022 (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2022).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou contribuir para a literatura de inovação apresentando as aplicações e implicações das tecnologias da Indústria 4.0 para o desenvolvimento de uma indústria mineradora mais responsável e sustentável, em conformidade com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12. A partir da análise dos relatórios e dos estudos de caso da aplicação das tecnologias, é possível identificar que as mineradoras estão cientes da necessidade de implementar as inovações, mas ainda foram poucas informações encontradas sobre a aplicação de fato das tecnologias nas principais empresas no Brasil.

As principais soluções aplicadas se baseiam no uso de Inteligência Artificial, Ciência dos Dados e Internet das Coisas, mas é importante ressaltar que tais tecnologias não funcionam sozinhas, e muitas vezes dependem umas das outras para o desenvolvimento de uma solução que tenha o impacto desejado pela empresa. As inovações encontradas possuem um caráter majoritariamente incremental e se concentram em melhorias de processos, buscando elevar a eficiência produtiva e otimização de recursos. Os benefícios ambientais e sociais normalmente aparecem em segundo plano, e os objetivos das empresas se concentram majoritariamente nas tecnologias que vão trazer maior redução de gastos, como a otimização energética por exemplo, que teve maior impacto dentro das soluções estudadas.

É possível identificar que, qualitativamente, as tecnologias de Indústria 4.0 possuem impactos positivos dentro das operações estudadas quando relacionadas com as metas 12.2, 12.4 e 12.5 do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12. Porém tais impactos aparecem de maneiras pontuais, o que de certa forma indica somente uma contribuição para o cumprimento parcial das metas indicadas e não o cumprimento total. Isso se dá principalmente pela falta de articulação e integração dos sistemas operacionais, pela falta de dados de qualidade para a implementação das inovações digitais, pelos desafios de implementar sistemas mais inovadores, mas principalmente pela baixa prioridade que os objetivos ambientais e sociais têm em comparação com os objetivos financeiros da empresa.

Ao realizar a correlação com outros ODS da Agenda 2030, foi possível observar que tecnologias de digitalização também contribuem com o cumprimento parcial de outros Objetivos extremamente importantes para que as mineradoras se tornem mais sustentáveis do ponto de vista da ONU. Apesar de não ter sido feita a análise detalhada das soluções estudadas em correlação com os outros ODS, tais impactos são visíveis e demonstram a abrangência que essas inovações podem ter dentro da indústria mineral.

Dessa forma, é possível concluir que há sim contribuição das tecnologias de Indústria 4.0 para cumprimento do ODS 12 dentro das mineradoras estudadas, porém as soluções somente são aplicadas a partir de objetivos previamente definidos. Para que as mineradoras se tornem capazes de implementar um sistema de consumo e produção responsáveis, é necessário que o compromisso com o meio ambiente e com a sociedade tenham um patamar tão importante quanto o lucro. Tal questão teve uma melhora nos últimos anos, principalmente com a pressão de investidores e da sociedade, mas é necessário que os governos municipais, estaduais e federal se mobilizem para que haja maior pressão nas empresas relacionadas a essa priorização.

Além desses pontos, é importante que haja uma maior difusão da aplicação de novas tecnologias dentro do setor e maior incentivo para o desenvolvimento dessas inovações. Para isso, primeiramente é necessário que haja a mudança da mentalidade do setor mineral brasileiro, que é extremamente conservador. A seleção de lideranças e tomadores de decisão mais diversos impulsionam a transformação, e contribui para a implementação da inovação nas empresas. Essa diversidade também é importante para que a mudança de priorização mencionada acima seja mais enfocada, uma vez que as novas gerações têm grande foco no meio ambiente e nos impactos sociais das indústrias. Ademais, é necessário que existam incentivos públicos e privados, com o desenvolvimento de leis que aumentem a captação de recursos para pesquisa e desenvolvimento na academia brasileira, e assim maiores e melhores estudos serão desenvolvidos no país, democratizando o acesso das mineradoras de todos os

tamanhos a tais soluções, e contribuindo cada vez mais para um setor mineral mais responsável e inovador.

7 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por ser uma temática ainda recente e pouco explorada no contexto da mineração, foram encontradas limitações no desenvolvimento do trabalho, especialmente na busca de informações na literatura e dados divulgados pelas mineradoras no Brasil. Muitas informações tiveram que ser buscadas em contextos internacionais, e foram raros os materiais que especificam os impactos ambientais da aplicação das tecnologias de Indústria 4.0 no setor minerário. Além disso, algumas mineradoras anteriormente selecionadas para o estudo tiveram de ser descartadas do trabalho, uma vez que não existiam documentos oficiais com informações sobre novas tecnologias aplicadas nas operações, o que acabou por limitar o estudo a três mineradoras.

Dentre as informações encontradas sobre as mineradoras estudadas houve também o desafio da comparação quantitativa após a aplicação das tecnologias. Por serem considerados dados sensíveis e competitivos, as empresas não divulgam publicamente os resultados comparativos após a instalação das soluções, o que limitou o trabalho a considerar apenas dados qualitativos.

Para trabalhos futuros existem diversas possibilidades de exploração do tema, uma vez que são poucas as pesquisas existentes nesse contexto. De maneira geral, seria interessante obter mais informações sobre como as tecnologias da Indústria 4.0 impactam a mineração de ferro e de outros minerais em toda a Agenda 2030, trazendo mais soluções e exemplos de aplicações das tecnologias que podem apoiar no cumprimento de outros ODS. Ademais, com o uso de dados numéricos e quantitativos, seria possível realizar uma pesquisa que comparasse os resultados das aplicações das tecnologias em uma operação modelo, e identificasse os principais pontos de maior contribuição das soluções para o cumprimento da Agenda 2030. Tais resultados poderiam apoiar outras empresas a adotarem essas inovações de forma mais assertiva dentro de suas operações, e assim atingirem produções mais sustentáveis.

8 REFERÊNCIAS

ABB (Suíça). **Boliden – a pioneer in sustainable mining**. Zurique, Suíça, 1 out. 2021.

Disponível em:

<https://new.abb.com/news/detail/82369/boliden-a-pioneer-in-sustainable-mining>. Acesso em: 23 nov. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Informe Mineral 1º/2016**. Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro:**

principais substâncias metálicas. Brasília, 2019. Disponível em:

http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuariomineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021.

ANDRADE, Marcelo; NISHIMARU, Guilherme; NASCIMENTO, Douglas; FRÓES, Nádia. Uma revisão sistemática sobre a interação entre Indústria 4.0 e sustentabilidade. *In: XXV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 25., 2018, Bauru, **Anais [...]**. Bauru: UNESP, 2018.

ANGLO AMERICAN (Brasil). **FutureSmart Mining**. [2021a?]. Disponível em:

https://www.angloamerican.com/futuresmart/futuresmart-mining#the-four-concepts-underpinning-a-new-way-of-mining/water-less-mine_tab/novel-leach_tab. Acesso em: 15 ago. 2021.

ANGLO AMERICAN (Brasil). **Onde Operamos**. [2021b?]. Disponível em:

<https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/quem-somos/onde-operamos>. Acesso em: 7 nov. 2021.

ANGLO AMERICAN (Brasil). **Conheça nosso Plano de Mineração Sustentável**. [s. l.], [2021c?]. Disponível em:

https://brasil.angloamerican.com/~/_media/Files/A/Anglo-American-Group/Brazil/sustentabilidade/abordagem-eepoliticas/conheca-nosso-plano-de-mineracao-sustentavel.pdf. Acesso em: 7 nov. 2021.

ARAÚJO, Eliane. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. *In: FERNANDES, F. Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. ISBN 978-85-8261-003-9.

BELOGLAZOV, I. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. **Eurasian mining**. Saint-Petersburg, Russia, n. 2, p. 50-54, 2020.

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

BRASIL. **Decreto nº 10534, de 28 de outubro de 2020**. Institui a Política Nacional de Inovação e dispõe sobre a sua governança. Brasília, DF: Presidência da República, 28 out.

2020. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10534.htm. Acesso em: 20 jan. 2022.

BRASIL MINERAL. **As maiores empresas brasileiras de mineração**. Brasil Mineral, n. 411, p. 60-69, jul. 2021. Disponível em:

<https://www.brasilmineral.com.br/revista/411/ranking.htm>. Acesso em: 5 dez. 2021.

BYRNE, G.; AHEARNE, E.; COTTERELL, M.; MULLANY, B.; O'DONNELL, G. E.; SAMMLER, F. High performance cutting (HPC) in the new era of digital manufacturing: a roadmap. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 1-6, 2016.

CHRISTOFOLETTI, Sérgio; SOBRINHO, José Maria; SOUZA, Marcos; MORENO, Maria. Impactos positivos e negativos da atividade minerária no “APL” de Santa Gertrudes – SP. **Cerâmica Industrial**, jul./ago. 2012.

CNN (Brasil). **Piora de cenário ESG no Brasil pode prejudicar setor privado, alerta economista**. São Paulo, 1 jul. 2021. Disponível em:

<https://www.cnnbrasil.com.br/business/piora-de-cenario-esg-no-brasil-pode-prejudicar-setor-privado-alerta-economista/>. Acesso em: 22 jan. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). **Investimentos em Indústria 4.0**. Brasília: CNI, 2018.

CSN MINERAÇÃO (Brasil). **Relato integrado CSN Mineração 2020**. [s. l.], 2021.

Disponível em:

http://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2021/09/Cmin_RI_2020_PT.pdf. Acesso em 16 nov. 2021.

DA COSTA, Cesar. Indústria 4.0: O futuro da indústria nacional. **POSGERE**, [s. l.], v. 1, n. 4, 1 set. 2017.

DASTBAZ, Mohammad; COCHRANE, Peter. **Industry 4.0 and engineering for a sustainable future**. [s. l.]: Springer, 2019. 235 p.

DELOITTE. **The digital revolution**: Mining starts to reinvent the future. Sydney: Deloitte, 2017.

DELOITTE. **Desafios do setor de mineração exigem postura transformadora**.

Patrocinados Estadão Blue Studio, 18 set. 2018. Disponível em:

<https://patrocinados.estadao.com.br/deloitte/2018/09/18/desafios-do-setor-de-mineracao-exige-m-postura-transformadora/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

EPIROC. **5G faz com que a mineração avance**. [s. l.], 2019. Disponível em:

<https://www.epiroc.com/pt-br/customer-stories/2019/5g-moves-mining-forward>. Acesso em: 11 jan. 2022.

FIESP (Brasil). Agência Indusnet Fiesp. **Fiesp identifica desafios da Indústria 4.0 no Brasil e apresenta propostas.** Sindicato da Indústria de Produtos de Cacau, Chocolates, Balas e Derivados do Estado de São Paulo – SICAB, São Paulo, 7 maio 2018.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL (Genebra, Suíça). **Atlas: mapeando os objetivos de desenvolvimento sustentável na mineração.** Genebra, Suíça, [s. n.], ago. 2017.

FRAUNHOFER IIS (Alemanha). **Research Areas.** [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff.html>. Acesso em: 15 ago. 2021.

GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP. **A framework for AI in mining: foundations of AI.** Canadá: Clò Communications Inc., 2019. 41 p. Disponível em: https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2019/10/GMG_Foundations-of-AI-A-Framework-for-AI-in-Mining-2019-10-07_v01_r01.pdf. Acesso em: 28 dez. 2021.

GONELLA, Jessica; REINAS, Alana; PARRA, Juliana; MORALES, Angélica. Mapeamento dos impactos ambientais do setor de mineração no estado de Minas Gerais. **XI Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 11, ed. 7, p. 127-132, 2015.

IBERDROLA (Brasil). **ESG, como fazer investimentos sustentáveis e responsáveis?** [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/compromisso-social/criterios-da-esg>. Acesso em: 8 ago. 2021.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (Brasil). **Sobre a mineração.** Portal da Mineração. [s. l.], 2018.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (Brasil). **Para mineradoras, Mining Hub é instrumento para a mineração despertar mais confiança e se aproximar da sociedade.** [s. l.], 13 jun. 2019. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/para-mineradoras-mining-hub-e-instrumento-para-mineracao-despertar-mais-confianca-e-se-aproximar-da-sociedade/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (Brasil). **Micros e pequenas empresas mineradoras representam quase 90% do setor mineral do Brasil.** [s. l.], 12 nov. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/micros-e-pequenas-empresas-mineradoras-representam-quase-90-do-setor-mineral-do-brasil/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (Brasil). **Desafios da ampliação das tecnologias na mineração brasileira.** Portal da Mineração. [s. l.], 16 fev. 2021a. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/desafios-da-ampliacao-das-tecnologias-na-mineracao-brasil-eira/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (Brasil). **ESG: conceito indispensável para pavimentar o caminho da mineração do futuro.** [s. l.], 24 jun. 2021b.

Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/esg-pavimentar-mineracao-do-futuro/>. Acesso em: 8 ago. 2021.

INMARSAT. **Mining industry undergoing IoT revolution new inmarsat research finds.**

[s. l.], 13 maio 2020. Disponível em:

<https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/enterprise/2020/mining-industry-undergoing-iot-revolution-new-inmarsat-research-finds.html>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INSIGHT EDITOR (Australia). **IoT, Digital Twins and AI in Mining.** Artificial Intelligence.

[s. l.], 20 fev. 2020. Disponível em:

https://au.insight.com/en_AU/content-and-resources/2020/iot-digital-twins-and-ai-in-mining.html. Acesso em: 5 nov. 2021.

JADOUL, Mark. **How technology is making the mineral resources industry more sustainable.** Nokia, [s. l.], 18 set. 2020. Disponível em:

<https://www.nokia.com/blog/how-technology-is-making-the-mineral-resources-industry-more-sustainable/>. Acesso em: 16 ago. 2021.

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

LEUZINGER, Bruno. **As fábricas do futuro serão cada vez mais inteligentes: um infográfico sobre a Indústria 4.0!** [s. l.], 1 out. 2018. Disponível em:

<https://www.projetodraft.com/as-fabricas-do-futuro-serao-cada-vez-mais-inteligentes-um-infografico-sobre-a-industria-4-0/>. Acesso em 27 out. 2021.

LÖÖW, Joel; ABRAHAMSSON, Lena; JOHANSSON, Jan. Mining 4.0 – The impact of new technology from a workplace perspective. **Mining, Metallurgy & Exploration**, [s. l.], v. 36, p. 701-707, 2019.

MABKHOT, M.; FERREIRA, M.; MAFFEI, A.; PODRZAJ, P.; MADZIEL, M.; ANTONELLI, D.; LANZETTA, M.; BARATA, J.; BOFFA, E.; FINZGAR, M.; PASKO, Ł.; MINETOLA, P.; CHELLI, R.; NIKGHADAM-HOJJATI, S.; WANG, X.V.; PRIARONE, P.C.; LUPI, F.; LITWIN, P.; STADNICKA, D.; LOHSE, N. **Mapping Industry 4.0 enabling technologies into United Nations Sustainability Development Goals.** MDPI, Suíça, 27 fev. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2560/htm>. Acesso em: 13 dez. 2021.

MAPFRE GLOBAL RISKS. **Mining 4.0, an evolving industry.** [s. l.], 2 fev. 2021.

Disponível em:

<https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/article/mining-4-0-an-evolving-industry/?lang=en>. Acesso em: 19 ago. 2021.

MINAS GERAIS. **Lei nº 23291, de 25 de fevereiro de 2019.** Institui a política estadual de segurança de barragens. Minas Gerais: Diário do Executivo, 26 fev. 2019. Disponível em:

<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=23291&comp=&ano=2019>. Acesso em: 22 jan. 2022.

MINE CONNECT (Austrália). **Mining in the next decade**. [s. l.], 6 set. 2018. Disponível em: <https://mineconnector.com/2018/09/06/mining-in-the-next-decade/>. Acesso em: 7 nov. 2021.

MINING HUB. **Cases Mining Hub**. [s. l.], 2021a. Disponível em: <https://www.mininghub.com.br/cases/>. Acesso em: 15 ago. 2021a.

MINING HUB. **Indústria 4.0: por que investir em inovação?** [s. l.], 16 ago. 2021b. Disponível em: <https://www.mininghub.com.br/industria-4-0-por-que-investir-em-inovacao/>. Acesso em: 19 ago. 2021.

MUTANOV, G; ZIYADIN, S., SHAIKH, A. A. Graphic model for evaluating the competitiveness and eco-efficiency of eco-innovative projects. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**. [s. l.], v. 6, n. 4, 2019.

NETO, Euler. **Os impactos da Indústria 4.0 na mineração**. 2019. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO (Brasil). **5G traz novas aplicações de IoT para mineração**. Notícias de Mineração Brasil, [s. l.], p. 1-2, 25 out. 2018. Disponível em: <https://www.noticiasdemineracao.com/automa%C3%A7%C3%A3o/news/1349627/5g-traz-novas-aplica%C3%A7%C3%B5es-de-iot-para-minera%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 21 jan. 2022.

NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO (Brasil). **Como a digitalização vai liderar a transformação da mineração**. Notícias de Mineração Brasil, [s. l.], p. 1-2, 9 jul. 2021. Disponível em: <https://www.noticiasdemineracao.com/opini%C3%A3o/opinion/1413541/como-digitaliza%C3%A7%C3%A3o-vai-liderar-transforma%C3%A7%C3%A3o-da-minera%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 20 jan. 2022.

OLIVEIRA, César. **A história da mineração de ferro em Minas Gerais e a criação do Vale do Aço**. Instituto Histórico e Geográfico de Minas Gerais, 21 set. 2017. Disponível em: <https://semopbh.com.br/uploads/pdf/2017%2012%2020%20Hist%C3%B3ria%20da%20minera%C3%A7%C3%A3o%20de%20ferro%20em%20Minas%20Gerais.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2021.

OLIVEIRA, Gabriela; MORONG, Fábio. A mineração brasileira à luz dos objetivos de desenvolvimento sustentável. **Colloquium Socialis**, v. 4, n. 1, p. 31-45, dez. 2019.

PAULO Lopes – IMXP2020 – Inovação e Data Science no desmonte de rochas com explosivos. Entrevistado: Paulo Lopes. Podcast da Mineração: Palestra IMXP 2020 – CEO BEYOND MINING, 2020. **Vídeo**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-mMysXKFDVM>. Acesso em: 27 out. 2020.

PLATAFORMA AGENDA 2030. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. [s. l.], 2022. Disponível em: <http://www.agenda2030.com.br/>. Acesso em: 19 ago. 2021.

PORTAL DA INDÚSTRIA (Brasil). **5G no Brasil: a tecnologia para impulsionar o crescimento**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/5g-no-brasil/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

PWC – PRICEWATERHOUSECOOPERS Brasil. **Indústria 4.0: digitalização como vantagem competitiva no Brasil**. [s. l.]: PwC, 2016. Disponível em: <https://www.pwc.com.br/pt/publicacoes/servicos/assets/consultoria-negocios/2016/pwc-industry-4-survey-16.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2021.

REZENDE, Vanessa. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Soc. & Nat**, Uberlândia, v. 28, ed. 3, p. 375-384, set./dez. 2016.

RIBEIRO, Bento. Inteligência Artificial melhora gestão de estoque e reduz perdas. **Food Connection**, [s. l.], p. 1-2, 15 jun. 2017. Disponível em: <https://www.foodconnection.com.br/tecnologia/inteligencia-artificial-melhora-gestao-de-estoque-e-reduz-perdas>. Acesso em: 22 jan. 2022.

RUCHKYS, Úrsula; CASTRO, Paulo; MIRANDA, Marcos. Mineração em geossistemas ferruginosos e questões de geoética: o caso do rompimento da barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais – Brasil. **Confins**, n. 40, 2019.

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

TARTAROTTI, Lucas; SIRTORI, Guilherme; LARENTIS, Fabiano. Indústria 4.0: mudanças e perspectivas. *In*: XVIII MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 18., 2018, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul: UCS, 2018.

VALE (Brasil). **Vale terá a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no Brasil**. [s. l.], 11 set. 2018a. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx>. Acesso em: 28 dez. 2021.

VALE (Brasil). **Conheça as novas tecnologias que estão chegando à Vale**. [s. l.], 8 out. 2018b. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/novas-tecnologias-chegando-a-vale.aspx>. Acesso em 12 nov. 2021.

VALE (Brasil). **Vale nas comunidades**. [s. l.], 2021a?. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/sustainability/vale-nas-comunidades/minas-gerais/Paginas/default.aspx>. Acesso em 12 nov. 2021.

VALE (Brasil). **Você sabe o que é Indústria 4.0?** [s. l.], 2021b?. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/pt/initiatives/innovation/industria-40/paginas/default.aspx#ancora_carrossel. Acesso em 12 nov. 2021.

THE WORLD BANK (Washington, DC. EUA). **Climate-smart mining: minerals for climate action.** [s. l.], set. 2018.