CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RAISSA HELENA PAIVA APOLINARIO

ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: barreiras para difusão da inovação ambiental

São Paulo
2020

RAISSA HELENA PAIVA APOLINARIO

ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: barreiras para difusão da inovação ambiental

Dissertação apresentada ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Administração. Orientado pelo Profª. Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza.

São Paulo

2020

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Administração

MESTRADO PPGA-10

Aluno: Raissa Helena Paiva Apolinario **Matrícula:** 321809-6

Título do Trabalho: ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: BARREIRAS PARA DIFUSÃO DA INOVAÇÃO AMBIENTAL

Área de Concentração: Gestão da Inovação

Orientador: Profa. Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza

Data da realização da defesa: 24.06.2020

Avaliação da Banca Examinadora:

ORIGINAL ASSINADA

São Paulo, 24 / 06 / 2020.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza Ass.: _____

Prof. Dr. Jacques Demajorovic Ass.: _____

Profª. Dra. Susana Carla Farias Pereira Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☐ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Henrique Machado Barros

Dedico este trabalho a minha família, em especial minha mãe, meu maior exemplo feminino.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à orientadora e professora Doutora Maria Tereza Saraiva de Souza pela paciência, compreensão, sabedoria e auxílio no desenvolvimento da concepção da dissertação, de modo a canalizar toda minha energia de forma calma e eficiente.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Susana Carla Farias Pereira e Prof. Dr. Jacques Demajorovic que muito gentilmente aceitaram participar da banca de defesa. Muito obrigada pelas contribuições.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela oportunidade da bolsa de estudos concedida para a realização de um sonho, a finalização do Mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Modalidade de Financiamento I.

A equipe do Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana "Padre Sabóia de Medeiros" (FEI), pela estrutura e qualidade, pela oportunidade da bolsa concedida e por todo o apoio ao longo destes dois anos.

Aos Professores do PPGA/FEI, pela dedicação, competência, qualidade, paciência, sabedoria, apoio e todo conhecimento compartilhado ao longo das aulas e quando necessário. Agradeço todas as contribuições, tanto para a dissertação, como para crescimento profissional/pessoal.

Aos entrevistados, especialistas da área de mineração, responsáveis das mineradoras e a Ana pela disponibilidade, atenção, suporte e colaboração para a pesquisa, de modo a contribuir por meio de informações e entrevistas para a construção e produção deste trabalho. Muito obrigada!

À minha mãe, Margarete, que sempre me apoiou e me incentivou a ser a pessoa que sou. Muito obrigada por todo o suporte, força e não me deixar desistir quando eu ligava e falava “mãe, isso não é para mim”. Muito obrigada por ser esse exemplo de mulher e me inspirar todo dia!

Ao meu irmão João, “Rubibis”, que sempre me apoiou e esteve presente para me ajudar e me fazer sorrir quando eu precisava. Obrigada por tudo!

Ao Cauê, meu companheiro e amigo, por todo o suporte, paciência, companheirismo e por não me deixar enlouquecer nesta fase de grandes desafios. Pela compreensão nos momentos de ausência e incentivar este meu crescimento pessoal e profissional. Muito obrigada por tudo!

À minha família de São Paulo, Tio Flávio, Tia Kelly, Belli e Lilo, pelo carinho e amor, por me receberem tão bem em sua casa e sempre me apoiarem e ficarem felizes com cada conquista do mestrado. Meu muito obrigada!

Ao meu padrasto e meu meio-irmão, Carlos e Gustavo, que junto com a minha mãe e irmão, me deram suporte e me incentivaram neste desafio que foi o mestrado. Muito obrigada!

Ao meu pai, Benedito, que sempre me apoiou incentivou a estudar e seguir em frente. Muito obrigada!

As minhas avós, Maria e Cida, por serem mulheres guerreiras cada qual a sua maneira e me apoiarem e incentivarem. Muito obrigada!

As amigas e amigos pela paciência e força neste desafio. Em especial para: Gabriela, Marina e Marcela. Obrigada!

Aos meus amigos do mestrado, pela convivência, experiência compartilhada, acolhimento (né Lucina), momentos de riso e descompressão, palavras de suporte nos momentos de desespero e pelos votos reforçados de “vai dar tudo certo”. Muito obrigada!

Aos colegas de classe, que por meio de muita união, compartilharam suas experiências e contribuíram para a excelente experiência ao longo destes dois anos de mestrado, dos créditos ao período integral na faculdade.

Às secretárias do PPGA/FEI, Carmen, Ana Paula e Fernanda, que sempre com muita paciência e disposição me ajudaram com dúvidas e informações, sempre que precisei.

À equipe da biblioteca, principalmente a bibliotecária Patrícia, por todo auxílio, paciência e orientação durante a formatação do trabalho de acordo com as normas da ABNT.

Por fim, meu muito obrigado para todos que contribuíram e me ajudaram para que eu concluísse o mestrado.

“Maturidade do homem: significa reaver a seriedade que se tinha quando criança ao brincar.”

Nietzsche

RESUMO

A indústria de mineração extrativísta possui um impacto significativo no meio ambiente, porém há um potencial para a aplicação do modelo de economia circular no setor de mineração de forma a lidar com estes desafios. A difusão e adoção da inovação ambiental contribuem para a remoção de barreiras nos processos, de forma a incentivar um sistema que gerencie recursos limitados e renováveis, criando fluxos fechados e reduzindo as externalidades negativas deste tipo de atividade. O objetivo desta pesquisa é analisar os desafios que dificultam a difusão da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração. O método de pesquisa é o estudo de casos múltiplos. Os instrumentos de coleta de dados utilizados foram a pesquisa documental, dados visuais e entrevistas semi-estruturadas. Os resultados mostram que há quatro tipos de barreiras e determinantes, que intercalando-se, podem influenciar a difusão e adoção da inovação ambiental na aplicação dos princípios da economia circular, sendo eles: regulatório, de mercado, organizacional e tecnológico. Estes impulsionadores e obstáculos estão relacionados a quatro elementos fundamentados na economia circular, tais quais, consumo hídrico, consumo de energia alternativa, tratamento de efluentes e disposição de rejeitos. O trabalho permitiu o mapeamento das principais inovações tecnológicas utilizadas para mitigar os impactos ambientais no setor de minério de ferro. Identificar as principais barreiras e determinantes relacionados ao arranjo setorial do ciclo técnico de economia circular no setor de minério de ferro que interferem na difusão e adoção de inovações ambientais tecnológicas no setor. Além de propor um modelo de análise que destaca estas barreiras e determinantes que implicam na circularidade da indústria de mineração de ferro, de modo a facilitar a implementação da economia circular nesta dinâmica setorial.

Palavras-chave: Economia Circular. Inovação Ambiental. Tecnologias Ambientais. Impactos Ambientais. Mineração de ferro.

ABSTRACT

The extractive mining industry has a significant impact on the environment, however, there is a potential for the application of the circular economy model in the mining sector in order to deal with these challenges. The diffusion of eco-innovation contributes to the removal of barriers in the processes in order to encourage a system that manages limited and renewable resources, creating closed flows and reducing the negative externalities of this type of activity. The research has the objective to analyze the challenges that hinder the diffusion of technological environmental innovation for the implementation of the circular economy model in the mining industry. A multiple case study was the research method used. The data collection instruments were documentary research, visual data and semi-structured interviews. The results show that there are four types of barriers and determinants, which, interspersed with each other, can influence the propagation of environmental innovation at the application of the principles of circular economy, namely: regulatory, market, organizational and technological. These drivers and obstacles are related to water consumption, alternative energy consumption, wastewater treatment and waste disposal. The study enabled the identification of the main technological innovations used to mitigate environmental impacts at the iron ore sector, in addition to presenting an analysis model that highlights the barriers and determinants that imply the circularity of the iron mining industry, in order to enable implementation of the circular economy in this sectorial dynamic.

Keywords: Circular Economy. Environmental Innovation. Environmental Technologies. Environmental impacts. Iron mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Síntese dos princípios do modelo de economia circular 27
Figura 2 - Modelo de economia circular aplicando os princípios operacionais e princípios básicos 38
Figura 3 - O potencial ganha-ganha da economia circular baseado nas três dimensões do desenvolvimento sustentável 39
Figura 4 - Diagrama do fluxo de recursos integrado com o modelo de economia circular..... 40
Figura 5 - Reação em cadeia e as principais barreiras a transição para o modelo de economia circular 44
Figura 6 - Fatores orientadores da inovação ambiental 52
Figura 7 - Etapas do processo de mineração e processamento de minério de ferro 59
Figura 8 - Consumo de energia e emissões por etapa na indústria de mineração 64
Figura 9 - Uso da água na mineração e seus impactos regionais 70
Figura 10 - Fluxograma de um sistema de tratamento de efluentes tradicional na mineração. 74
Figura 11 - Fluxo de materiais e resíduos da indústria de mineração – processo de lavra e beneficiamento..... 85
Figura 12 - Representação de falhas de barragens de rejeito 87
Figura 13 - Modelo de análise do ciclo técnico da indústria de mineração..... 93
Figura 14 - Delimitação do escopo da pesquisa na indústria de minério de ferro..... 98
Figura 15 - Etapas do desenvolvimento do estudo de casos múltiplos na indústria de mineração..... 99
Figura 16 - Relação dos casos entrevistados 100
Figura 17 - Etapas da coleta de dados 103
Figura 18 - Convergência de múltiplas fontes de evidências 106
Figura 19 - Modelo de análise do ciclo técnico de economia circular do setor de mineração e barreiras e determinantes da difusão de inovações ambientais tecnológicas 159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos princípios do modelo de economia circular 34
Quadro 2 - Definição dos níveis de implantação do modelo de Economia Circular..... 36
Quadro 3 - Descrição dos principais drivers para o modelo de economia circular..... 42
Quadro 4 - Principais barreiras e limitações para aplicação do modelo de economia circular 45
Quadro 5 - Síntese do processo e processamento de mineração 62
Quadro 6 - Síntese dos tipos de energia alternativas 68
Quadro 7 - Interações da água em etapas operacionais do setor de mineração..... 70
Quadro 8 - Tecnologias e processos utilizados nas etapas de tratamento de águas residuais da mineração..... 75
Quadro 9 – Categorias e subcategorias teóricas do estudo..... 92
Quadro 10 - Códigos de referência dos entrevistados na pesquisa..... 104
Quadro 11 - Categorização dos princípios de economia circular como base para as entrevistas 107
Quadro 12 - Comparação de itens relacionados ao consumo de energia e energias alternativas entre os casos da pesquisa 109
Quadro 13 - Comparação de itens relacionados ao consumo de água entre os casos da pesquisa 116
Quadro 14 - Comparação de itens relacionados ao reaproveitamento de água entre os casos da pesquisa 121
Quadro 15 - Comparação de itens relacionados ao reaproveitamento de rejeitos minerais entre os casos da pesquisa 124
Quadro 16 - Comparação de itens relacionados ao tratamento de efluentes minerais entre os casos da pesquisa 129
Quadro 17 - Comparação de itens relacionados ao tratamento e disposição de resíduos minerais entre os casos da pesquisa..... 135
Quadro 18 - Elementos do primeiro princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas 143
Quadro 19 - Elementos do segundo princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas 148
Quadro 20 - Elementos do terceiro princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas 154

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 CONTEXTO DE PESQUISA 14
1.2 JUSTIFICATIVA E QUESTÃO DE PESQUISA 18
1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVO ESPECÍFICOS 23
1.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO 25
2 REFERENCIAL TEÓRICO 26
2.1 ECONOMIA CIRCULAR 26
2.1.1 O modelo da economia circular 26
2.1.1.1 Princípio 1: Gestão de fluxos renováveis e materiais finitos 28
2.1.1.2 Princípio 2: Ciclos biológicos e técnicos 30
2.1.1.2.1 Ciclo biológico 30
2.1.1.2.2 Ciclo técnico 31
2.1.1.3 Princípio 3: Gerenciamento das externalidades 32
2.1.2 Modelos complementares da economia circular 37
2.1.3 Principais drivers para a implementação do modelo de economia circular 40
2.1.4 Limitações e barreiras para a implementação do modelo de economia circular 43
2.2 INOVAÇÃO AMBIENTAL TECNOLÓGICA APLICADA NO SETOR DE MINERAÇÃO 47
2.2.1 Difusão da inovação 48
2.2.2 Inovação ambiental 50
2.2.3 Inovação no contexto da indústria de mineração de ferro 54
2.3 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO E ASPECTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO 57
2.3.1 Consumo de energia e tecnologias alternativas no setor de mineração 63
2.3.1.1 Energia Eólica 65
2.3.1.2 Energia Solar 66
2.3.1.3 Energia Hidrelétrica 66
2.3.1.4 Biocombustíveis 67

2.3.2 Consumo de água e tecnologias ambientais para tratamento de efluentes na indústria de mineração **68**

2.3.2.1 Tecnologias e processos do tratamento primário na mineração ***75***

2.3.2.2 Tecnologias e processos do tratamento secundário na mineração ***79***

2.3.2.3 Tecnologias e processos do tratamento terciário ***82***

2.3.3 Tecnologias de tratamento e disposição de resíduos da mineração **84**

2.3.3.1 Impactos ambientais associados à Pilha de Estéril ***86***

2.3.3.2 Barragens de contenção e seus impactos ***86***

2.3.3.3 Tecnologia Thickened tailings ***89***

2.3.3.4 Paste Backfill e seus usos ***89***

2.3.3.5 Sistema de disposição Dry Stacking ***90***

2.3.3.6 Reciclagem e reutilização dos rejeitos de mineração ***91***

2.4 MODELO DE ANÁLISE 92

3 MÉTODO DE PESQUISA **98**

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA 98

3.2 ESTUDO DE CASO MÚLTIPLO 99

3.3 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS 102

3.4 FORMAS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS 105

4 RESULTADOS DA PESQUISA **109**

4.1 PRINCÍPIO 1: PRESERVAÇÃO DO CAPITAL NATURAL NO SETOR DE MINERAÇÃO 109

4.1.1 Fontes de energia e utilização de energias alternativas no setor de minério de ferro **109**

4.1.2 Consumo hídrico no setor de minério de ferro **116**

4.2 PRINCÍPIO 2: OTIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO DE RECURSOS POR MEIO DA CRIAÇÃO DE CICLOS NO SETOR DE MINERAÇÃO 121

4.2.1 Reaproveitamento de água no setor de minério de ferro **121**

4.2.2 Reaproveitamento de rejeitos no setor de minério de ferro **124**

4.3 PRINCÍPIO 3: GERENCIAMENTO DAS EXTERNALIDADES NEGATIVAS NO SETOR DE MINERAÇÃO 129

4.3.1 Tratamento de efluentes no setor de minério de ferro 129

4.3.2 Disposição de rejeitos no setor de minério de ferro 135

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 142

5.1 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 1 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO 142

5.1.1 Uso de energias alternativas na indústria de minério de ferro 143

5.1.2 Consumo hídrico na indústria de minério de ferro 145

5.2 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 2 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO 147

5.2.1 Reaproveitamento de água na indústria de mineração de ferro 148

5.2.2 Reaproveitamento de rejeitos minerais na indústria de mineração de ferro 150

5.3 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 3 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO 153

5.3.1 Tratamento de efluentes na indústria de mineração de ferro 154

5.3.2 Tratamento e disposição de rejeitos minerais na indústria de mineração de ferro 156

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 161

REFERÊNCIAS 168

APÊNDICE A – Guia para entrevistas 184

APÊNDICE B – Questões da entrevista semiestruturada - Especialista 186

APÊNDICE C – Questões da entrevista semiestruturada - Mineradora 190

APÊNDICE D – Formulário de consentimento 195

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo discorre sobre o contexto da pesquisa, a justificativa teórica do trabalho, os objetivos gerais e específicos e o pressuposto da pesquisa.

1.1 CONTEXTO DE PESQUISA

O crescimento populacional mundial e consequentemente o crescimento da demanda por produtos resultou em um maior desenvolvimento da indústria manufatureira e em um grande impacto ambiental, sendo necessário, administrar as operações diárias a fim de controlar as emissões e os recursos limitados (PARIDA et al., 2019). Os processos de manufatura têm quantidades significativas de perda na extração dos recursos naturais, mostrando-se insustentável a longo prazo (AID et al., 2017).

O modelo de economia predominante, o modelo linear, causa impactos ao meio ambiente, devido ao consumo descomedido de recursos naturais, poluição e o aumento da produção de resíduos. Como uma alternativa para este cenário, se faz necessário uma economia que possua impactos mínimos ao meio ambiente, da extração de recursos a manufatura, de modo a reduzir desperdícios do processo e da vida útil do produto (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

No modelo linear "[...] entende-se que há uma oferta ilimitada de recursos naturais e que o ambiente tem uma capacidade ilimitada de absorver resíduos e poluição" (COOPER, 1999, p. 10, tradução nossa). A economia linear é um sistema unidirecional, desde a extração de capital natural, geração e descarte inadequado de resíduos na cadeia de valor e pós-consumo, na transformação de recursos naturais em produtos manufaturados (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

Os efeitos desfavoráveis provenientes do modelo linear ameaçam a estabilidade dos ecossistemas naturais globais, pois são escassas as práticas de mercado que consideram os bens públicos, como a qualidade do ar, água e florestas (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Desta forma, o saldo do consumo de capital natural do planeta não está fechando, ou seja, gasta-se mais recursos naturais em processos manufatureiros do que o ecossistema natural é capaz de repor (EMF, 2012). Logo, ocasiona-se efeitos negativos e cumulativos para o ecossistema, tais quais, esgotamento do capital natural, degradação à biosfera e alterações climáticas (JESUS; MENDONÇA, 2018).

O conceito de economia circular e suas práticas apresentam-se como uma alternativa a este modelo de "*take, make and dispose*" (KORHONEN et al., 2018). Porém, a transição do modelo de economia linear para um modelo circular enfrenta desafios devidos a alguns fatores pré-existentes, como a complexidade da rede global de produção, o modelo econômico tradicional, deficiência de ferramentas e métodos de medição do benefício da circularidade, além de atenção escassa por parte dos gestores e *stakeholders* influentes (VELEVA; BODKIN, 2018), principalmente, na questão ambiental a longo prazo.

A Economia Circular é uma solução que concilia o crescimento econômico com a proteção e conscientização ambiental (LIEDER; RASHID, 2016), desassociando o paradigma do crescimento econômico com o esgotamento de recursos (JESUS et al., 2019; SUÁREZ-EIROA et al., 2019). Logo o momento de alteração entre modelos é impulsionado pelo desgaste do modelo linear, devido a fatores como o aumento da conscientização e mobilização do consumidor em relação aos impactos dos produtos, principalmente em redes sociais; o avanço tecnológico em diversas áreas, principalmente na área de cadeia de suprimentos; a volatilidade dos preços e disponibilidade de recursos; o atingimento do limite da eficiência nos processos de fabricação; e o risco das cadeias globais (EMF, 2012; EMF 2013).

O tema apresenta-se como uma abordagem sistêmica que envolve a pluralidade de agentes (JESUS et al., 2019). Esta mudança é integradora, pois diversos setores são acionados, requerendo uma visão holística dos processos, agregando uma melhoria do modelo vigente e trazendo uma interação entre a economia e o meio ambiente (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016), de forma a criar uma rede entre os agentes envolvidos. Considerada uma abordagem multidimensional, promove uma grande mudança no modelo socio técnico do desenvolvimento econômico, apresentando uma nova forma de produção e consumo, uma vez que engloba toda a cadeia de valor, desde a seleção de recursos até o descarte pós-consumo (JESUS; MENDONÇA, 2018).

A economia circular é vista como um conceito guarda-chuva a fim de compreender a gestão de resíduos e recursos, sendo definido quando se utiliza um conjunto de conceitos já existentes, não relacionados anteriormente, conectando partes destes conceitos e resultando em um novo conceito (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). A principal motivação da economia circular é a compreensão de que o aproveitamento dos recursos pode ser otimizado e os resíduos e emissões no sistema reduzidos através da circularidade (GEISSDOERFER et al., 2017). É uma estratégia focada na interconexão das cadeias de recursos e energia para adquirir um conjunto de medidas-chave que aplicados à um circuito fechado de produção (MA et al., 2015) realiza a projeção do produto desde a fabricação até o descarte pós-consumo.

O tema economia circular é promovido por diversos atores sendo eles, fundações privadas, organizações empresariais, governos de grandes nações (KORHONEN et al., 2018) e a academia (TURA et al., 2019), sendo visível ascensão da discussão sobre o tema por meio do crescimento exponencial de publicações a partir de 2014 por diversos países, tais quais, China, Reino Unido e Holanda (GEISSDOERFER et al., 2017). É uma forma de promover o debate de novos modelos de negócios inovadores, não apenas na academia, mas também, na literatura de negócios e na criação de políticas públicas (MORAGA et al., 2019; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

A economia circular está em evidência em agendas políticas, por meio de pacotes de incentivo governamental ou por regulamentação, principalmente na União Europeira (EU) - *EU Circular Economy Package* (2015) (VELENTURF et al., 2019), na China com a lei *Circular Economy Promotion Law* (2009) – objeto de metas de políticas oficiais (JESUS; MENDONÇA, 2018; GENG et al., 2012) e na Holanda (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018), entre outros.

A Fundação *Ellen MacArthur* é precursora na conceitualização (LEWANDOWSKI, 2016), estruturação (SUÁREZ-EIROA et al., 2019) e disseminação do conceito e do modelo de economia circular para os diversos agentes, entre eles os formuladores de políticas, organizações privadas e pesquisadores da academia (GEISSDOERFER et al., 2017). Há um consenso na literatura de autores que corroboram a Fundação *Ellen MacArthur* como base para as definições e os princípios da economia circular (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; KORHONEN et al., 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017) como um ator essencial no tema (JESUS; MENDONÇA, 2018; GEISSDOERFER et al., 2017; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; LEWANDOWSKI, 2016; MORAGA et al., 2019; STEWART; NIERO, 2018).

O tema foi evoluindo mediante o desenvolvimento do conceito por meio do refinamento das diversas escolas de pensamento em que é baseado o modelo (MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019). A Fundação *Ellen MacArthur* (EMF, 2012 e 2013) atribui a origem do conceito geral de economia circular fundamentado e desenvolvido por meio de um conjunto de escolas de pensamento: *Design* Regenerativo, *Performance Economy*, *Cradle to Cradle, Ecologia industrial, Biomimética* (EMF, 2012), Economia Azul *e Permaculture* (EMF, 2013).

Devido a abrangência do conceito de economia circular, alguns autores apontam uma definição ampla e outros afirmam que é um desafio a definição única do conceito (MORAGA et al., 2019). Este desentendimento advém do fato de que o conceito é influenciado por

diferentes escolas de pensamentos, o que requer uma visão de todo o sistema (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Nesta mesma linha, outros autores afirmam que o conceito de economia circular possui influência de diversas escolas de pensamento além das apresentadas no relatório da fundação *Ellen MacArthur,* sendo elas: 3Rs (BASSI; DIAS, 2019; GENG et al., 2012; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; PARIDA et al., 2019; RANTA et al., 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; TURA et al., 2019), 4Rs (HU et al., 2011; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017), *Cradle to Cradle* (BASSI; DIAS, 2019; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; MATHEWS; TAN, 2011; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019; SUÁREZ-EIROA et al., 2019), ecologia industrial (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KORHONEN et al., 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; RANTA et al., 2018; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; VELEVA; BODKIN, 2018), ecoeficiência (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; MA et al., 2015; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019), economia ambiental (MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019), simbiose industrial (KORHONEN et al., 2018; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; MATHEWS; TAN, 2011; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; RANTA et al., 2018), economia compartilhada (KORHONEN et al., 2018; RANTA et al., 2018), economia do desempenho (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018), Produção Mais Limpa (JESUS et al., 2019; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019), desperdício zero (SUÁREZ-EIROA et al., 2019), entre outras.

A economia circular possui princípios de ação delineados pela Fundação *Ellen MacArthur*, como forma de orientar a economia circular, sendo eles: i) Princípio 1 - focado em preservar e aprimorar o capital natural, de modo a equilibrar os fluxos do sistema, principalmente por meio do gerenciamento de estoques finitos e renováveis; ii) Princípio 2 - estimula a maximização do rendimento de recursos que circulam pelo sistema, mantendo o valor deste material por meio de ciclos biológicos ou técnicos; e iii) Princípio 3 - proporciona o gerenciamento das externalidades negativas geradas no sistema (EMF, 2015).

A fragmentação do campo de economia circular, devido a fundamentação em diferentes escolas de pensamento, limita a compreensão dos fatores determinantes e das barreiras para a difusão de um modelo de economia circular (RANTA et al., 2018). A transição e a aplicação para um modelo de economia circular apresentam-se como desafiante devido ao longo prazo do progresso. A identificação de barreiras e determinantes é fundamental para uma transição mais eficiente, principalmente as barreiras, que podem atrapalhar aumentar este prazo de

processo. As principais barreiras para a transição da economia circular podem ser identificadas no âmbito cultural, regulatório, de mercado e tecnológico (KIRCHHERR et al., 2018).

A mudança de modelos significa a mudança de lógica, partindo de uma abordagem linear esbanjadora de recursos naturais para uma abordagem cíclica e restauradora com estruturas de fluxos físicos inteligentes interligando organizações e setores (KORHONEN et al., 2018). Deste modo, a inovação ambiental é essencial para a transição da economia circular, como facilitadora, pois mitiga as barreiras tecnológicas, de forma a propiciar a mudança sistêmica deste novo modelo econômico (JESUS; MENDONÇA, 2018).

A inovação ambiental é uma ramificação da inovação focada em reduzir o impacto ambiental das atividades de produção e consumo (KIEFER; CARRILLO-HERMOSILLA; DEL RÍO, 2019). É possível identificar na literatura diferentes terminologias que representam inovações orientadas à questão ambiental, como inovação ambiental, eco-inovação, inovação verde, entre outros que apesar de nomes diferentes tratam a priori do mesmo objetivo, mitigar os impactos ambiental (GENTE; PATTANARO, 2019).

A inovação ambiental traz benefícios como a redução de custos de produção por meio da ecoeficiência, redução de emissões, gerenciamento de resíduos e *design* ecológico (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). É resultado de ações orientadas à questão ambiental – para o tomador de decisão (ARRANZ et al., 2019), por meio do uso eficiente de energia e recursos, mitigando os desperdícios do processo de manufatura (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019).

Este conceito propõe uma mudança no processo produtivo da organização a fim de reduzir o uso de recursos na fabricação de um produto ou serviço (RENNINGS, 2000) e é incentivada pelas capacidades de inovação da organização que a utilizam, além de agregar a ecoeficiência, mostrando sua importância à medida que traz mudanças que integram a questão ambiental em seu *design* e tecnologias limpas (LIAO et al., 2018; TERRYN; LAZAR, 2016).

1.2 JUSTIFICATIVA E QUESTÃO DE PESQUISA

Há algumas lacunas em estudos da economia circular interligada com a inovação ambiental (JESUS; MENDONÇA, 2018). Há ainda falta de uma discussão sistêmica sobre a relação entre os conceitos de inovação ambiental e economia circular (GENTE; PATTANARO, 2019) e a necessidade de estudos para uma melhor compreensão dos contextos em que algumas estratégias e modelos de negócios circulares podem oferecer benefícios ambientais (JESUS et al., 2019).

Logo é necessário estudos sobre a aplicação de novos modelos de negócios e a forma que afetam os diferentes setores econômicos. O conceito de economia circular está intimamente ligado a setores específicos, como gestão de resíduos e recursos (GENTE; PATTANARO, 2019). Os estudos referentes aos modelos de negócios circulares não são tratados com tanta frequência na literatura sobre o tema. Assim, identifica-se como lacuna de pesquisa a falta de replicabilidade dos modelos de negócios circulares para as organizações (LEWANDOWSKI, 2016).

O debate científico entre a integração entre a economia circular e inovação ambiental ainda é visto como um campo em aberto. Principalmente porque as implicações científicas - limites e desafios da prática da economia circular ainda precisam ser desenvolvidas no campo acadêmico. Outro ponto é a falta de estudos ligados a tecnologias limpas de redução de impactos ambientais aplicadas ao conceito de economia circular, que é pouco explorado neste tema. Além da falta de estudos em relação ao impacto do setor econômico com a transição para um modelo de economia circular (GENTE; PATTANARO, 2019).

A economia circular enfrenta barreiras advindos de fatores institucionais e questões técnicas, apesar de ser impulsionada por tendências globais enraizadas na volatilidade dos recursos e por apresentar transformações sistêmicas. Esta transformação robusta com abordagem sistêmica é facilitada pela integração da economia circular com o conceito de inovação ambiental, principalmente o foco da inovação tecnológica na transição para um modelo circular. Pois a inovação ambiental é vista como uma possibilidade para superar desafios ambientais - contaminação de água, poluição do ar, resíduos, entre outros - principalmente os técnicos (JESUS; MENDONÇA, 2018).

Pesquisas recentes apontam a importância das questões institucionais amplas como forma de transição e escolhas mais sustentáveis das empresas, pois as iniciativas mais bem sucedidas para o modelo de economia circular implica no envolvimento de diversos atores e partes interessadas da sociedade, combinando esforços para adquirir benefícios da eficiência e fluxo circular. Porém, em muitos casos a literatura sobre economia circular focou somente em questões técnicas - tecnologias e fluxos (RANTA et al., 2018), não abrangendo tanto a parte institucional.

O ambiente institucional é responsável tanto pelo incentivo ou por dificultar a difusão e a adoção de iniciativas sustentáveis, para uma transição para a economia circular. Principalmente pelo fato dos sistemas deste ambiente institucional - regulatório, normativo, entre outros - se não bem alinhados com os objetivos da economia circular e iniciativas ambientais, podem atuar de diferentes formas, como inibidor ou incentivador. Ou seja, estes

sistemas e pilares legitimam a transição da economia circular e iniciativas ambientais no ambiente institucional (RANTA et al., 2018).

O setor extrativista é um dos maiores produtores e consumidores de energia no sistema tradicional, de produção-consumo, gerando diversas externalidades ambientais e sociais. Porém atualmente ainda é necessário a exploração de reservas naturais devido a construção e a transição para ferramentas importantes para o desenvolvimento sustentável, como por exemplo, energia renovável (VELENTURF et al., 2019). Para a cadeia de suprimentos do metal, o abastecimento pode vir de duas fontes: reciclagem e a mineração. Porém, como a reciclagem total de material – não havendo a necessidade de atividade extrativista - não supri a demanda mundial de minério, logo é preciso garantir que os impactos ambientais advindos das atividades mineradoras sejam mínimos possíveis (JESWIET; SZEKERES, 2016). Sendo a aplicação de inovações e a economia circular uma grande oportunidade em potencial para lidar com os desafios e externalidades deste setor (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

O setor extrativista como todo (VELENTURF et al., 2019), incluindo o setor mineral, não é tratado no diagrama de economia circular da Fundação *Ellen MacArthur*, não aparecendo em exemplos dos loops restaurativos (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). Logo, destaca-se a importância da aplicação da economia circular no setor mineral, como forma de oferecer benefícios significativos as externalidades ambientais e sociais geradas (VELENTURF et al., 2019), mas também como uma possibilidade de mudança de percepção e de modelo de negócio.

Desta forma, a contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento da literatura sobre a relação de dois temas em crescimento exponencial, economia circular e inovação ambiental, aplicados na cadeia de produção de indústrias de alto impacto ambiental – minério de ferro. De modo, a suprir a lacuna da escassa discussão entre os principais conceitos e sua repercussão em um setor específico, pouco tratado na literatura dos temas. Além do desenvolvimento de um modelo de análise criado para o setor de mineração configurando como uma contribuição aplicada desta pesquisa.

O setor extrativista está na lista de indústrias com altas atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais, segundo a Lei nº 6.938 de 1981, o qual regulamenta a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). A referida legislação sofreu a inclusão do Art. 17-B pela lei nº 10.165 de 2000 que institui a taxa de controle e fiscalização ambiental (TCFA) como modo regulador para as indústrias, com base no potencial de poluição (PP) e do grau de utilização (GU) de recursos naturais das atividades do setor (BRASIL, 2000, Art. 17-B).

Particularmente a indústria de minério de ferro é uma das principais atividades antropogênicas de efeitos negativos ao meio ambiente - com impactos de longo prazo no ecossistema natural, devido a retirada de rochas e solos, alto consumo de água e energia relacionados a sua produção, além da geração de quantidade significativa de efluentes que gera risco no seu armazenamento e disposição. Pois, os depósitos de minério de ferro são ricos em elementos potencialmente tóxicos, como por exemplo, arsênio, manganês e mercúrio, com risco de contaminação de solos, atmosferas e águas - subterrâneas ou superficiais (HATJE et al., 2017).

O rompimento da barragem difere-se de outros modos de contaminação antropogênicas devido a quantidade e velocidade de locomoção dos rejeitos por km, ocasionando a cobertura de solo e vegetação, sedimentação e contaminação dos rios - gerando mudanças significativas na morfologia das bacias hidrográficas, destruindo biossistemas e prejudicando a qualidade da água (HATJE et al., 2017). Além dos impactos diretos ao meio ambiente e comunidades - como mortes e a contaminação da água e solo, os rompimentos de barragens impactam indiretamente outros pontos como atividades socioeconômicas - por exemplo a pesca, contaminação de áreas de conservação de biodiversidade, acumulação de sedimentos potencialmente tóxicos em sedimentos oceânicos e erosão do solo próximo aos rios afetados (GARCIA et al., 2017).

No Brasil, ocorreram duas tragédias de rompimento de barragem, em 2015 com a ruptura da barragem do Fundão (MG) e em 2019 com a falha da barragem do Córrego do Feijão (MG) (THOMPSON et al., 2020). No desastre de 2015, foram despejados 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos por aproximadamente 663 km da localidade da barragem do Fundão, impactando na morte de trabalhadores e moradores locais, o Rio Doce, destruindo o ambiente natural e destruindo inúmeras comunidades ao redor (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019). O colapso ocorrido em 2019, lançou 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos, resultando em 250 mortes, impacto do rio Paraopeba, destruição de ecossistemas naturais e impactando comunidades vizinhas (THOMPSON et al., 2020).

Os resíduos da indústria de minério de ferro são um dos principais desafios enfrentados por este setor, principalmente devido à quantidade gerada – quanto maior a demanda, maior a produção; maiores os riscos advindos dos rejeitos. Entretanto, o volume de resíduos é influenciado pela tecnologia utilizada no processamento de mineração e pela característica do depósito de minério de ferro. Portanto, é importante a aplicação do gerenciamento e o reaproveitamento dos resíduos em outro processo industrial, de maneira a reduzir riscos e atender as regulamentações ambientais vigentes no país de operação (YELLISHETTY et al., 2008).

Outros dois desafios ambientais para a indústria de mineração de ferro é o consumo intensivo de energia e água em suas atividades produtivas. Estes desafios além de serem vistos como riscos comerciais para as minas - em aspectos de produção e financeiro – provoca impactos ambientais devido a descarga de efluentes e emissões de GEE, além da mudança em fontes de águas locais devido ao alto consumo (NGUYEN et al., 2014). Estes desafios podem ser resolvidos por meio da introdução de soluções tecnológicas inovadoras nos processos de mineração (PESTRYAK, 2015).

Os desafios advindos dos efluentes e rejeitos da indústria de mineração de ferro podem ser uma oportunidade em potencial para a recuperação de materiais e valor econômico para a empresa, por meio do reaproveitamento de recursos no próprio processo após tratamento - ciclos restaurativos, ou até mesmo com a utilização dos resíduos como matéria-prima para processos de outras indústrias de transformação (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

A pressão crescente em relação ao desempenho ambiental do setor de minério de ferro gera o aumento da demanda por novas tecnologias, ou seja, a adaptação da indústria de minério de ferro (CHOPARD et al., 2019). Porém, o setor é visto como conservador quando se trata de desenvolvimento e adaptação de novas tecnologias, devido ao investimento operacional e de longo prazo para comprovação do sucesso da iniciativa inovadora (GÜLCAN, 2020). A dinâmica setorial do minério de ferro estimula a produção com o menor custo e inovações incrementais (WARHURST; BRIDGE, 1996). O setor em questão de investimentos em tecnologias e inovações é classificado como médio-baixo (OECD, 2016).

Na indústria de minério de ferro o desenvolvimento sustentável pode ser atingido com o aprimoramento de métodos e processos minerais que aprimoram os benefícios técnicos, resultando em redução de custos e impactos ambientais e sociais (CHARIKINYA et al., 2017). A dinâmica setorial - variabilidade de preços da *commodity* do minério - e a geologia do minério são fatores que possuem grande influência no processo e na indústria de minério de ferro. Portanto, a inovação apresenta-se como uma ferramenta de auxílio para trabalhar essas complexidades e desafios inerentes a indústria de minério de ferro, permitindo lidar com estas mudanças eventuais. Porém, o setor de minério de ferro possui um alto potencial para inovações incrementais - que garantem melhorias rápidas e pequenas, não oferecendo tanto esforço para grandes inovações - disruptivas, as que desafiam o conhecimento ou processo já existente (BEARMAN, 2013).

Dentro deste contexto de mudanças incrementais a questão ambiental surgem como um imperativo para este setor, por ser uma indústria fundamentada na extração de recursos e altos impactos ambientais (PAJUNEN et al., 2012). Sendo a difusão e aplicação das inovações

ambientais respostas organizacionais a este imperativo ambiental exigidas por um arranjo institucional das partes interessadas da cadeia de valor (WARHURST; BRIDGE, 1996). Ou seja, os *stakeholders* podem impulsionar ou criar obstáculos para a difusão e o desenvolvimento de inovações. Portanto, barreiras ou determinantes podem influenciar as inovações ambientais no setor de minério de ferro (PAJUNEN et al., 2012).

Deste modo, a difusão e aplicação de tecnologias nas atividades extrativistas de mineração com o objetivo de fechamento de ciclos e mitigação dos impactos negativos (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019) se faz essencial. Principalmente como mitigadora de impactos como a contaminação do solo (RAKOTONIMARO et al., 2017), contaminação das águas (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017), ruídos, emissões de GEE, poeira (RODOVALHO et al., 2019) e rompimentos de barragens de rejeitos com impacto em ecossistemas e comunidades (GALVÃO et al., 2018). Portanto, é preciso identificar as barreiras e determinantes de arranjos institucionais e *stakeholders* que englobam a dinâmica setorial do setor, influenciando na difusão e adoção de inovações ambientais.

Dessa forma, o presente trabalho busca responder a seguinte pergunta de pesquisa: Como as barreiras institucionais dificultam a difusão e adoção da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração de ferro?

1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVO ESPECÍFICOS

O objetivo geral norteador do escopo deste trabalho é analisar os desafios que dificultam a difusão e adoção da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração. Para atender este objetivo geral foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

a) Mapear os impactos ambientais significativos no processo de lavra e beneficiamento da indústria de minério de ferro;
b) Mapear os tipos de inovações ambientais tecnológicas utilizadas na indústria de mineração responsáveis pela mitigação dos impactos ambientais;
c) Investigar como as inovações tecnologias são difundidas e adotadas nos processos para a viabilização da circularidade da indústria de minério de ferro;

Para responder a pesquisa e os objetivos propostos, optou-se por uma pesquisa qualitativa, conduzida por meio da abordagem de estudos de casos múltiplos, tendo como recorte duas indústrias de mineração. Optou-se pela indústria de minério de ferro devido a sua importância no PIB e sua escala de produção no Brasil. Como demonstrativo, entre a produção bruta de diversas substâncias em 2017, a produção de minério de ferro é de 585.337.085 toneladas, sendo a maior produção do Brasil, seguida da produção de Cobre de 111.340.233 toneladas e ouro com 92.206.502 toneladas (ANM, 2019). Pois, há uma relação entre o aumento da produção, intenso ou modesto, com as falhas de barragens de disposição de rejeitos, como pode ser visto nos desastres ocorridos no Brasil em 2015 e 2019 (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019).

Deste modo, o pressuposto desta pesquisa é de que o modelo de economia circular aplicado aos processos da indústria de minério de ferro, lavra e beneficiamento, reduz o impacto ambiental causado por este setor, principalmente por meio da difusão e aplicação de novas tecnologias para recuperação e reaproveitamento de recursos e resíduos, auxiliando na circularidade do processo (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017; VELENTURF et al., 2019). O avanço da tecnologia que reduz as externalidades negativas ao meio ambiente é necessária para lidar com os desafios para difusão e aplicação do modelo circular, principalmente em um setor extrativista com a mineração (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). As tecnologias advindas da difusão da inovação ambiental garantem o melhor fluxo e aplicação do modelo circular, de forma a reduzir as externalidades negativas (JESUS et al., 2019). A economia circular é aplicável em indústrias de grande porte e altamente poluidoras como uma forma de transformação destas atividades relacionada a indústrias de tecnologia, serviços, energias alternativas, entre outros (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Nesta perspectiva, a indústria de mineração por meio dos três princípios da economia circular, pode preservar o capital natural, reaproveitar recursos em cascata, além de reduzir os impactos negativos ao ecossistema (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

O ambiente institucional pode servir como obstáculos ou como incentivador da difusão e adoção de iniciativas ambientais, ou seja, os pilares deste sistema podem legitimar a transição para uma economia circular (RANTA et al., 2018). Logo, como a economia circular enfrenta barreiras advindas de fatores institucionais e técnicos (JESUS; MENDONÇA, 2018), as iniciativas de inovações ambientais que auxiliam esta circularidade também estão sujeitas a obstáculos que dificultam este a difusão e aplicação deste modelo. Logo, identificar e entender as barreiras que a difusão e adoção de iniciativas e inovações ambientais tecnológicas –

ferramentas de auxílio da economia circular – desafiam, permite entender como a circularidade pode ser melhor difundida e aplicada na dinâmica setorial do minério de ferro.

1.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A presente pesquisa está estruturada em seis capítulos, sendo este primeiro a introdução, em que se apresenta a contextualização do tema, a justificativa, a questão de pesquisa, além dos objetivos geral e específicos do trabalho.

O segundo capítulo trata o referencial teórico que aborda a estrutura da economia circular, inovações ambientais e os tipos de inovações ambientais tecnológicas utilizadas nos processos da indústria de mineração para mitigar e remediar os impactos ambientais.

O terceiro capítulo apresenta o método de pesquisa, por meio da estrutura: abordagem metodológica, instrumentos de coleta de dados utilizados e forma e tratamento de análise dos dados coletados.

O quarto capítulo discorre sobre os resultados do estudo obtidos na pesquisa de campo, organizados e apresentados pelos três princípios da economia circular: preservação do capital natural, cascateamento e gerenciamento das externalidades.

O quinto capítulo mostra a análise e discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior, a análise foi baseada no modelo de análise apresentado no segundo capítulo.

O sexto e último capítulo trata das considerações finais dos principais resultados da pesquisa, as recomendações para futuras e as principais contribuições do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A primeira subseção deste capítulo discorre sobre os aspectos conceituais da economia circular, sua origem e a definição do termo, os fluxos de materiais e os modelos teóricos e aplicados. Na segunda subseção, destaca-se pontos conceituais do tema de inovação ambiental, com foco na teoria da difusão da inovação, para assim obter a compreensão de como o tema pode influenciar o modelo de economia circular. A terceira subseção, apresenta os principais processos da cadeia de suprimentos da indústria de mineração, particularmente os processos que estão incluídos no modelo de análise da economia circular.

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

Este capítulo discorre sobre a definição do conceito, a apresentação dos princípios e a estrutura do modelo da economia circular, as principais barreiras e drivers na implementação do modelo.

2.1.1 O modelo da economia circular

Economia circular é um modelo de sistema industrial regenerativo por design, desde a concepção do produto à substituição do conceito de 'fim de vida' de um produto por meio da restauração e reutilização (EMF, 2012). A economia circular oferece um modelo econômico regulado pelas leis da natureza, ou seja, o consumo do sistema deve estar dentro da capacidade de reposição do ecossistema, por meio do reaproveitamento de fluxos de materiais e energias (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Um dos objetivos da economia circular é reparar os danos causados à biosfera além de manter uma abordagem preventiva, isto é, com a redução da poluição, o fechamento de ciclos e a reflexão da forma de design, são pontos que justificam o motivo da economia circular ser descrita como regenerativa e restaurativa (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

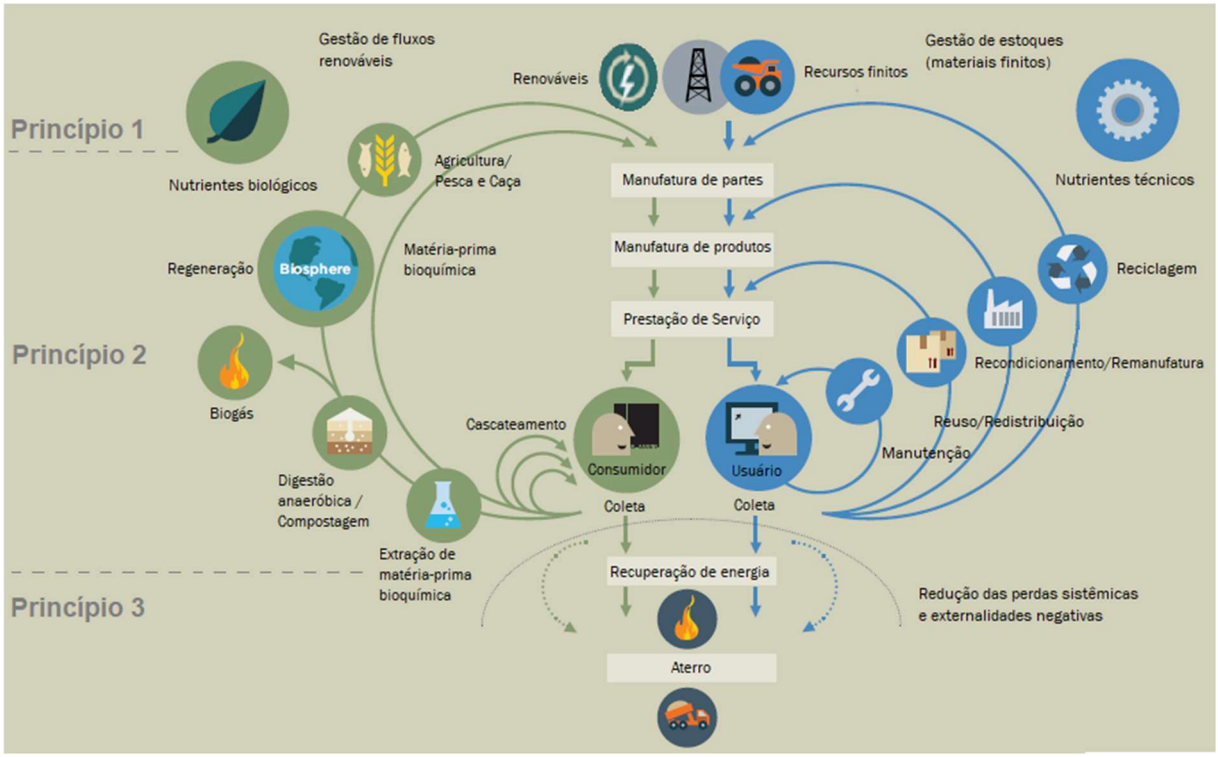
As características principais que descrevem a economia circular são: i) a necessidade de planejar os resíduos, desde seu ponto inicial até o pós-consumo, eliminando os resíduos e otimizando os ciclos de remanufatura e reutilização; ii) a diversidade para trazer resiliência ao processo, uma vez que a versatilidade, adaptabilidade e modularidade auxiliam no melhor equilíbrio das escalas de negócio; iii) a utilização de energias renováveis para abastecimento dos ciclos, para agregar mais resiliência ao sistema por meio da diminuição do uso de recursos

não renováveis e preservação do capital natural; iv) o pensamento sistêmico, considerando todas as partes interessadas que estão fortemente relacionadas; e v) a transparência na divulgação das externalidades negativas para refletir o custo total no preço do produto (EMF, 2012; EMF, 2015).

A economia circular é um modelo de sistema regenerativo de produção e consumo que regula as taxas de entrada e saída do modelo para que se mantenham dentro dos limites de regeneração e absorção do ecossistema, por meio do fechamento do sistema e conservando o valor do recursos pelo maior tempo possível no sistema, por meio de estratégias de design e educação (SUÁREZ-EIROA et al., 2019).

Os princípios reguladores da economia circular auxiliam na manutenção dos ciclos do sistema, além de evitar perdas desnecessárias (EMF, 2014), alinhando-se as características principais da economia circular e auxiliando na manutenção da circularidade de outros objetivos do modelo de negócio circular, como pode ser observado na Figura 1. É importante salientar que os princípios atuam como norteadores de ação (EMF, 2015), para implementação e transição do modelo linear para o circular.

Figura 1 - Síntese dos princípios do modelo de economia circular



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em EMF, 2012 e EMF, 2015

O primeiro princípio visa a preservação e desenvolvimento do capital natural, por meio da gestão de estoques finitos e de fluxo de recursos renováveis, incentivando a regeneração do sistema através dos fluxos de nutrientes dentro do sistema. Deve-se selecionar os recursos que melhor atendem ao projeto, assim como o processo e tecnologia mais eficaz, sendo possível criar a recirculação de materiais posteriormente pelo sistema (EMF, 2015).

O segundo princípio visa otimizar o rendimento dos ciclos da economia circular, tanto o biológico como o técnico, pois a contribuição para a economia advém da circularidade dos materiais e recursos. O ideal é preservar a energia e valor dos materiais na utilização dos ciclos mais próximos, estendendo a vida útil do produto maximizando o número de ciclos e o tempo gasto em cada um (EMF, 2015).

O terceiro princípio visa o gerenciamento das externalidades negativas do sistema, promovendo a eficácia do sistema, englobando a redução de danos a ecossistemas, a sociedade, mitigando a poluição, melhorando o uso da terra, a poluição do ar, da água e da gestão de resíduos (EMF, 2015).

2.1.1.1 Princípio 1: Gestão de fluxos renováveis e materiais finitos

As taxas de extração dos fluxos do sistema devem estar dentro do limite regenerativo do ecossistema, para fluxos renováveis, já para os recursos limitados, o consumo deve ser reduzido e de preferência sua taxa de exploração deve ser menor que a taxa da criação de recursos renováveis substitutos. Os recursos não renováveis necessitam de capital humano em sua transformação para reincorporar o sistema econômico (SUÁREZ-EIROA et al., 2019), sendo estes um dos fatos que reforça a importância de redução e se possível extinção do uso de recursos não-renováveis no sistema.

É na fase do *design* que os resíduos são evitados, pois é o design que estabelece 80% dos impactos ambientais durante o ciclo de vida do produto (VELENTURF et al., 2019), sendo necessário priorizar aspectos de forma a considerar os materiais, a forma de utilização, o processo, quais energias utilizadas e como será feito após o uso deste produto. A escolha de um material que possa ter seus nutrientes naturais novamente assimilado ao ecossistema, ou em último caso que seja facilmente reciclado, é essencial, pois auxiliará na construção de produtos duradouros para mitigar o uso de novos recursos para produção, evitando impactos negativos ao ecossistema e seu colapso devido a retirada excessiva de capital natural (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

A economia circular é vista como uma forma de mitigar a geração de resíduos e desacoplar o crescimento econômico do uso de recursos naturais, por meio do fechamento dos ciclos, o *design* consciente dos produtos visando a extensão da sua vida útil e preservação do capital natural para a maximização do ecossistema (MORAGA et al., 2019). Em complemento, a economia circular apresenta-se como uma alternativa para a recuperação de materiais visando o retorno ao sistemas de produção por meio do *design* - planejar os resíduos futuros dos produtos e a poluição dos processos (TAM; SOULLIERE; SAWYER-BEAULIEU, 2019).

A economia circular cria um equilíbrio para otimizar o nível de ciclos fechados necessários para o sistema, de forma a gerar a mínima extração de recursos virgens, mitigando o desperdício e otimizando a utilização de fontes de energias renováveis, uma vez que a utilização de combustíveis fósseis interrompe a capacidade de fechamento de ciclos, gerando a necessidade de alto volume de extração de materiais para geração de energia (MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019).

Desta forma, o gerenciamento de energia e água do sistema é realizado por meio do fechamento do fluxo de recursos renováveis de tal forma a eliminar as perdas no transporte de energia, reaproveitar e reciclar a energia (GITELMAN et al., 2019). A gestão de recursos renováveis energéticos deve-se a ameaça da garantia de segurança energética, ou seja, falha no fornecimento ininterrupto de recursos energéticos - tradicionalmente combustíveis fósseis - a um preço acessível, fez com que as indústrias investissem em avanços tecnológicos e equipamentos de produção de forma a aumentar o abastecimento de energia, que atendessem as demandas de produtividade e que reduzissem o impacto negativo ao meio ambiente (PROSKURYAKOVA; ERMOLENKO, 2019).

A dinâmica do uso da terra e do clima é delicada, a redução na biodiversidade causada pela mudança do uso do solo, por meio de desmatamentos e retirada excessiva de nutrientes, resulta em impactos sobre o fluxo de água e no ciclo de elementos bioquímicos importantes para a biosfera (EMF, 2017a), dado isso, é importante ressaltar a importância do gerenciamento de recursos naturais – matérias-primas e energias - a fim de manter o equilíbrio do ecossistema.

A crescente demanda de produtos que utilizam matérias-primas biológicas gera o desequilíbrio de nutrientes da biosfera, principalmente do solo, se deve pela retirada excessiva de biomassa e o não retorno destes nutrientes ao solo, o que gera a necessidade de cada vez mais fertilizantes sintéticos, sendo que esta perda de capital natural amplifica as externalidades negativas ao biociclo atual (EMF, 2017a).

2.1.1.2 Princípio 2: Ciclos biológicos e técnicos

O realinhamento das práticas atuais em dois ciclos, biológicos e técnicos, é importante para a economia circular, pois são estes ciclos que permitem reaproveitar os materiais e retroalimentar todo o sistema, a fim de evitar uso de novos recursos e de equalizar as demandas do ecossistema natural. É por meio deste conjunto de fluxos de materiais e energia que a economia circular reduz o consumo de insumos virgens como *inputs* para o sistema e diminui principalmente a saída de resíduos e emissões do sistema, por meio da projeção dos resíduos pós-consumo dos produtos e processos (KORHONEN et al., 2018).

A circularidade do sistema é mantida por meio de dois fluxos principais, biológico e técnico, o primeiro ciclo possui os nutrientes que podem ser retornados ao ecossistema, o segundo ciclo reaproveita os nutrientes técnicos pela reutilização (EMF, 2012). A criação de valor se dá por meio da aplicação do conjunto de fluxos, concentrando-se na busca por conservar o valor para os mesmos fluxos de materiais ou para o próximo fluxo (EMF, 2013), de forma a valorizar ciclos curtos e locais. A questão do fluxo deve ser central para os ciclos, pois as soluções locais e de fácil adaptação possuem menor impacto ambiental do que soluções globais e complexas (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

2.1.1.2.1 Ciclo biológico

O fluxo de materiais biológicos, ou biogeoquímico, foi afetado pelas atividades da economia linear, um dos principais objetivos da economia circular é restaurar o equilíbrio deste fluxo (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), de forma a retornar os nutrientes para o ecossistema e assim evitar o uso excessivo de novos recursos, equilibrando a extração com conservação. O ciclo de nutrientes biológico possui um fluxo de materiais renováveis, que podem ser devolvidos ao ecossistema natural sem causar efeitos negativos, sendo regenerados pelo sistema (EMF, 2015).

Os ciclos biogeoquímicos são inspirados na natureza, curtos ou longos, e é importante o volume do fluxo que se desloca nestes ciclos e o tempo de duração desta circularidade, de forma que estarão mais suscetíveis a mudança (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017). O extravio de valor do ciclo biológico ocorre quando se perde a oportunidades para maximizar o período de uso dos nutrientes em cascata e quando ocorre a contaminação dos nutrientes impossibilitando seu retorno à biosfera (EMF, 2014).

O fechamento do ciclo de nutrientes biológicos é a aplicação de resíduos que seriam descartados havendo a perda de seu valor em insumos para a agricultura regenerativa, de forma a restaurar e fortalecer o capital natural por meio da devolução destes materiais ao ecossistema (EMF, 2017b). Como por exemplo, a utilização de componentes naturais por empresas para a criação de embalagens que possam ser insumos para o processo de compostagem, ou seja, por meio do descarte correto são devolvidas ao ambiente natural, no caso de uma empresa que utilizam mandiocas para fazer embalagens para seus produtos alimentícios (EMF, 2017c).

O biociclo é a conversão de recursos biológicos renováveis, utilizados como cascata de nutrientes no sistema, em valor agregado para a biosfera, por meio de produtos de base biológica, bioenergia e insumo para outros processos produtivos (EMF, 2017a). Como modelo ilustrativo do ciclo biológico, a indústria florestal nacional da Finlândia produz emissões de CO2, porém estas emissões são compensadas pelas florestas que agem como um sumidouro de carbono, em que as cinzas da combustão advinda de biomassa para esta indústria é utilizada como fertilizantes para as florestas que neutralizam este CO2 criado (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

2.1.1.2.2 Ciclo técnico

O foco do ciclo técnico é prolongar a vida útil do produto por meio de uma hierarquização das estratégias circulares, desta forma, transforma-se recursos úteis que seriam descartados em matéria-prima para outros sistemas de produção (SEHNEM et al., 2019). No ciclo técnico se substitui o consumo, pois é neste fluxo que se compreende o gerenciamento de materiais finitos e que não podem ser retornados como nutrientes à biosfera (EMF, 2015). Sendo que a economia circular incentiva a troca do conceito de consumidor para usuário em relação aos produtos deste ciclo com a intenção de criar uma relação nova entre clientes e empresas (EMF, 2012), propiciando a mentalidade para a ampliação da duração dos ciclos destes nutrientes técnicos.

O ciclo técnico da economia circular está relacionado aos 3Rs - redução, reutilização e reciclagem - como conceito central, devido ao aumento da durabilidade do produto, reduzindo a taxa de recursos, além de utilizar resíduos como recursos para outros processos. Os princípios dos 3Rs podem ser integrados pelos três princípios da economia circular desenvolvidos no relatório da Fundação *Ellen MacArthur* (2012), esta relação entre estes dois conceitos aparece com frequência na literatura, apesar da Fundação não citar esta escola de pensamento como base da economia circular (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

A etapa de reciclagem possui diversos problemas e falhas, como por exemplo, a identificação do tipo de material utilizado no produto, a separação destes materiais, evitar a contaminação cruzada advinda desta mistura de materiais, transporte e distribuição para o mercado - logística e logística reversa, sendo pontos importantes para serem avaliados durante os *trade-offs* - consideração entre a complexidade e a funcionalidade do produto - no *design* do produto e processo (TAM; SOULLIERE; SAWYER-BEAULIEU, 2019).

O modelo de economia circular pode ser caracterizado para o ciclo técnico pela hierarquização dos Rs, sendo um princípio operacional essencial para a manutenção do ciclo, havendo a diferenciação entre os ciclos curtos - recusa, redução, reutilização e reparo, médios - recondicionamento, remanufatura e reaproveitamento, e não menos importante, ciclos longos - reciclagem, recuperação de energia e *re-mine*, ressaltando que os ciclos longos são os mais vistos em diretrizes políticas, apesar de constituir a forma mais baixa de retenção de valor de materiais (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018).

Considerando a importância do fluxo dos ciclos, é essencial ponderar sobre o equilíbrio entre durabilidade do *design* e a eficiência ecológica, pois para o produto ser durável requer complexidade de materiais e química que pode deixar sua desmontagem e reciclagem mais cara e trabalhosa – gerando impactos ao meio ambiente (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), desta forma o planejamento dos ciclos é essencial para o equilíbrio do modelo de economia circular. O planejamento auxilia na manutenção do ciclo e evita extravios, que ocorrem quando há perda de materiais, mão de obra e energia, sem preservar seu valor por meio da renovação do material nos ciclos de remanufatura, reutilização, reciclagem, entre outros (EMF, 2014).

2.1.1.3 Princípio 3: Gerenciamento das externalidades

O terceiro princípio do modelo de economia circular trata das externalidades geradas pelo sistema. A externalidade é um efeito significativo resultante de uma atividade cuja consequências impactam agentes não produtores destas atividades, podem ser negativas ou positivas, sendo a primeira quando ocorre prejuízos aos agentes externos e positiva quando resulta em benefícios (KANDA et al., 2019).

Seu principal objetivo é a geração da eficácia do sistema, identificando e projetando as possíveis externalidades negativas advindas do sistema, além de exaltar as oportunidades que criam as externalidades positivas, de forma a divulgar e transparecer as externalidades através da precificação de produtos e serviços (EMF, 2015). Uma vez que as externalidades serão transmitidas para o preço final do produto, resultado da transparência advinda deste princípio,

ocorrerá a maior valorização de iniciativas de impacto ambiental positivo. Logo, os custos de produção e dos produtos será equalizado e, consequentemente, aumentará a aceitação do modelo de economia circular e de inovações ambientais.

A economia circular suplanta as externalidades não resolvidas do paradigma da economia linear (JESUS et al., 2019), oferecendo maior valor ao sistema total, através do cascateamento, mantendo o material por mais tempo dentro do sistema, logo, reaproveitando o seu valor ao invés de perder valor com técnicas como reciclagem (KORHONEN et al., 2018), incineração ou descarte em aterros. Os ciclos internos demandam menor energia e recursos, ou seja, sendo bem mais econômicos que os ciclos externos, desta forma é importante maximizar o tempo que o recurso percorre dentro dos ciclos internos (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Uma forma de internalizar as externalidades geradas pelos processos manufatureiros, é a utilização de combinações de políticas para a transição de modelos de economia, por meio de instrumentos de comando e controle e incentivo de mercado, como forma de estimular e conscientizar a respeito do melhor modelo de utilização e conservação do capital natural (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Quanto maior o tempo que um produto se mantiver em um ciclo ou estado, maior será o potencial de economia em relação as ações aplicadas no material e menor será as externalidades associadas a ele, como emissões de gases de efeito estuda, gasto de água, toxicidade, entre outros (EMF, 2012). Por este motivo, é necessário entender que a reciclagem, a disposição em aterros e a incineração são as últimas opções do sistema de ciclos, sendo recomendado que estas medidas sejam evitadas, conforme observado na Figura 1.

Quadro 1 – Síntese dos princípios do modelo de economia circular

Categoria	Subcategoria	Definição	Autores
Princípio 1	Design	Planejar o produto escolhendo os materiais mais adequados e os processos mais eficazes, de modo a manter pelo maior tempo possível o valor e a utilidade do produto para o sistema. A principal fase do planejamento dos resíduos futuros.	EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; JESUS et al., 2019; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; VELENTURF et al., 2019; TAM; SOULLIERE; SAWYER-BEAULIEU, 2019; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; MORAGA et al., 2019
	Equilíbrio e conservação do capital natural	Estimular a regeneração do sistema por meio dos fluxos de nutrientes retornáveis ao sistema, sendo necessário o equilíbrio entre as taxas de extração do capital natural e a taxa de regeneração. Além da utilização de recursos renováveis – energias e materiais.	EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2018; KORHONEN et al., 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; JESUS et al., 2019; TAM; SOULLIERE; SAWYER-BEAULIEU, 2019; MORAGA et al., 2019
	Gestão de materiais finitos	Planejar e equilibrar o fluxo de materiais finitos, de forma a utilização apenas quando necessário, sendo importante a sua comunicação com o ciclo técnico e o reaproveitamento dos materiais ao longo do sistema.	EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2018
Princípio 2: Ciclo Biológico	Reincorporação dos nutrientes na biosfera	Promover a reintegração dos resíduos de nutrientes biológicos ao ecossistema, de uma maneira segura, a fim de reaproveitá-los como matéria-prima regenerada.	EMF, 2014; EMF, 2015; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; KORHONEN et al., 2018
	Cascateamento biológico	Projeção dos produtos com a finalidade de serem consumidos ou metabolizados pelo sistema de todas as formas, a fim de gerar novos valores de recursos, aproveitando a oportunidade de extrair valor adicional de produtos que seriam descartados.	EMF, 2014; EMF, 2013; EMF, 2015
Princípio 2: Ciclo Técnico	Maximização do valor do produto	Projetar o número de ciclos consecutivos do material, prolongando a sua vida útil e otimizando sua reutilização no sistema, de forma a maximizar o seu valor no sistema.	EMF, 2012; EMF, 2015; KORHONEN et al., 2018
	Cascateamento Hierárquico	O uso de ciclos internos seguindo uma ordem de priorização de processos, do ciclo mais apertado sempre que possível, ou seja, mais próximo ao processo original, pois resulta na preservação de mais energia incorporada e mantém o valor do produto. Desta forma prefere-se o uso da manutenção ao invés da reciclagem, pois a utilização de energia neste novo processo é mínima, o produto retorna ao fluxo principal sem perder qualidade e valor, propriedades que se alteram no processo de reciclagem.	EMF, 2013; EMF, 2015; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; SEHNEMA et al., 2019; MORAGA et al., 2019
Princípio 3	Gerenciamento das externalidades positivas	Identificar e projetar as oportunidades de benefício decorrentes do processo à terceiros que não estejam envolvidos na atividade, por meio da promoção da eficácia do sistema de produção.	EMF, 2015; KANDA et al., 2019
	Gerenciamento das externalidades negativas	Identificar e projetar os prejuízos decorrentes do processo à terceiros que não estejam envolvidos na atividade, por meio da promoção da eficácia do sistema de produção de forma a mitigar estas externalidades negativas.	EMF, 2012; EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KANDA et al., 2019

Fonte: Autora

O modelo de economia circular é baseado em sistemas vivos, dinâmicos e adaptáveis, que modelam a reação de desperdício e recursos, oferecendo assim uma descrição de como o

sistema deve funcionar, na forma de um guia para a criação de valor (EMF, 2013), por meio do gerenciamento de recursos renováveis e finitos, a divisão do sistema em dois ciclos - técnico e biológico, para assim administrar e mitigar as externalidades decorrente do sistema.

É importante ressaltar que principal foco da economia circular é todo o sistema e não somente componentes, a fim de maximizar o funcionamento do ecossistema e o bem-estar da sociedade (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017). A economia circular é uma mudança sistêmica aplicada ao longo de toda a cadeia de valor do produto, incluindo o processo, resultando em uma melhor interação da economia e o meio ambiente, melhorando o modelo econômico atual (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Entende-se a mudança sistêmica como um comprometimento do produtor ao consumidor, esta difusão de responsabilidades abrangem a rede de produção inteira (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), criando diversas redes de cooperação envolvendo todo o sistema.

A sincronização dos recursos naturais para o equilíbrio dos fluxos de recursos para sua otimização (SEHNEM et al., 2019) é o principal objetivo dos ciclos na economia circular, sendo um dos principais desafios na implementação do modelo. Os estudos sobre economia circular na literatura apresentam duas vertentes, sendo elas: i) um sistema de implementação em níveis diferentes, como regional, local, nacional e global; e ii) a implementação na perspectiva de setores, produtos e materiais (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018). Para que ocorra uma mudança sistemática completa, é necessário que a pesquisa sobre a economia circular seja tratada em todos os níveis de estudo, do individual ao global (KORHONEN et al., 2018).

Estes três níveis de aplicação – micro, meso e macro (SUÁREZ-EIROA et al., 2019), explicam a forma de mudança sistêmica que a economia circular pode proporcionar (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Deste modo, para entender os fatores que impactam a implementação da economia circular, como modelo de negócio, se faz necessário compreender os diferentes níveis de aplicação e quais suas principais atividades (STEWART; NIERO, 2018), de forma a compreender como influenciam durante a execução do modelo de economia circular.

O Quadro 2 apresenta a definição de cada nível e seus principais autores.

Quadro 2 - Definição dos níveis de implantação do modelo de Economia Circular

Nível	Definição	Autores
Micro	É implementado em nível organizacional, por meio do incentivo de projetos ecológicos e práticas internas. Baseado em princípios dos 3R's, *ecodesign*, minimização de resíduos e produção mais limpa. Com foco, pincipalmente, nos dois primeiros.	GENG; DOBERSTEIN, 2008; MATHEWS; TAN, 2011; YONG, 2007; GENG et al., 2012; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; MORAGA et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018
Meso	Aplicado ao nível de *clusters* industriais, ou seja, criação de rede eco-industrial entre os componentes do cluster, por meio da construção de infraestruturas compartilhadas, para fluxo de recursos - energia, gás e água, ocasionando benefícios ambientais mútuos para todos os agentes envolvidos no sistema de rede.	MATHEWS; TAN, 2011; YONG, 2007; GENG et al., 2012; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; MORAGA et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018
Macro	Aplicado ao nível regional, nacional e global, promovendo as eco-cidades. Por meio de incentivos econômico e administrativo voltados a criação de uma sociedade orientada para a conservação, com incentivo a práticas de agricultura ecológica, fomento de campanhas orientadas para o consumo ambientalmente consciente e criação de comunidades verdes.	MATHEWS; TAN, 2011; GENG; DOBERSTEIN, 2008; YONG, 2007; GENG et al., 2012; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; MORAGA et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018

Fonte: Autora

A economia circular ocasiona mudanças fundamentais em diversos níveis (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017), sendo que cada um destes níveis abarca uma escala principal, como por exemplo: i) no nível micro, o enfoque é um conjunto de atividades de nível corporativo, sendo a produção mais limpa sua principal atividade significativa reconhecida na literatura (GENG; DOBERSTEIN, 2008); ii) no nível meso, o aspecto é considerar a cadeia de valor do produto, considerando todos os agentes econômicos envolvidos (MATHEWS; TAN, 2011; ORMAZABAL et al., 2018), tendo como principal atividade a simbiose industrial (MORAGA et al., 2019) para compartilhar recursos entre os membros dos clusters (MATHEWS; TAN, 2011); e iii) no nível macro, com perspectiva regional e global, tem em vista as eco-cidades (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), com a cultura do reaproveitamento e reciclagem, agricultura e consumo ecológico (YONG, 2007).

A aplicação em níveis do modelo de economia circular, abrangem duas principais áreas, produção e consumo que objetivam a circulação dos materiais e recursos pelo sistema (YONG, 2007). As regulamentações e incentivos institucionais podem influenciar e promover a aplicação do modelo de economia circular pelos três níveis considerando a abordagem das duas principais áreas, considerando a estratégia escolhida (GENG et al., 2012).

2.1.2 Modelos complementares da economia circular

Há modelos que complementam o modelo de economia circular da fundação *Ellen MacArthur*, que originam-se dos objetivos da economia circular. Um desses modelos apresenta sete princípios operacionais e é dividido em três categorias: i) operacional-alvo, representa os objetivos da economia circular; ii) operacional fundamental, representa a essência da economia circular, sendo cruciais para a execução do modelo; e iii) operacionais transversal, auxilia para a melhor execução do modelo (SUÁREZ-EIROA et al., 2019).

Sendo a categoria operacional-alvo dividida em dois princípios: regulação das taxas de entradas e taxas de saídas do modelo de economia circular, de forma a gerir os recursos renováveis para atender as taxas de regeneração do ecossistema e os não renováveis para a mitigação e eliminação do uso deste materiais considerando as taxas de absorção do ecossistema (SUÁREZ-EIROA et al., 2019). Esta adaptação de taxas propostas pela categoria operacional-alvo combina-se com os princípios da economia circular proposto pela EMF (2012) de preservar o desenvolvimento do capital natural do ecossistema e na projeção de resíduos pós-consumo, que auxiliam tanto na retirada de insumos como na disposição de materiais pós-consumo.

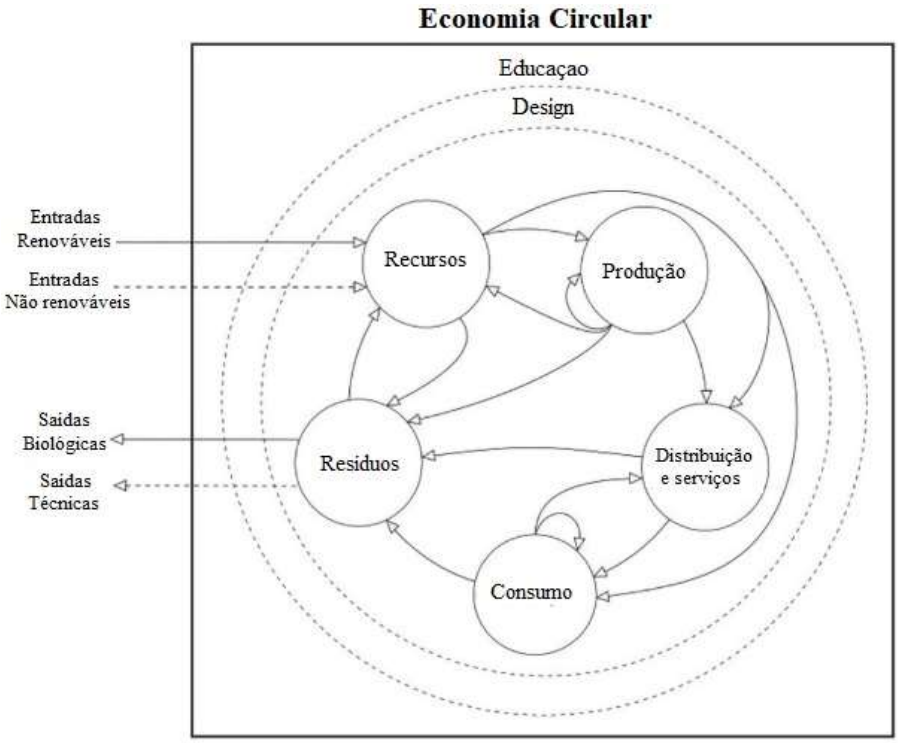
A categoria operacional fundamental foi dividida em três princípios, que demonstram a natureza do modelo de economia circular, sendo eles: i) o fechamento do sistema que significa a conexão da fase de gestão dos resíduos pós-consumo à fase de aquisição de insumos; ii) preservação do valor do recurso no sistema, por meio do cascateamento do recurso em diversos estágios da manufatura, tentando manter no ciclo mais próximo ou aprimorar a durabilidade do produto pelo usuário; iii) redução da quantidade de recursos que circulam no sistema, por meio da mudança da sociedade e extensão da responsabilidade compartilhada entre os *stakeholders*, ou seja, produzir e consumir produtos mais sustentáveis (SUÁREZ-EIROA et al., 2019).

Por fim, a categoria operacional-transversal dividiu-se em dois princípios importantes que ajudam a promover o sucesso do modelo, sendo eles: i) design, que está presente em diversas fases do modelo de economia circular, desde a projeção de produtos sustentável, como insumo do modelo, de forma que utilize materiais não tóxicos e que possua modularidade para ser facilmente recuperável em outros ciclos de processos, impactando em uma melhor forma de destinação pós-consumo; e ii) a educação como forma de mobilizar a mudança do paradigma na base estrutural social e econômica (SUÁREZ-EIROA et al., 2019).

A grande contribuição dos autores é a compreensão de princípios operacionais transversais que englobam e auxiliam no sucesso do modelo de economia circular como um

todo, conforme observado na Figura 2, além de simplificar e operacionalizar o modelo de economia circular para auxiliar na implementação em diversa escalas, pois o modelo da fundação *Ellen MacArthur* é macro, apresentando uma complexidade para a aplicação em outros níveis.

Figura 2 - Modelo de economia circular aplicando os princípios operacionais e princípios básicos



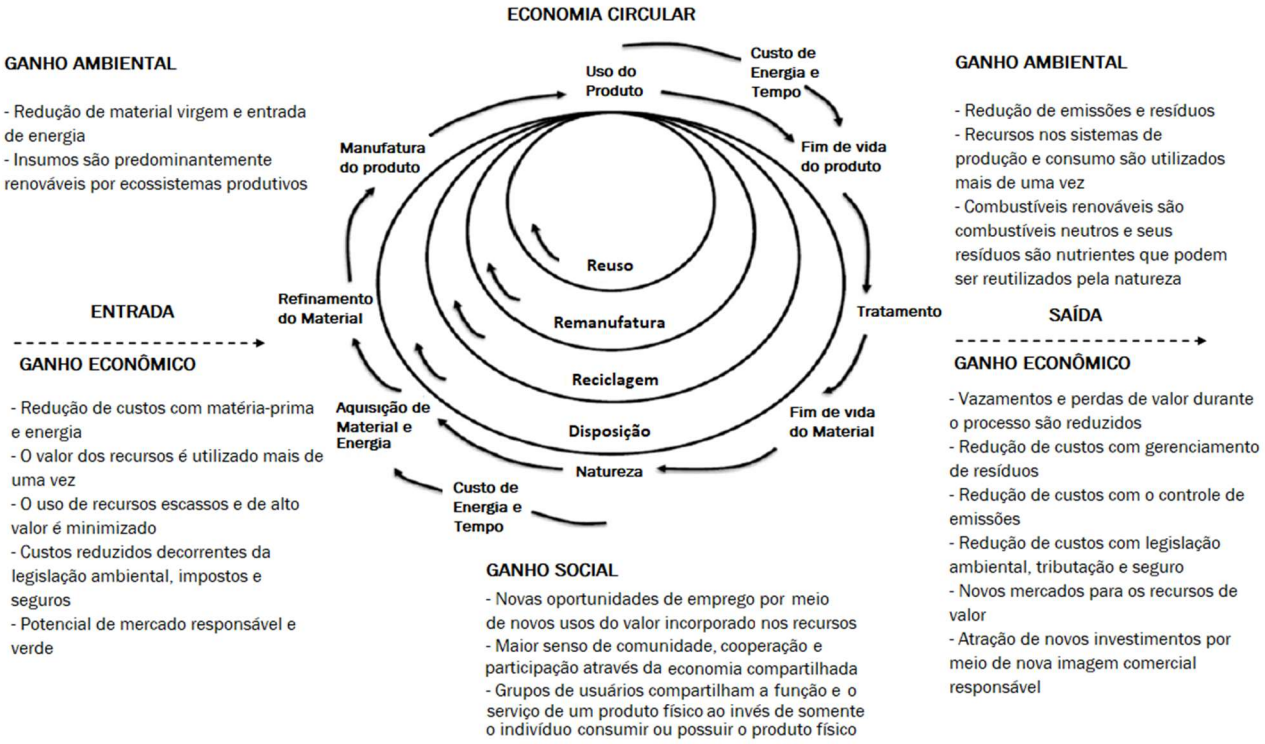
Fonte: Suárez-eiroa et al., 2019; p. 959

Para alguns autores o significado da economia circular está fundamentado nas três dimensões do desenvolvimento sustentável, sendo elas, i) objetivo ambiental, que visa a redução de insumos, matéria-prima e energia, na produção e consumo, e com a aplicação dos ciclos cascateados, mitigar a emissão de poluentes e resíduos; ii) objetivo econômico reduzir os custos com energia, matéria-prima, gestão de resíduos, controle de emissões, riscos ambientais (tributações e legislações) como inovar em novos mercados para a empresa; e iii) objetivo social, por meio da economia compartilhada, aumento dos empregos e utilização de cooperativas e comunidade de usuários como oposição ao indivíduo consumidor (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Desta forma, entende-se como uma implementação bem-sucedida o momento quando a economia circular contribui para os três pilares do desenvolvimento sustentável, utilizando a

flexibilidade dos ciclos da biosfera nos ciclos econômicos, considerando as taxas de regeneração do sistema. O fluxo começa a obter valor econômico quando o resíduo desperdiçado é compreendido como valor, ou seja, como um novo recurso (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018), isto é, entender o ganho de eficiência quando este material é incluído novamente no processo original ou em um novo processo.

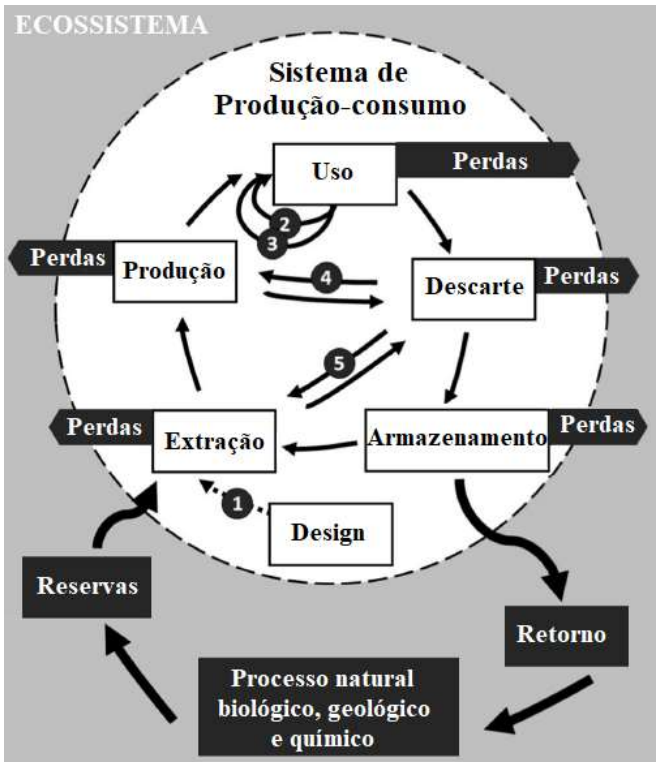
Figura 3 - O potencial ganha-ganha da economia circular baseado nas três dimensões do desenvolvimento sustentável



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018

De uma forma complementar ao diagrama existente da EMF, apresenta-se um novo diagrama com uma proposta com base em materiais integrados, orgânicos e inorgânicos, que fluem no ecossistema biofísico e o sistema de produção consumo, de uma forma a revisitar a relação com o meio ambiente e os limites da teoria. Os materiais industriais que não puderem ser reaproveitados em outros ciclos, devem ser devolvidos ao ecossistema, na forma de componentes para os processos naturais geológicos, químicos e biológicos, de forma a integrar os componentes envolvidos no sistema (VELENTURF et al., 2019), conforme pode-se observar na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama do fluxo de recursos integrado com o modelo de economia circular



Fonte: Velenturf et al., 2019; p. 965

Por fim, esta perspectiva integrada propicia espaços para o desenvolvimento e implementação de tecnologias e modelos de negócio que se mostrem eficazes para a economia circular, por meio de baixos insumos energéticos, maior eficiência e novos sistemas de recuperação dos componentes integrados com as cadeias de suprimentos circulares (VELENTURF et al., 2019).

2.1.3 Principais drivers para a implementação do modelo de economia circular

A determinação dos drivers para a implementação do modelo de economia circular permite um maior incentivo, resultando em uma melhor análise do contexto e otimização da implementação do modelo.

Os *drives* externos incentivam as empresas a implementar modelos de negócios orientados à economia circular, orientações muitas vezes advindas das leis e regulamentações diretas que criam demanda de novas soluções, como por exemplo uma lei que multa por emissão de CO2, faz com que as empresas busquem soluções que evitem a queima (TURA et al., 2019). A estrutura regulatória e a legislação específica orientam normativamente a cadeia de valor do produto como um todo, como por exemplo, a forma de regulamentação contra o uso de aterros

para descarte dos resíduos, de forma estimular a procura por diferentes métodos de gerenciamento de resíduos (RANTA et al., 2018).

As tendências regulatórias nos últimos anos, apresentam uma pressão para reduzir e precificar as externalidades negativas causadas pelas organizações e o modelo linear atual. Os elementos que contribuem para que esta pressão são: o alto crescimento exponencial, além das mudanças climáticas e extinção do capital natural e da biodiversidade (EMF, 2015). Apesar do modelo linear estar enraizado na forma de agir da sociedade e organizações, é possível identificar diretrizes governamentais utilizando como base o modelo de economia circular para orientação a longo prazo (BASSI; DIAS, 2019), por meio de pacotes econômicos, leis, regulamentações, entre outros.

As regulamentações e diretrizes legais motivam e apoiam a implementação da economia circular e de processos industriais circulares, sendo significativos para criação de um cenário ideal para atingimento das práticas deste tema, além de ressaltar a necessidade de evolução na parte legal (SEHNEM et al., 2019). Na aplicação deste conceito, os agentes públicos e políticos possuem uma grande influência, tanto positiva, por meio de infraestruturas legais, ou seja, fomento de pesquisas e consciência social, como relacionadas a dificuldades de aplicação, a fatores financeiro, disponibilidade de soluções técnicas (JESUS; MENDONÇA, 2018) e barreiras a conscientização social.

A rápida aceleração da demanda consumidora e consequentemente extrativista resultou em um crescimento exponencial do uso de recursos não renováveis, aumentando a exposição do sistema a riscos como interrupção de fornecimento e esgotamento dos recursos de capital natural, tronando-se fatores motivadores para a implantação da economia circular. Os riscos advindos da interrupção do fornecimento, como por exemplo, a volatilidade dos preços de matérias-primas e a provisão de recursos de energia renovável, impacta diretamente a indústria e sua cadeia de valor do produto como um todo, sendo necessário a criação de redes compartilhamentos – de produtos e conhecimentos – por todos os *stakeholders* da cadeia (EMF, 2015).

Para a criação de rede de compartilhamento é necessário como motivador da economia circular a criação de sistemas de informação compartilhados e melhorias nas tecnologias existentes, para assim criar oportunidades e abordagens de novos negócios circulares, com melhor rastreabilidade de materiais, uso de energias renováveis e o compartilhamento e colaboração dos envolvidos na cadeia de valor de forma mais eficiente (EMF, 2015).

A produção mais limpa e o desperdício zero são vistos como uma alternativa para atender a aceleração da economia e o aumento das demandas para novos produtos,

principalmente, para utilização mais eficaz dos recursos utilizados no processo e o reaproveitamento de materiais, evitando os impactos negativos ao meio ambiente. Logo a redução de custo e o desperdício zero são motivadores para a implementação de negócios circulares, motivando a criação de valor a partir de materiais que seriam descartados - resíduos, e a substituição de recursos renováveis em processos mais naturais (VELEVA; BODKIN, 2018). O Quadro 3 apresenta os principais drivers da economia circular.

Quadro 3 - Descrição dos principais drivers para o modelo de economia circular

Drivers	Autores
Resolução de problemas relacionados a restrição de recursos e volatilidade de preços das matérias-primas	EMF, 2015; TURA et al., 2019
Mitigação dos impactos ambientais ao meio ambiente	EMF, 2015; ORMAZABAL et al., 2018; TURA et al., 2019
Concordância com diretrizes estratégicas para regulamentações, tributação e políticas de subsídios	JESUS; MENDONÇA, 2018; RANTA et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2018; BASSI; DIAS, 2019; SEHNEM et al., 2019; TURA et al., 2019
Incentivo para novas tecnologias e soluções de rastreamento de informação	TURA et al., 2019; JESUS et al., 2019
Multidisciplinariedade e melhor integração dos *stakeholders* da cadeia de valor	TURA et al., 2019
Redução de Custos	JESUS; MENDONÇA, 2018; ORMAZABAL et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2018;
Desperdício zero	VELEVA; BODKIN, 2018
Criação de rede de ao longo da cadeia de suprimentos	JESUS et al., 2019; TURA et al., 2019

Fonte: Autora

O impulsionador institucional advindo de pressão regulatória (BASSI; DIAS, 2019; JESUS; MENDONÇA, 2018; RANTA et al., 2018; SEHNEM et al., 2019; TURA et al., 2019; VELEVA; BODKIN, 2018) é um *drive* externo a organização, que é acompanhado de outros dois drives externos, como por exemplo, redução de risco por disponibilidade de matéria prima (EMF, 2015; TURA et al., 2019) e mitigação de impactos ao meio ambiente e sociedade (EMF, 2015; ORMAZABAL et al., 2018; TURA et al., 2019). Entretanto, é possível identificar ainda *drivers* que impulsionam internamente a aplicação do modelo circular nas organizações, tais quais, a melhoria na integração dos *stakeholders* da cadeia de valor (TURA et al., 2019), criação de rede de compartilhamento da cadeia de suprimentos (JESUS et al., 2019; TURA et al., 2019) e desperdício zero (VELEVA; BODKIN, 2018).

Por fim, vale ressaltar que não há apenas uma única barreira ou um drive importante, a convergência de fatores é decorrente de contextos e de condições locais específicas (JESUS; MENDONÇA, 2018).

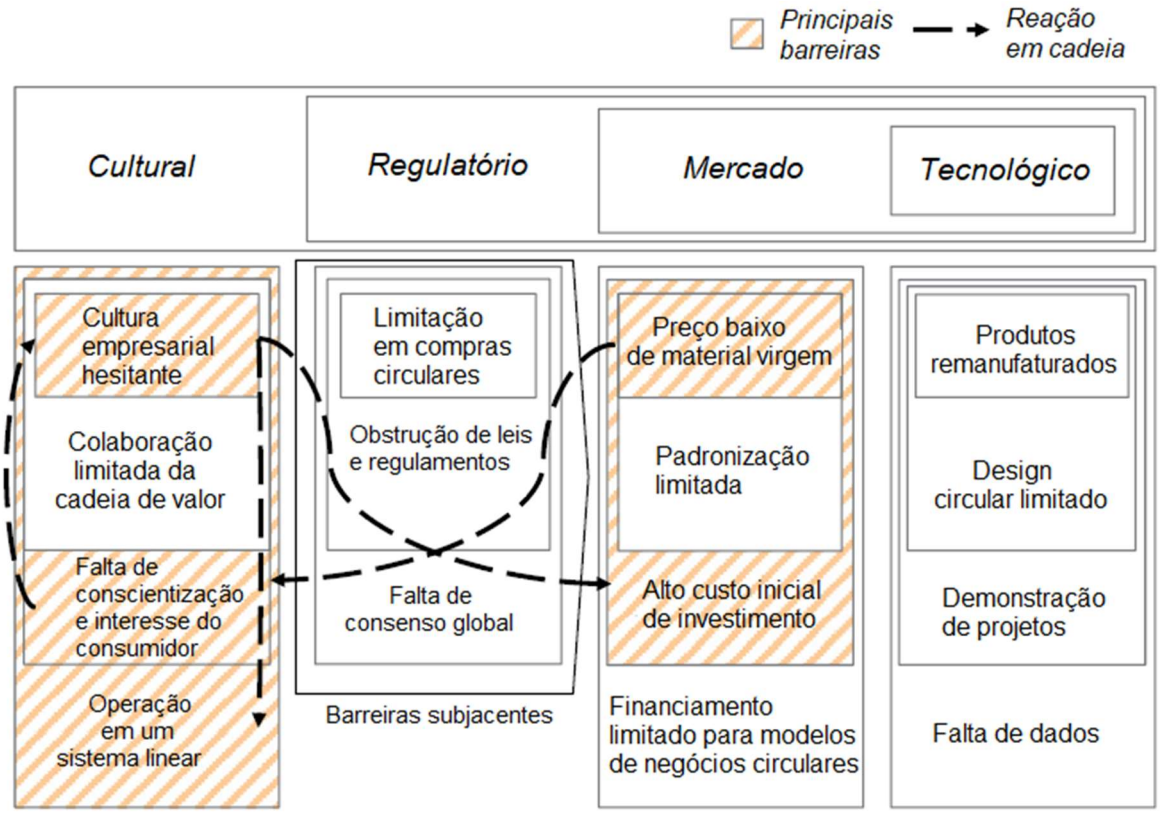
2.1.4 Limitações e barreiras para a implementação do modelo de economia circular

Algumas limitações e tensões na aplicação do modelo de economia circular nas práticas de negócios atuais, tais quais: i) confusão com a semântica, uma vez que já existiam a expressão economia circular e linear em outros contextos prévios, porém com significados diferentes; ii) a ausência de foco no âmbito social, os aspectos ambientais e sociais são perceptíveis através de seus princípios e características, porém o aspecto social é subjetivo e tem sido pouco explorado nas discussões acadêmicas; iii) efeitos negativos que algumas atividades podem gerar mesmo sendo consideradas ambientalmente conscientes; iv) metas simplistas demais confundem as visualização do contexto como um todo (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017). Desta forma, a importância de ponderar e avaliar quais as possibilidades de mudança e aplicações dos princípios da economia circular para os diferentes contextos.

A promoção de combinações avançadas e padronização de novas tecnologias é essencial para o avanço da economia circular, sendo necessária a aceitação em larga escala por diversos agentes industriais. Os autores propõem que a mudança de paradigma precisa ser realizada no ecossistema como um todo, não somente em um componente - organização. Aponta-se duas fases para esta transição, sendo elas: i) a avaliação do sistema, considerando as tendências circulares no ambiente externo, estudando as possíveis lacunas e ameaças, o modelo de negócio e os parceiros envolvidos no ecossistema, sendo esta fase responsável pela coleta de informações; e ii) transformação do ecossistema, por meio de três mecanismos, padronização das metas e legitimação, nutrição para compensar as incertezas e permitir a realização das metas, além do fomento para que todas as atividades sejam desenvolvidas pelos parceiros do ecossistema (PARIDA et al., 2019).

A implementação da economia circular é um grande desafio, principalmente por ser um processo de longo prazo, sendo assim, é importante a identificação das barreiras que dificultam esta transição de modelo de economia para tornar está transição mais eficiente (KIRCHHERR et al., 2018). As principais barreiras da economia circular estão relacionadas às questões culturais, de mercado, regulatórias e tecnológicas, com uma relação em cadeia entre elas, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Reação em cadeia e as principais barreiras a transição para o modelo de economia circular



Fonte: Kirchherr et al., 2018; p. 270

As duas principais barreiras de mercado podem ser decorrentes de intervenção governamental, pois o governo é uma peça chave para acelerar a transição da economia circular. Como observado na Figura 5, quando implementado um princípio da economia circular mais de uma categoria será afetada, por exemplo, a aplicação do fechamento do ciclo técnico irá afetar a categoria cultura, tanto organizacional como do consumidor - com a logística reversa, como também a categoria mercado, pois serão necessários investimentos de maquinários para separar e implementar estes materiais no processo outra vez. Desta forma, é possível identificar como as diferentes barreiras estão interconectadas, indo ao encontro do conceito de que o modelo de economia circular requer uma mudança sistêmica, para evitar as divergências de informações (KIRCHHERR et al., 2018).

A principal barreira é de âmbito institucional, principalmente, devido à falta de apoio de outras atividades além da reciclagem, dificultando a evolução da lógica da economia circular (RANTA et al., 2018) e resultando em impactos diferentes dependendo do ator da cadeia social, como por exemplo, um integrador e um produtor em relação ao fechamento do ciclo técnico.

A economia circular possui um aspecto transformador em direção a inovação, porém frequentemente encontra barreiras internas da organização sendo necessário a criação de novos modelos de negócios e a identificação dos fatores críticos do sucesso, além de incentivar a implementação e adoção do novo modelo circular (SEHNEM et al., 2019). Um ponto crítico para a criação de modelos de negócios circulares viáveis são as parcerias estratégicas por toda a cadeia (VELEVA; BODKIN, 2018), logo é importante identificar os obstáculos a fim de otimizar a criação dos modelos de negócio circulares.

Como barreiras que limitam a transição para um modelo de economia circular identificam-se a parte tecnológica - que precisa de maior evolução para alcançar o crescimento econômico sem impactar negativamente o ecossistema, a falta de coordenação governamental - transição de forma *top-down*, e baixos níveis de conscientização dos *stakeholders* da cadeia de valor - abordagem de transição *bottom-up* (MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019).

Desta forma, apresenta-se no Quadro 4 as principais barreiras e limitações relativas à aplicação do modelo de economia circular, dividido em quatro categorias proposta por Kirchherr et al. (2018).

Quadro 4 - Principais barreiras e limitações para aplicação do modelo de economia circular

Categorias	Barreiras	Autores
Cultural	Falta de consciência, interesse e percepção de sustentabilidade do consumidor no meio ambiente e produtos	JESUS et al., 2019; JESUS; MENDONÇA, 2018; KIRCHHERR et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; SEHNEMA et al., 2019; TURA et al., 2019; VELEVA; BODKIN, 2018
	Criação de uma cultural organizacional sustentável a fim de combater as dificuldades da mudança de comportamento, por meio de transparência dos resultados e maior comprometimentos dos líderes globais	KIRCHHERR et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; JESUS et al., 2019; SEHNEMA et al., 2019; TURA et al., 2019
	Engajamento das partes interessadas na cadeia	KIRCHHERR et al., 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2018; RANTA et al., 2018; SEHNEMA et al., 2019; TURA et al., 2019
	Paradigma do sistema linear	EMF, 2015; JESUS et al., 2019; KIRCHHERR et al., 2018; TURA et al., 2019
Regulatório	Deficiência e desalinhamento de incentivo de políticas públicas	JESUS; MENDONÇA, 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2018; ORMAZABAL et al., 2018; RANTA et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2018; TURA et al., 2019
	Obstrução devido a leis, regulamentos e tributações	KIRCHHERR et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2019
	Limitação às compras de produtos circulares	KIRCHHERR et al., 2018
	Falta de consciência global em regulamentações	KIRCHHERR et al., 2018
Mercado	Pressão advinda do mercado e concorrentes	SEHNEMA et al., 2019
	Informações assimétricas e deficiência de métricas	JESUS; MENDONÇA, 2018; TURA et al., 2019
	Altos custos iniciais de investimento	JESUS; MENDONÇA, 2018; KIRCHHERR et al., 2018; TURA et al., 2019

Continua...

Conclusão

	Financiamento e recursos financeiros limitado para projetos circulares	KIRCHHERR et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2018
	Falta de transparência em relação as externalidades	EMF, 2015
	Baixa precificação de materiais virgens	KIRCHHERR et al., 2018
Tecnológico	Escassez de projetos escaláveis	KIRCHHERR et al., 2018
	Inaptidão da capacidade de fornecer produtos de remanufatura de alta qualidade devido à falta de tecnologia inadequada	KIRCHHERR et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018
	Falta de tecnologia para aplicação de design circular	JESUS; MENDONÇA, 2018; KIRCHHERR et al., 2018
	Complexidade das assimetrias tecnológicas na cadeia produtiva e de suprimentos	SEHNEMA et al., 2019; VELEVA; BODKIN, 2018
	Falta de inovações tecnológicas adequadas à cadeia produtiva e de suprimentos	JESUS; MENDONÇA, 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2018; SEHNEMA et al., 2019; TURA et al., 2019
	Sistema inadequado de gerenciamento de informações, falta de dados, informações e métricas de impacto e efeitos	KIRCHHERR et al., 2018; ORMAZABAL et al., 2018; VELEVA; BODKIN, 2018; TURA et al., 2019

Fonte: Autora

A literatura teórica aponta a categoria tecnológica como o principal obstáculo, porém há pesquisa práticas com especialistas da área de economia circular que mostram que as principais barreiras estão distribuídas entre as categorias cultura e regulatória. Porém, não há um consenso entre as principais barreiras, havendo uma divergência entre teoria e estudos prático, sendo que a primeira aponta, principalmente, barreiras do tipo "*hard*" - tecnológicas e mercado, e no segundo apresenta-se uma mistura de barreiras "*hard*" e "*soft*" - cultural, tecnológica e mercado (JESUS et al., 2019).

Visto este contexto de mudança sistêmica que a economia circular acarreta ao paradigma do sistema técnico-econômico e para facilitar a sua operacionalização de modo a superar barreiras - político, econômicas, culturais, entre outros - que permeiam os paradigmas atuais, a utilização de ferramentas transformadoras é essencial. Pois, estas ferramentas auxiliam já que a economia circular é um conceito que exige amplas mudanças no mercado, nas políticas públicas, nas práticas sociais, além de inovações tecnológicas significativas (JESUS; MENDONÇA, 2018). A literatura indica que a inovação ambiental é fundamental para alcançar estratégias de transição e congruência de barreiras e desafios, como uma forma de direcionar a inovação do sistema para as práticas circulares (JESUS et al., 2019).

A inovação ambiental inclui diversos benefícios para as organizações, tais quais, soluções com ganhos ambientais, com processos e equipamentos menos poluentes. Além de que este tipo de inovação pode ser ter uma abordagem sistêmica, de forma a englobar diferentes atores - públicos e privados - e dimensões - design, processo, serviço, produto, gestão, entre

outros. Deste modo, observando a definição e conceitos apresentados da economia circular e a definição da inovação ambiental, percebe-se convergência entre eles, essencialmente em fornecer auxílio na proteção do meio-ambiente e tornar a empresa mais eficiente em termos de recursos e conexões (GENTE; PATTANARO, 2019). Portanto, a importância de aplicar a inovação em novos modelos de negócios e em soluções circulares, principalmente porque os tipos de inovações ambientais – tecnológica, processual, entre outras - possuem impactos diferentes no desenvolvimento do modelo de economia circular (JESUS et al., 2019), ou seja, é importante mesclar os diferentes tipos para obter mais eficiência em seus resultados.

Há pesquisa que aponta que a inclusão do pensamento circular junto ao discurso de inovação ambiental permite reformulações sistêmicas, ou seja, apresenta um pensamento sistêmico ao termo. Permitindo romper com a formulação fraca de sustentabilidade pois acrescenta a transformação do paradigma econômico de modo a contribuir com os desafios ambientais atuais. No discurso europeu, principalmente considerando um contexto de ecoeficácia, os termos de inovação ambiental sistêmica e economia circular são considerados sinônimos, integrados. A estratégia da agregação destes dois termos possibilita um papel proeminente para uma mudança profunda no sistema atual, alterando paradigmas existentes por meio da combinação do crescimento verde e da ecologia (COLOMBO; PANSERA; OWEN, 2019).

As similaridades entre economia circular e inovação ambiental são os níveis de aplicação, os *drivers* - relacionados ao mercado e as políticas, a forma sistêmica de englobar uma ampla gama de *stakeholders* - considerando setor público e privado, além de apresentar-se como multisetorial e intersetorial. Deste modo, este a inovação ambiental permite criar uma infraestrutura tecnológica, de competências e experiências, para implantação e estimulo a novos modelos de negócio circulares (GENTE; PATTANARO, 2019).

Deste modo, a inovação ambiental é considerada um grande fator auxiliador na transição de modelos e permite a execução das estratégias de ciclos utilizadas no modelo de economia circular, integrando diversas práticas (JESUS et al., 2019).

2.2 INOVAÇÃO AMBIENTAL TECNOLÓGICA APLICADA NO SETOR DE MINERAÇÃO

Este subcapítulo discorre sobre a difusão da inovação e a inovação ambiental tecnológica aplicada ao setor de mineração a fim de mitigar os impactos ambientais do setor.

2.2.1 Difusão da inovação

A difusão da inovação é essencial como forma de distribuição de novas ideias e soluções por uma estrutura social - sociedade - e esta muitas vezes relacionada com o "adotante", vantagem relativa, compatibilidade, complexidade, entre outros. A difusão explica o porquê e como uma ideia é espalhada pela sociedade, de modo a entender o que impulsiona a adoção de uma ideia ou tecnologia, por exemplo (VARGO; AKAKA; WIELAND, 2020). A difusão da inovação é um processo de distribuição da ideia e inovação, que engloba quatro pontos principais, sendo eles, a inovação em si, o canal de comunicação, o tempo de divulgação e o sistema social - público alvo, mostrando-se uma forma essencial de disseminação de novas ideias que acarreta um certo grau de incerteza para o membro social (ROGERS, 2002), apresentando-se como um processo de comunicação.

Porém, há visões e teorias - por exemplo ecossistema de serviços - que representam a difusão da inovação como uma peça de um conjunto de criações do próprio processo de inovação, refletindo a integração de novas ideias e soluções dentro de uma estrutura social - um ecossistema, ou seja, a institucionalização de novas soluções e mudanças institucionais. Logo, a difusão faz parte do processo de inovação - evolução do conhecimento útil, que acontece por meio de diversos ciclos e difusão e institucionalização, havendo a necessidade de feedbacks dentro deste sistema e sendo dependente de estruturas e arranjos institucionais dominantes para continuar as melhorias e inovações (VARGO; AKAKA; WIELAND, 2020).

Há uma diferença entre a difusão – vista como comunicação de uma ideia por um canal de comunicação específico – e adoção desta ideia – ato efetivo de decisão de implementação da inovação. Os determinantes da adoção da inovação são descritos como: i) a percepção da vantagem relativa, como o usuário compreende a inovação como melhor do que a ideia existente; ii) a percepção de compatibilidade, é como a inovação é percebida como coerente com os valores do usuário/organização; iii) o grau de complexidade; iv) o grau de experimentação; e v) visibilidade dos resultados. Observando estas características o ideal é que o membro do sistema social perceba muita vantagem relativa e de compatibilidade, e o menor grau possível de complexidade, conseguindo experimentar a inovação e perceber os possíveis resultados (ROGERS, 2002), de modo a comunicar e difundir esta ideia.

A difusão da inovação é um tema interdisciplinar, principalmente por receber influência de várias áreas de atuação (economia, *marketing*, sociologia e antropologia), com aspectos específicos da difusão em diferentes prismas, sendo o principal foco das pesquisas do tema a identificação dos fatores que influenciam a difusão de uma inovação (KARAKAYA;

HIDALGO; NUUR, 2014). O processo de difusão da inovação orientado a organizações pode estar sujeito a diferentes contextos (NAM; LEE; LEE, 2019). Além de existir uma diferença na difusão da inovação considerando seu tipo, ou seja, incremental e radical. Na forma que implicam mudanças no sistema, processos ou novos conhecimentos e métodos (BURRITT et al., 2019).

O governo é um fator importante no processo de difusão da inovação ambiental, uma vez que as regulamentações e estímulos - reduções ou cobranças de impostos – que determinam os efeitos no meio ambiente. Outro fator facilitador está relacionado ao mercado, principalmente a intensidade da concorrência, ou seja, que estimula a indústria e as organizações a trazer inovações (NAM; LEE; LEE, 2019) que já estão sendo utilizadas por concorrentes ou por indústrias de outro setor como uma forma de superar a ameaça de mercado.

Apesar da difusão da inovação tecnológica possuir agentes propulsores, a adoção de inovações tecnológicas é um desafio devido a sua complexidade e resultados de longo prazo. Dessa forma, é importante avaliar seus efeitos e como é assimilada pela organização, ou seja, dividir o processo em etapas se faz útil como uma maneira de lidar com as incertezas e entender sua complexidade na orientação estratégica da organização. Na divisão do processo de análise da inovação há uma sequência de processos: início – análise dos benefícios potenciais para o desempenho e negócios da organização; adoção - decisão sobre a utilização da análise de negócios; e assimilação – análise da utilização da tecnologia após a adoção; de modo a avaliar o sucesso da assimilação destas inovações tecnológicas (NAM; LEE; LEE, 2019).

Os gerentes de organizações tentem a orientar estrategicamente suas decisões de modo a abordar questões ambientais e sociais específicas, que são tratadas pela mídia, órgãos regulatórios, mercado, entre outros. A difusão funciona por meio do gerenciamento de riscos e na obtenção de experiências ao longo do tempo, de modo a construir uma curva de aprendizagem e de confiança, criando situações confiáveis e vantagens relativas ao novo sistema (BURRITT et al., 2019).

Como barreiras para a difusão da inovação destaca-se a pressão advinda do mercado, que em alguns casos não é benéfica para a organização, pois a empresa não possui tempo hábil para adquirir os conhecimentos e a as habilidades necessárias para assimilação da inovação (NAM; LEE; LEE, 2019). As restrições orçamentárias podem reduzir a introdução e a aplicação do escopo das inovações dentro das organizações, não sendo possível sobrepor os agentes externos motivadores da inovação (BURRITT et al., 2019), como por exemplo, regulatório ou de mercado.

A difusão da inovação pode ter duas direções, como a teoria da difusão espacial e a teoria da difusão hierárquica. A primeira está fundamentada na distância espacial, em que as inovações são disseminadas para regiões adjacentes ao acontecimento da inovação. A segunda teoria é fundamentada no tamanho da região. As regiões mais desenvolvidas possuem mais vantagem em nível tecnológico e social, atingindo uma maior disseminação. Tornando-se mais perceptível que a difusão da inovação primeiro segue um modelo hierárquico para logo após, como uma reação em cadeia, o modelo espacial (WANG et al., 2014b).

A maioria das organizações busca benefícios da inovação, por meio da reprodução de tecnologias já existentes, objetivando à redução de custos e a probabilidade de sucesso, dado que a tecnologia foi 'testada' anteriormente, evitando desgaste com investimentos e avaliações destas inovações. Este comportamento pode ser identificado, principalmente, na teoria da difusão hierárquica em que as regiões mais desenvolvidas difundem a inovação para as regiões secundárias - em desenvolvimento (WANG et al., 2014b).

O processo de decisão contém riscos associados às diversas ações tomadas ao longo do tempo, ou seja, é um processo que se baseia em lidar com as incertezas advindas das novidades da aplicação da inovação (ROGERS, 2003), sendo estas incertezas relacionadas a diferentes contextos, como por exemplo, de mercado, regulatórios ou tecnológicos. Desta forma, a inovação ambiental auxilia na internalização das diferentes externalidades advindas de diversos contextos de negócios, permitindo a geração de novos conhecimentos e agregando melhorias nas questões ambientais (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019).

2.2.2 Inovação ambiental

É possível identificar ao longo do desenvolvimento do conceito de inovação orientada à questão ambiental diversas terminologias, sendo elas, eco-inovação (GENTE; PATTANARO, 2019), inovação ambiental (BENDELL, 2017), inovação verde (ALBORT-MORANT et al., 2017). A utilização de diferentes termos para retratar o mesmo fenômeno dificulta a aplicação de métodos de análise sobre o tema, resultando em inconsistências advindas desta sobreposição de definições (ALBORT-MORANT et al., 2017), principalmente, devido a sua natureza multifacetado (KIEFER et al., 2017). Porém, apesar de diferentes termos, há uma convergência entre todas as definições, sendo a redução do impacto negativo ao meio ambiente o principal foco entre as terminologias (SCHIEDERIG; TIETZE; HERSTATT, 2012).

A inovação ambiental é vista como uma solução proativa que visa prevenir a redução de danos ambientais, além de reduzir o impacto em relação à extração de recursos naturais devido ao processo de manufatura (TERRYN; LAZAR, 2016). Podendo ser todos os novos ou modificados, processos, práticas, sistemas e produtos que visam a redução dos danos ambientais, por meio da ecoeficiência, redução de emissões, gestão de resíduos, reciclagem e ecodesign (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Simplesmente, pode ser uma ideia nova para organização (BURRITT et al., 2019) adicionada ao processo ou produto, que já estava sendo utilizada anteriormente em outra organização.

A preocupação global e a ameaça do aquecimento global favorecem a aplicação da inovação voltada para o prisma ambiental (KARAKAYA; HIDALGO; NUUR, 2014) principalmente por meio do auxílio de regulamentações do mercado global. A inovação ambiental não pode ser tratada como uma inovação comum, pois há uma diferença entre o balanceamento positivo e negativo entre as inovações, ou seja, a inovação ambiental gera mais externalidades positivas, que são superiores a outros tipos de inovação (CUERVA; TRIGUERO-CANO; CÓRCOLES, 2014).

A inovação ambiental enfrenta uma complexidade maior que a inovação tradicional, principalmente, por necessitar da cooperação de diferentes agentes ao longo da cadeia de valor (KANDA et al., 2019). Além do mais, é subvalorizada na visão do mercado, pois seu valor de investimento não reflete os benefícios advindo para o bem-público e meio ambiental, ou seja, suas externalidades positivas (BENDELL, 2017). É um conceito mais profundo do que somente uma tecnologia verde, é vista como uma ferramenta facilitadora de transformações na cadeia de valor, que apresenta-se na forma de soluções socio técnicas de forma a mitigar a degradação ao ecossistema natural, por meio da preservação dos recursos naturais e permitindo a regeneração de valor de componentes já utilizados na economia (JESUS; MENDONÇA, 2018).

O que fortalece a definição da inovação ambiental é a preocupação nos resultados ambientais, uma vez que mudará o impacto ambiental da organização (BENDELL, 2017). Ainda que se compreenda os benefícios potenciais da inovação ambiental, tais quais vantagens competitivas - advindas da redução de custo devido ao uso eficiente e eficaz dos recursos alinhados aos princípios da economia circular, ainda é possível identificar dificuldades na aplicação de soluções inovadoras focadas em mitigação do impacto ambiental (KANDA et al., 2019).

É um desafio incluir a questão ambiental no processo de tomada de decisão das empresas. Principalmente, porque está integração é responsável pela coexistência apropriada das atividades econômicas da empresa e a conservação dos recursos ambientais, além de buscar

atividades inovadoras para garantir este equilíbrio. As organizações utilizam as inovações ambientais de maneira estratégica como uma forma de reduzir os impactos negativos dos processos e produtos ao meio ambiente, de maneira a adotar novos modelos de negócios (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019).

A inovação ambiental pode ser orientada por diversos fatores determinantes que conduzem sua aplicação pelas organizações, sendo eles: i) orientação ao mercado – busca de novos mercados e oportunidades, demanda do consumidor, concorrência e imagem organizacional; ii) orientação para tecnologia – qualidade do produto e processo, eficiência no uso energético e de material, entre outros; e iii) orientação por regulamentações – legislação ambiental vigente no país de atuação, normas de segurança, políticas regulatórias (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Dois destes fatores são similares com as pressões institucionais que uma organização pode enfrentar dentro de um contexto, proposto pela teoria da instituição.

Figura 6 - Fatores orientadores da inovação ambiental

Fonte: Autora "adaptado de" Leitão; De Brito; Cubico, 2019; p. 12

Para a teoria institucional suporta-se que as indústrias estão comprometidas em buscar aceitação, legitimidade e aprovação institucional advindas dos *stakeholders*, que moldam o seu comportamento organizacional e fortalece sua filosofia de negócio (CHEN et al., 2018). Esta pressão, interna ou externa, advém do contexto institucional em que a organização está inserida, podendo ser tanto em termos de eficiência econômica como de legitimidade social (LIU; YAN, 2018), impelindo as empresas no cumprimento de normas e regras para essa aceitação (CHEN et al., 2018). A teoria institucional fornece uma abordagem teórica adequada para entender as estratégias ambientais organizacionais provocadas pelo contexto institucional da empresa. Considerando-se uma estrutura pressão-resposta-desempenho, ou seja, a empresa sofre uma pressão, que consequentemente reproduz uma resposta organizacional verde que gera um efeito no desempenho da inovação verde da empresa (HUANG et al., 2016).

As pressões institucionais podem ser classificadas em três tipos: coercitiva – advinda de regulamentação governamental, é a legitimidade concedida pelo governo; normativa – origina-

se de organizações não-governamentais e de clientes, relacionada padrões morais e normas sociais; e mimética – oriunda dos concorrentes e empresas líderes. Estas pressões podem trabalhar conjuntamente, porém podem apresentar efeitos e graus variados na inovação verde da empresa (CHEN et al., 2018). Entende-se que a pressão coercitiva e a normativa são as mais relevantes dentro da pressão institucional, ou seja, possuem um impacto maior nas respostas ambientais da empresa (HUANG et al., 2016).

Logo é possível explicar os diferentes níveis de desempenho de inovação ambiental entre organizações, devido a estas duas formas de pressão (HUANG et al., 2016). Porém a questão regulatória é vista como o principal determinante para garantir a disseminação da inovação ambiental, principalmente, quando os fatores orientadores de mercado e tecnológico não são o suficiente para o desenvolvimento dos atores (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019), principalmente porque as regulamentações governamentais são instituições formais (HUANG et al., 2016).

As capacidades tecnológicas disponíveis na organização - pesquisa e desenvolvimento P&D ou o capital humano aplicado - contribuem para fomentar a inovação ambiental, permitindo o aumento destas inovações por meio da curva de aprendizado e conhecimento adquirido em fontes externas (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019) e experiências vividas. As capacidades tecnológicas auxiliam na exploração das bases de conhecimento necessário para acelerar o desenvolvimento de tecnólogas com menor impacto ambiental. Pois quando a organização percebe vantagem na inovação ambiental inclina-se a criar recursos ecológicos necessários para a implementação destas inovações, de modo a desenvolver respostas organizacionais internas favoráveis a mudança (HUANG et al., 2016).

A inovação ambiental possui um impacto positivo, sendo seu principal foco os resultados ambientais, tais quais: os benefícios tradicionais - mais focados em processos, por exemplo, eficiência, ganhos de eficácia, desempenho aprimorado e ganhos de economia; e os benefícios ambientais e regulatórios - considerados públicos, distanciando os efeitos negativos da sociedade (BENDELL, 2017). Este tipo de inovação com ênfase na tecnologia pode, principalmente, reduzir as externalidades negativas, de forma a revelar-se significativa para as cadeias de valor dos produtos, devido a importância da interconexão entre organizações e países (COSTANTINI et al., 2017).

A inovação ambiental pode ser aplicada em dois níveis distintos, sendo eles: i) em grande escala - mudança de um projeto fabril, aplicação de circuito fechado, entre outros; ou ii) em pequena escala, por exemplo, destinação de resíduos para reciclagem, troca de lâmpadas fluorescentes para LED, entre outros (BENDELL, 2017). A inovação ambiental pode gerar

externalidades positivas em suas fases principais, ou seja, na fase de inovação – resultado da pesquisa e desenvolvimento (P&D) aplicado na organização; e na fase da difusão, gerada pela diminuição dos custos externos associados aos riscos de aplicação da inovação comparado com o mercado tradicional (KANDA et al., 2019).

Destaca-se que as restrições financeiras de investimentos pela organização são mais limitadoras nas inovações ambientais do que nas tradicionais, assim como dificultam o desenvolvimento de capacidades organizacionais adequadas para a implementação de sistemas que promovem uma inovação ligada a questão ambiental (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). A incerteza tanto do mercado quanto do retorno incerto do investimento realizado, são obstáculos expressivos que a inovação ambiental enfrenta durante sua implementação, pois o tempo de implantação desta inovação é de longo prazo (KARAKAYA; HIDALGO; NUUR, 2014). Outro tipo de barreira na implantação deste tipo de inovação, é a incerteza de resultados advindos da aplicabilidade da inovação ao processo e ao mercado – a falta de visualização de resultados imediatos, além da complexidade da aplicação de inovação ambiental no processo, ou seja, gerenciar novas atividades e capacidades da empresa (ARRANZ et al., 2019).

Na indústria de mineração, a inovação ambiental tecnológica é responsável por trazer melhorias nas operações e no desempenho, a implementação destas inovações pode mitigar o impacto ambiental geral do processo e minimizar o consumo de energia e recursos nas minas (BAI; KUSI-SARPONG; SARKIS, 2017). A evolução e o desenvolvimento tecnológico possuem um potencial valioso quando aplicado nos processos de minério de ferro, principalmente devido à natureza intensiva da mineração, de forma a fechar os ciclos e reduzir perdas significativas por meio do reaproveitamento dos resíduos (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

2.2.3 Inovação no contexto da indústria de mineração de ferro

O minério é comercializado de forma homogênea e fungível, visto como uma *commodity*, possui uma demanda de qualidade padronizada e sua concorrência é fundamentada maioritariamente no custo da tonelada. Este contexto estimula a produção com o menor custo, estando a mercê durante as quedas cíclicas de demanda. Portanto, o imperativo para a inovação no setor de mineração é a redução dos custos de produção e novos métodos que permitem a extração e o processamento rentáveis em depósitos de minérios complexos, ou seja, inovações incrementais (WARHURST; BRIDGE, 1996).

O setor de mineração está sujeito a variabilidades, tanto no sistema de extração como no processamento. As áreas de variabilidade são: depósito de minério - geologia, localização e consistência; minério - teor, resistência e mineralogia; preços da *commodity* do minério, requisitos fixos do cliente; entre outros (BEARMAN, 2013).

Devido as complexidades de lidar com material geológico, naturais como a rocha, o sistema de mineração não pode ser comparado com diferentes setores da indústria. Uma vez que, uma partícula de minério de ferro possui uma variabilidade em condições de abrasividade, grau de minério, mineralogia, tamanho, entre outros. Logo, como observado, há uma grande complexidade para lidar de ponta a ponta - retirada do produto até entrega final - quando se trata da indústria de mineração (BEARMAN, 2013).

Deste modo, a inovação é essencial para lidar com a complexidade inerente ao setor de minério de ferro, como uma maneira de garantir a resiliência perante as variabilidades dos negócios a longo prazo. O setor possui uma capacidade de inovação incremental essencial que garante melhorias e acompanhamentos diante das pressões locais e globais. Porém a área mais crítica para o setor são as de grandes mudanças revolucionárias, ou seja, inovações que exigem maior esforço por desafiar o conhecimento existente (BEARMAN, 2013) e investigar como garantir uma aplicação de inovações ambientais da maneira mais eficiente possível.

O setor de minério de ferro faz parte de uma indústria fundamentada na extração de recursos naturais. As inovações ecológicas deste tipo de indústria estão sujeitas a diferentes barreiras e pressões, por exemplo, alto custo de investimento, alto risco envolvido no investimento do capital, pressão de atores envolvidos na cadeia de produção e pressão pública em geral (PAJUNEN et al., 2012).

A indústria de mineração possui ao longo dos anos avanços por meio da engenharia verde – gestão de resíduos e desenvolvimento de novas modificações de processos de produção. Porém estas tecnologias possuem um tempo de amadurecimento para tornarem-se as melhores técnicas disponíveis, de modo que estas novas tecnologias apresentem melhorias econômicas para a organização. Outro ponto relevante de considerar no setor de mineração é a importância de diferente agentes da cadeia de suprimentos, que podem interferir e até impulsionar inovações e resultados melhores (PAJUNEN et al., 2012).

Porém como incentivador de mudança deste contexto, surge o imperativo ambiental, visto como uma resposta a níveis de preocupações globais em relação aos impactos e riscos associados as atividades de mineração, este imperativo pressiona a empresa a buscar formas de criar uma correlação entre a competitividade do mercado e o desempenho ambiental da mina.

Estas inovações ambientais são práticas cada vez mais exigidas pelos *stakeholders* envolvidos na cadeia de valor (WARHURST; BRIDGE, 1996).

Há um aumento significativo dos resíduos do setor de mineração advindo do crescimento da demanda. Porém devido a legislação ambiental mais rigorosa em relação ao setor, é possível identificar um aumento dos custos referentes a quantidade de rejeitos depositado pelas mineradoras. A regulamentação está dificultando e restringindo o acesso a novos locais de disposição, relacionados a segurança do espaço e impacto ambiental gerado, para permissão destes locais (PAJUNEN et al., 2012). Apesar de limitada, devido à restrição ser aplicada na disposição e não na fonte geradora, estas limitações têm favorecido o incentivo para inovações nos processos de mineração.

A questão regulatória no caso da indústria de mineração, é vista tanto como motivadora como barreira. Ou seja, a falha em fornecer legislações que definem comportamentos em uma direção específica – ambientalmente responsável – pode dificultar as inovações ambientais na área. Embora o âmbito regulatório auxilie a inovação ambiental por meio de sanções e regulamentos, acaba-se limitando a capacidade do setor, pois até mesmo as melhores técnicas disponíveis (MTD) de prevenção de poluição geram atrasos nas mudanças das tecnologias de produção. É preciso estabelecer uma maneira da indústria tratar os fluxos de materiais e resíduos dentro do processo, por meio de parceiros de rede industrial (PAJUNEN et al., 2012).

A dinâmica setorial da indústria de mineração não é considerada de alta tecnologia. O setor de mineração em termos de intensidade de pesquisa e desenvolvimento (P&D) é classificada em médio-baixa (OECD, 2016). Deste modo, as pressões externas, principalmente a de mercado e o imperativo ambiental, estão gerando um incentivo para que as empresas do setor de minério de ferro assimilem inovações ambientais tecnológicas e práticas de gestão, para equilibrar o desempenho ambiental e a competividade de produção.

Tendo visto conceitos da economia circular e da difusão da inovação ambiental entende-se a importância destes temas incorporados ao setor de minério de ferro no contexto de países em desenvolvimento. O Brasil em seu vasto território é rico em diversos depósitos de minérios, principalmente o de ferro. Um dos maiores estados produtores é Minas Gerais – recorte da pesquisa, famosa inicialmente pela extração artesanal de ouro no século dezoito, sendo esta dinâmica de operação alterada ao longo dos anos, permitindo a extração em larga escala do minério de ferro na região (WASYLYCIA-LEIS; FITZPATRICK; FONSECA, 2014). A área do Quadrilátero Ferrífero, localizada neste estado, era rica em depósitos de minério de ferro de alto teor, porém ao longo de operações de mineração estas jazidas apresentaram um esgotamento do teor, transformando a qualidade do minério de depósito e dificultando os

processos já existentes, realizado pela estratificação das partículas de ferro por meio aquoso. Este tipo de depósito, possui maior tipo de material considerado como resíduo – descarte devido à alta concentração de ganga. No entanto, com a difusão de inovações e o desenvolvimento de melhorias nas plantas de beneficiamento há a possibilidade de processamento e concentração deste material, aliviando os grandes depósitos de resíduos minerais (GOMES; TOMI; ASSIS, 2015).

Os impactos ambientais desta atividade extrativista são bem notórios, acarretando desafios socioeconômicos e com impactos ambientais as comunidades adjacentes. As atividades mineradoras acarretam pouca diversificação econômica as cidades mineiras, que ficam dependentes da mineração como fonte principal de renda e bem-estar, isto é, existe uma vulnerabilidade destas comunidades e ecossistemas perante as operações da indústria de minério de ferro. As políticas governamentais possuem escopo e preocupações com a poluição em visão holística, resultado crescente da sociedade civil – nacional e internacionalmente (WASYLYCIA-LEIS; FITZPATRICK; FONSECA, 2014), assim como por dois eventos impares de altos impactos, como o rompimento de barragens de rejeitos que destruíram ecossistemas naturais, impactaram comunidades vizinhas e causaram mortes (ARMSTRONG et al., 2019).

Ou seja, considerando este contexto de vulnerabilidade e acirramento de políticas iniciativas ambientais voltadas a sustentabilidade após desastres ambientais, a incorporação da economia circular por meio da difusão de inovações ambientais que facilitaram a circularidade nos processos desta indústria, permitirá agregar melhorias aos ecossistemas e a população humana das comunidades vizinhas.

2.3 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO E ASPECTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DE MINÉRIO DE FERRO

A escassez de recursos não renováveis e hídricos, além da proteção ambiental, mostrou-se como um desafio crítico para a indústria de mineração (CHELGANI et al., 2019), resultando em uma pressão para a melhora do desempenho ambiental e adoção de práticas sustentáveis em seus processos, sendo que o desenvolvimento de novas tecnologias aplicados em processos tem se mostrado fundamental como alternativas e melhoria nos impactos ambientais (CHARIKINYA et al., 2017).

Para cada tonelada de metal extraído dos minérios, gera-se aproximadamente de 2 a 12 toneladas de resíduos de mineração, sendo uma pequena amostra dos desafios ambientais que

o setor enfrenta, além dos riscos potenciais ambientais dos descarte de resíduos, como por exemplo, poluição, acidificação e contaminação de águas por metais pesados e o risco do armazenamento de resíduos - estabilidade de barragens de rejeitos (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

As indústrias de mineração de países em desenvolvimento possuem um sentimento negativo em relação a adaptação de novas tecnologias, pela visão de que estas inovações consomem muito tempo e esforço até a comprovação de sucesso (GÜLCAN, 2020). Pois, o retorno direto é considerado baixo comparado ao investimento inicial - alto, ao contrário da ponderação dos custos de oportunidade advindos com a aplicação da inovação (GEISSLER et al., 2018). Devido à complexidade do processo de teste de funcionalidades da tecnologia para a confirmação e justificativa da inovação e a natureza intensiva dos investimento (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

Há um potencial na aplicação do modelo de economia circular para o setor de mineração de forma a lidar com os desafios da escassez de recursos minerais, com o desperdício ao longo dos processos e a poluição ambiental, na qual a tecnologia estimula o potencial do modelo (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). Por meio das inovações de todos os tipos - tecnológica, de processos, organizacional, entre outras ocorre o fechamento de ciclos, ou seja, a transição do sistema e a redução dos impactos ambientais advindos desta atividade extrativista (GEISSLER et al., 2018).

O modelo de economia circular da Fundação *Ellen MacArthur* não trata dos loops restaurativos no setor de mineração apesar de tratar de outros setores. A aplicação deste negócio circular no setor é uma oportunidade para o aperfeiçoamento da compreensão do potencial do modelo de economia circular no setor de mineração, aprofundando mais do que uma visão geral comparado a estudos anteriores do assunto (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

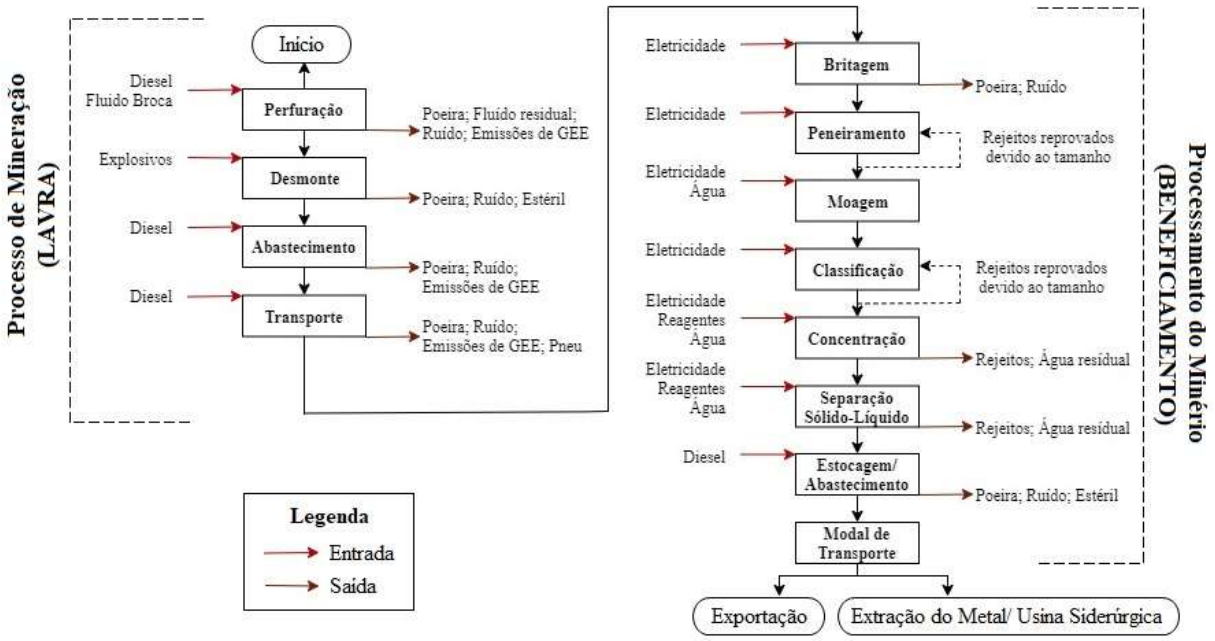
O termo de economia circular, visto como solução técnica destinada a reduzir o uso de recursos e a fechar o ciclo de processos lineares, é o conceito mais tratado por especialistas no setor de mineração comparado a outros conceitos ligados a questão ambiental, uma vez que é percebido como um modelo que melhora o gerenciamento de recursos, energia, insumos e resíduos do processo (D'AMATO; KORHONEN; TOPPINEN, 2019).

A atenção para o gerenciamento de resíduos sólidos e águas residuais é um ponto importante para a indústria de mineração, muitas vezes está relacionado à problemas de liberação de contaminantes tóxicos que podem afetar a qualidade da água e do solo, gerando custos inesperados e complementares aos custos normais do processo extrativista. Desta forma é importante a análise e design do sistema de mineração logo no início da mina, para antecipar

os contaminantes e possíveis impactos ambientais advindos dos processos (CHOPARD et al., 2019).

Há dois tipos de métodos de mineração, superficial e o subterrâneo. A escolha depende do tipo e da profundidade do depósito (DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006). O sistema de mineração geralmente é dividido em três etapas: mineração, processamento do minério e extração do metal requerido (BOBICKI et al., 2020). No presente estudo apenas será estudado os processos de mineração e de processamento do minério. Devido a fatores geológicos, como tamanho, profundidade, grau de concentração do depósito, tipo de minério, localização do depósito e natureza local os métodos, etapas do processo e as tecnologias empregadas pela indústria de mineração podem variar (NORGATE; HAQUE, 2013).

Figura 7 - Etapas do processo de mineração e processamento de minério de ferro



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Norgate; Haque, 2013; Bobicki et al., 2020; CETEM/MCT, 2010

O início do processo de lavra acontece na etapa de perfuração. É o processo que perfura os poços em que os explosivos da próxima etapa serão depositados no corpo de minério (AZARYAN et al., 2018). Os equipamentos de perfuração consistem em diversos tipos de brocas e caminhões de explosivos, sendo que a energia para movimentar as brocas pode ser de eletricidade, diesel ou ar comprimido, variando de acordo com a capacidade e escala de produção da mina (NORGATE; HAQUE, 2010). A perfuração incorreta do corpo de minério pode resultar na ruptura incompleta do minério maciço, levando a destruição de rochas mortas

e gerando impurezas a massa de minério (AZARYAN et al., 2018), impactando nos processos seguintes.

A etapa seguinte é a explosão, responsável pela extração do minério do corpo de minério por meio da energia consumida de explosivos aplicados nos poços de explosão realizados na etapa anterior. A importância desta etapa é a otimização das etapas seguintes, para a economia de energia (NORGATE; HAQUE, 2010), com a atenção devida à decapagem eficiente do corpo de minério evitando perdas e impurezas advindas da explosão incorreta do corpo de minério (AZARYAN et al., 2018).

As etapas de carregamento e transporte são consideradas as etapas finais da etapa de lavra da mineração. As rochas fragmentadas na etapa anterior são carregadas nos modais de transporte por meio de um conjunto de equipamentos de abastecimento. A quantidade e tipos de equipamentos dependem da escala da mina, geralmente escavadas por carregadeiras e escavadeiras - *front-end loaders, excavators, shovels* e *loaded* (NORGATE; HAQUE, 2010). O transporte depende das condições geográficas e de planejamento da mina, tais quais a profundidade da perfuração, condições de inclinação, tipo da área de carregamento e a distância da faixa de transição para o equipamento de transporte (KUZMENKO et al., 2019).

Porém, a maior parte dos modais de transporte utilizados na mineração é alimentado por combustível fóssil, caminhões de carga *off-road*, acarretando um alto consumo de energia - recursos naturais não renováveis (NORGATE; HAQUE, 2010) e aumentando as emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de outros fatores como poeira mineral, ruído e vibrações, que impactam ambientalmente e socialmente as comunidades ao entorno. Outro aspecto em relação ao modal de transporte via caminhões é o alto volume de resíduos e o impacto ambiental das pilhas de rejeitos, pois o acesso deste tipo de transporte exige um maior desenvolvimento da mina para trafegar até o limite do poço, ou seja, desbaste de maior área vegetal para passagem dos caminhões (RODOVALHO et al., 2019).

O início do processo de beneficiamento se dá na etapa de britagem e moagem, porém algumas minas aplicam o processo de trituração ainda na lavra, como uma etapa final anterior ao processo de carregamento e transporte. A etapa de trituração é responsável pela redução do tamanho das rochas e minérios extraídos na mina em partículas grossas (≥ 5 mm) (NORGATE; HAQUE, 2010), sendo o resultado ideal o processamento de altas toneladas de rocha processadas por hora (SURIADI et al., 2018). É o processo que mais consome energia da indústria de mineração (ZUO et al., 2015).

O processo de moagem é a etapa seguinte a trituração, seu papel é a redução das partículas grossas em partículas finas (≤ 0,1 mm ou 100 mm) e os equipamentos são geralmente

alimentados por energia elétrica ou combustíveis fosseis (NORGATE; HAQUE, 2010). Logo é necessário otimizar este processo de forma a controlar as partículas finas, pois estas afetam diretamente as vazões volumétricas dos espessantes, a decantação dos circuito, a recuperação da água do processo de floculação e a quantidade de rejeitos do processo (GRABSCH; YAHYAEI; FAWELL, 2020).

Entre os processos de britagem e moagem há duas etapas responsáveis por evitar o desbaste excessivo do minério que pode prejudicar a liberação adequada dos minerais requeridos aumentando a ganga – rejeitos - e atrapalhando as etapas posteriores, logo os procedimentos de peneiramento e classificação controlam o tamanho do minério com o intuito de atender especificações pré-determinadas (CETEM/MCT, 2001).

O processo de moagem pode ser realizado a seco ou em solução líquida, chamada de moagem úmida, a escolha do processo depende da escala e da operação da mineradora. O processo de moagem a seco consome de 15 a 50% mais energia para fragmentar a mesma quantidade de partículas que a moagem a úmido, sendo que o processo a seco apresenta desgastes menores no minério, ou seja, mais partículas aglomeradas e superfícies mais ásperas. Por outro lado, o processo de moagem úmida consome menos energia, porém o desgaste do revestimento do equipamento é maior devido a umidade e o desbaste do minério é maior, ou seja, partículas mais finas são geradas neste processo. Logo, a escolha do tipo de moagem é importante para a otimização do processo de separação sólido-líquido - devido ao tamanho das partículas geradas, e o gerenciamento de recursos do contexto da mina– energéticos e hídricos (CHELGANI et al., 2019).

Após a trituração e moagem é feito o processo de separação, em que as substâncias valiosas são separadas das substâncias indesejadas com base em diversos fatores das propriedades físicas dos minérios (NORGATE; HAQUE, 2010), como por exemplo, tamanho e formato da partícula, sendo estes parâmetros fundamentais na determinação da eficiência, desempenho e precisão dos processos de classificação (GÜLCAN, 2020). Para isto, muitas técnicas foram desenvolvidas a fim de melhor beneficiar o minério (PONOMAR; DUDCHENKO; BRIK, 2018), sendo as mais comuns: i) separação magnética, visto como um processo de baixo custo, grande capacidade de separação e ambientalmente amigável, pode ser realizado a seco ou em solução aquosa (WANG et al., 2018b); ii) separação gravimétrica, utiliza as propriedades físicas dos materiais de forma a selecionar o material requerido dos que não o são; e iii) flotação, processo em solução aquosa que utiliza reagentes químicos e um dispersor aerado para realizar a seleção hidrofóbica dos minérios de granulados e finos, apresentando preocupações ambientais por ser visto como o método de separação que mais consome energia

elétrica (NORGATE; HAQUE, 2010) e por envolver diversos reagentes químicos adicionados ao tanque de rejeitos (WANG et al., 2018b).

O processo de separação sólido-líquido ou desidratação de rejeitos é a separação das partículas finas e da água utilizada nos processos anteriores, realizado antes do produto ser transportado à indústria metalúrgica ou exportação, é um processo de adequação do minério para o próximo processo (CETEM/MCT, 2001). Está associado com os volumes dos rejeitos de mineração, o custo de rejeitos e os riscos de armazenagem de rejeitos (YANG et al., 2019).

Quadro 5 - Síntese do processo e processamento de mineração

	Etapas	Definições	Autores
Processo de mineração (LAVRA)	Perfuração	Processo de perfuração dos poços de minério realizado com brocas alimentadas por diesel ou eletricidade. Processo preparatório para a etapa de desmonte.	AZARYAN et al., 2018; NORGATE; HAQUE, 2010
	Desmonte	Processo de detonação dos corpos de minério realizado por dinamites e explosivos inseridos dos poços previamente perfurados.	AZARYAN et al., 2018; NORGATE; HAQUE, 2010
	Abastecimento e Transporte	Carregamento das rochas e minérios fragmentados na etapa anterior por meio de um conjunto de equipamentos de abastecimento - carregadeiras e escavadeiras - *front-end loaders, excavators, shovels* e *loaded*, em equipamentos de transporte - caminhões de carga *off-road*.	KUZMENKO et al., 2019; NORGATE; HAQUE, 2010; RODOVALHO et al., 2019
Processamento do minério (BENEFICIAMENTO)	Britagem e Moagem	Processos que visam a redução das rochas em minérios em tamanhos específicos, a trituração visa a redução em partículas grossas e a moagem em partículas mais finas.	GRABSCH; YAHYAEI; FAWELL, 2020; NORGATE; HAQUE, 2010; SURIADI et al., 2018; ZUO et al., 2015
	Peneiramento e Classificação	Etapas que controlam o tamanho do minério com o intuito de atender especificações pré-determinadas a fim de otimizar a etapa de concentração	CETEM/MCT, 2001; GÜLCAN, 2020
	Concentração	Separação das substâncias de minério das valiosas e não valiosas, com base em diversos parâmetros físicos do minério requerido, por meio da separação e concentração. Existem diversos tipos, os mais famosos são: separação magnética, separação por flotação e separação gravimétrica.	GÜLCAN, 2020; NORGATE; HAQUE, 2010; PONOMAR; DUDCHENKO; BRIK, 2018; WANG et al., 2018b
	Separação Sólido-Líquido	Operação de secagem, espessamento das partículas finas e filtragem, da água utilizada no processo anterior.	CETEM/MCT, 2001; YANG et al., 2019

Fonte: Autora

A indústria de mineração vem sofrendo pressões e atenção em relação aos seus impactos. Sendo que a fase de operação de extração e processamento são as fases mais intensivas em impacto ambiental e com maior duração ao longo do tempo, até o fechamento da mina. Neste sentido aponta-se que os impactos ambientais associados com o uso eficaz de energia, água e os recursos naturais, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE)

e os rejeitos advindos dos processos, de forma a considerar a reabilitação da terra após o fechamento da mina. Deste modo, a seleção de tecnologias adequadas para estes processos é uma das formas de otimizar as redes do setor de mineração (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016).

A indústria de extração e processamento de minério de ferro possui um alto impacto ambiental devido a sua escala de operação. É um setor intensivo em consumo de energia (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019) e na utilização de água em todos as etapas de suas operações (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014). Sendo estes consumos relacionados ao estágio de vida da mina e afetados devido ao grau de minério - que declinam ao longo dos anos, e o aumento da distância do poço de extração, aumento da energia no transporte do poço até o beneficiamento do minério (IMMINK; LOUW; BRENT, 2018).

Há algumas barreiras para a implementação de tecnologias limpas na indústria de mineração, tais quais, o investimento de capital inicial, divergência entre custos totais e a energia economizada e a diferença de percepção da sustentabilidade entre o nível corporativo e operacional (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019).

Os recursos renováveis, água e energia, são um risco para a indústria de mineração, pela escassez de água, aumento de marcos regulatórios, segurança do fornecimento constante e a incerteza do custo de fornecimento da energia – influência direta no preço do produto final. Todos estes fatores influenciam no negócio da indústria sendo capaz de gerar uma interrupção da cadeia de produção inteira (NGUYEN et al., 2014).

2.3.1 Consumo de energia e tecnologias alternativas no setor de mineração

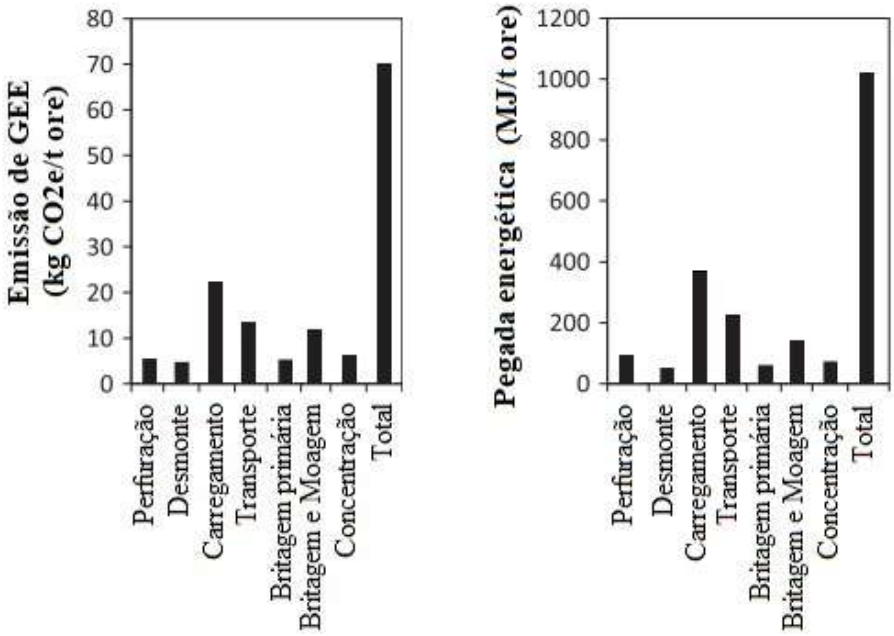
O minério de ferro pode influenciar o consumo de energia e a forma que é realizado este gerenciamento (NGUYEN et al., 2014), sendo o tipo e o grau do minério e a localização da jazida podem interferir no consumo de energia, gerando uma alta variabilidade de operações de mineração, plantas e equipamentos para diferentes minas (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019).

O setor de mineração é um setor intensivo em consumo de energia devido a infraestrutura fixa do consumo em cada etapa do projeto e do grande volume consumido. Dessa forma é significativo as oportunidades de redução deste consumo e de suas emissões por meio da eficiência energética (IMMINK; LOUW; BRENT, 2018) e a implementação de energias renováveis (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019). O método de mineração mais utilizado é a de céu aberto, ou superficial, aproximadamente 90% dos minerais são extraídos

por esta técnica, sendo a principal devido a sua grande escala, as operações de transporte e carreamento são dominantemente realizadas por operações à caminhões à diesel (OSANLOO; PARICHEH, 2019).

A Figura 8 apresenta o consumo de energia e as emissões de GEE das etapas de produção da indústria de mineração.

Figura 8 - Consumo de energia e emissões por etapa na indústria de mineração



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Norgate; Haque, 2013

As minas a céu aberto utilizam em quesitos de energia, em sua maioria, energia elétrica e uma variedade de combustíveis fósseis, sendo o principal o diesel. Estima-se que globalmente a utilização do sistema de bombeamento consome 15% da energia elétrica global disponível e o sistema de moagem até 4% (JESWIET; SZEKERES, 2016). As operações de britagem e moagem e o carregamento e transporte de minérios, respectivamente, utilizam 44% e 17% da energia de todo do setor mineração (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019). A indústria de mineração consome aproximadamente mais de um terço do uso global de energia industrial, sendo que as condições de emissões de GEE estão divididas respectivamente, aproximadamente 29% do uso de eletricidade e 71% de combustíveis fósseis (MCLELLAN et al., 2012).

É importante ressaltar que os depósitos e minérios requeridos podem alterar as etapas da cadeia de valor do processo, equipamentos, tecnologias e eficiência energética (MCLELLAN et al., 2012). Outro ponto relevante em relação ao consumo de energia do setor

é o aumento da profundidade e da quantidade de minério que reduziu em depósitos recém-descobertos, tornando os depósitos mais complexos e exigindo novos processos para a extração, gerando o aumento de energia para retirar a mesma quantidade de minério do que as jazidas já existentes (KUMAR KATTA; DAVIS; KUMAR, 2019).

Como alternativa para este alto consumo pelo setor, há estratégias, como por exemplo a eficiência energética e a descarbonização da energia consumida (MCLELLAN et al., 2012), além do uso de energias alternativas. Uma vez que não poluem o meio ambiente, não emitem gases de efeito estufa durante seu período de operação, portanto, auxiliam na redução dos poluentes atmosféricos, além de serem fomentadas devido a pressões advindas das mudanças climáticas globais e de regulações e políticas mais rigorosas relacionados com o tema (XUE et al., 2015).

Para a indústria de mineração a substituição da energia elétrica, advindas de combustíveis fósseis, pela energia de fontes renováveis é mais simples, ainda que o setor necessite de análise geológica da localização e estabilidade para o fornecimento de energia – fornecimento seguro e constante, apresentam-se como potenciais candidatos de energia alternativa a energia hidrelétrica – mais utilizada em minas localizadas em condições favoráveis a este método, eólica (MCLELLAN et al., 2012) e solar, em modelos híbridos (VOTTELER; BRENT, 2016).

2.3.1.1 Energia Eólica

A instalação eólica é uma forma econômica de geração de energia limpa e renovável, porém a geração de eletricidade por energia eólica é adequada somente em algumas condições e localidade geográficas específicas, pois depende de algumas condições meteorológicas, como por exemplo vento suficientemente forte ou que devem ser desativadas durante ventos fortes, furacões e risco de qualquer tipo de tempestade, necessitando de um maior monitoramento (STRANG, 2017).

Considerando a instabilidade que a energia eólica apresenta, por depender das condições meteorológicas, podendo variar de nenhum vento à ventos fortes, é importante a análise e o estudo do perfil de ventos da região de localização do depósito. Desta forma a fonte de energia eólica é viável para a indústria de mineração em complemento com um sistema híbrido, ou seja, um sistema que possua mais uma opção de energia, como por exemplo, energia hidrelétrica e o armazenamento da energia eólica gerada, pois assim a intermitência meteorológica não atrapalhará as operações (VOTTELER; BRENT, 2016).

2.3.1.2 Energia Solar

A instalação solar é um método econômico de geração de energia verde (STRANG, 2017), porém a indústria de mineração possui um consumo de energia constante, sendo necessário sistemas de armazenamento ou sistemas híbridos com armazenamento para solucionar as intermitências de abastecimento das fontes de energia renováveis (VOTTELER; BRENT, 2016).

A geração de eletricidade por energia solar é possível, porém apresenta algumas limitações de localização geográfica e depende de variações climáticas para atingir a capacidade mínima, como por exemplo céu aberto de sol, e luz solar direta em um ângulo específico, além de que aproximadamente 66% da população mundial reside em zonas solares favoráveis para este tipo de energia (STRANG, 2017).

A energia solar converte energia solar em energia elétrica por meio de sistema fotovoltaicos, sendo que a comparação da energia solar acumulada anualmente no planeta e as atuais reservas fósseis, a energia solar é de 516 vezes mais que as reservas de petróleo e 157 vezes a mais que as reservas de carvão (AYVAZOĞLUYÜKSEL; FILIK, 2018). Suas vantagens de aplicação são: flexibilidade de armazenamento do excesso de energia em baterias, sem esgotamento de recursos e poluição, manutenção mínima entre outras (KAMARUZZAMAN et al., 2012).

Na indústria de mineração a incerteza em torno do fornecimento de forma confiável para o fornecimento de eletricidade contínuo e as questões de gerenciamento de emissões de carbono motivam a necessidade do uso de energias alternativas na mina, sendo a energia solar uma opção viável, principalmente, quando combinada com o sistema híbrido com armazenamento para evitar as interrupções advindas dos períodos noturnos ou meteorológicas (VOTTELER; BRENT, 2016).

2.3.1.3 Energia Hidrelétrica

A instalação hídrica é um meio econômico de geração de energia limpa e renovável, utiliza a energia cinética da água para mover as turbinas e produzir eletricidade sem conversão ou perda adicional, sendo uma forma eficaz e confiável de geração e de sistema de armazenamento de eletricidade, porém apresenta alguns efeitos socioambientais consequência da construção das barragens para acumulo da água (STRANG, 2017).

A energia hidrelétrica é vista como estável, pois consegue gerar energia independentemente das condições meteorológicas, e por gerar pouca emissões de GEE comparado a outras formas de geração de energia não renováveis, apresentando apenas a necessidade de que o país possua potencial hidrelétrico para esta geração, ou seja, quantidade de recursos hídricos para armazenamento e abastecimento da instalação hídrica (MCLELLAN et al., 2012).

A energia hidrelétrica já é bastante utilizada na indústria de mineração, sendo um grande potencial, principalmente se as condições do país produtor forem favoráveis. É visto como uma alternativa promissora para reduzir as emissões de eletricidade do setor, por possuir menos emissões do que as fontes convencionais - carvão, diesel e gás (MCLELLAN et al., 2012).

2.3.1.4 Biocombustíveis

A biomassa é uma fonte renovável de materiais utilizados para gerar eletricidade em usinas de combustíveis fósseis, são feitos de produtos naturais, como por exemplo arbustos, gramas de madeira, bambu, entre outros. Porém há controvérsias em relação a ser um, método de energia limpa, pois ainda gera emissões na atmosfera, contudo é considerado menos perigoso para a camada de ozônio comparado com os métodos tradicionais a carvão ou óleo (STRANG, 2017).

O biocombustível é produzido com base em recursos renováveis, porém não são neutros em carbono, ou seja, possuem baixas emissões de carbono, se comparado com os tradicionais combustíveis fósseis (MCLELLAN et al., 2012). É feito por meio da fermentação de recursos naturais renováveis, como por exemplo, óleo vegetal reciclado, palha, algas, entre outros. O biocombustível líquido é visto como uma energia alternativa ao combustível fóssil líquidos e é uma das alternativas viáveis para o transporte rodoviário a curto e médio prazo, pois podem aproveitar a infraestrutura de distribuição dos combustíveis tradicionais (WHITAKER et al., 2010).

Além de utilizar recursos renováveis, outro ponto positivo dos biocombustíveis é que sua produção pode gerar coprodutos com valor potencial para outras indústrias auxiliando na circularidade do sistema, como por exemplo, a produção por meio da matéria prima da planta colza pode gerar até três coprodutos potenciais: sobra das sementes – utilizado como alimento para animais, glicerina e palha (WHITAKER et al., 2010).

O combustível líquido é o principal transportador de energia na indústria de mineração, especialmente o diesel – utilizado muito nos meios de transporte e maquinário de carregamento,

está ligado a infraestrutura fixa do projeto da mina, que é um setor intensivo em consumo de energia. O biodiesel é uma alternativa ao diesel convencional, pois possui menor fator de emissão, sendo uma oportunidade em potencial de economia nas emissões de GEE (IMMINK; LOUW; BRENT, 2018).

Quadro 6 - Síntese dos tipos de energia alternativas

Energias	Definições	Aplicação	Autores
Eólica	Energia produzida pela energia cinética do vento que move as pás e produz eletricidade	Utilização em sistemas híbridos para abastecimento do processo de mineração	STRANG, 2017; VOTTELER; BRENT, 2016
Solar	Energia produzida pela conversão da energia solar em energia elétrica por meio de sistema fotovoltaicos	Utilização em sistemas híbridos para abastecimento do processo de mineração	AYVAZOĞLUYÜKSEL; FILIK, 2018; KAMARUZZAMAN et al., 2012; STRANG, 2017; VOTTELER; BRENT, 2016
Hidrelétrica	Energia produzida pela energia cinética da água que move as turbinas e produz eletricidade	Utilização para abastecimento e armazenamento de energia na mineração	MCLELLAN et al., 2012; STRANG, 2017
Biodiesel	Energia produzida pela fermentação de recursos naturais renováveis	Utilização em maquinário de operação e transporte, principalmente no processo da lavra	IMMINK; LOUW; BRENT, 2018; MCLELLAN et al., 2012; STRANG, 2017; WHITAKER et al., 2010

Fonte: Autora

O uso da energia está entre uma das questões mais importantes para a indústria de mineração, principalmente por estar associada a altos impactos ambientais, logo a utilização de tecnologias adequadas e a adoção de inovação irão ajudar a lidar com os desafios ambientais e atender órgãos reguladores (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016).

2.3.2 Consumo de água e tecnologias ambientais para tratamento de efluentes na indústria de mineração

O principal foco da indústria de mineração são as restrições impostas ao uso de recursos limitados - por exemplo o uso da água e energia - e como gerenciar resíduos de forma a reduzir os impactos ambientais associados à sua atividade extrativista (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016). Identifica-se, também, uma pressão as empresas mineradoras advindas da regulamentação mais rigorosa para a questão do gerenciamento de água e rejeitos dispostos, de maneira a incentivar a reciclagem da água nas operações, além de reconsiderar o conceito de rejeitos e o seu descarte – principalmente devido a catástrofes envolvendo barragens de rejeitos (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018).

A mineração é uma indústria intensiva em água, pois utiliza água em quase todas as etapas das operações, principalmente em grandes quantidades nos processos de moagem e concentração do minério, sendo essencial para a separação de minerais da ganga, supressão de poeira (OSSA-MORENO et al., 2018), mobilização dos contaminantes, transporte do minério e rejeitos, além da remoção dos poluentes locais. A água é um produto essencial para a maioria das operações de mineração, principalmente o processamento mineral, e sua disponibilidade é um fator crítico que está relacionada a qualidade do minério (ANA: IBRAM, 2013).

O contexto da mina pode influenciar o gerenciamento de água da indústria de mineração, principalmente porque as características geológicas e o cenário hidrológico da região podem variar de mina para mina. As condições socioeconômicas da mina (OSSA-MORENO et al., 2018), a execução das regulamentações e legislações ambientais impostas pelos órgãos necessários (CETEM/MCT, 2001) e as tecnologias aplicadas em cada processo também podem interferir no gerenciamento hídrico (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014).

A utilização intensiva de água nas indústrias de mineração, tanto no processo de lavra como no beneficiamento, gera dezenas de milhares de metros cúbicos de águas residuais por dia com diversas composições. Esta água residual não pode ser descartada diretamente nas bacias hidrográficas**,** por conter diversos componentes - grão finos de minério de ferro, reagentes químicos, sulfatos, silicatos e ganga - que podem gerar passivos ambientais (BUDYKINA, 2018). O consumo de água na indústria de mineração é de aproximadamente 0,4 a 1,6 m^3/por tonelada de minério e nos processos seguintes de até 3,8 m^3/ tonelada (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014)

Como o descarte das águas residuais sem tratamento adequado é indevido, torna-se fundamental o mapeamento das principais fontes potenciais de poluição, tanto para águas superficiais como para as subterrâneas, advindas de cada atividade mineradora e a forma de transporte destes poluentes até o meio ambiente. O processo de lavra pode gerar impactos hídricos ao meio ambiente advindos da erosão e do assoreamento das minas; depósito de material estéril; lixiviação do minério de ferro disposto em pilhas para abastecimento dos caminhões; produtos químicos, óleos e detergentes gerados nas etapas de perfuração, desmonte e transporte; entre outros (CETEM/MCT, 2001). Já o processo de beneficiamento do minério de ferro gera os seguintes poluentes, como por exemplo, ganga, sais dissolvidos, reagentes utilizações nos processos de concentração, partículas finas de minério de ferro e sulfatos (BUDYKINA, 2018).

Figura 9 - Uso da água na mineração e seus impactos regionais

Fonte: Autora "adaptado de" Ossa-Moreno et al., 2018; p. 369

Visto que a água residual advinda da mineração do minério de ferro não pode ser descartada, uma forma de reduzir o input e output de água na indústria de mineração é por meio do reaproveitamento, aplicando um controle de qualidade para que a água possa recircular nos processos sem interferir na produção (BUDYKINA, 2018). A reutilização da água traz benefícios como redução dos custos operacionais, atendimento as exigências ambientais e redução das áreas de represamento dos rejeitos (ARJMAND; MASSINAEI; BEHNAMFARD, 2019).

Quadro 7 - Interações da água em etapas operacionais do setor de mineração

Etapa	Utilização da água	Autores
Lavra	- Desmonte hidráulico - Supressão e controle da emissão de poeira - Lavagem dos equipamentos	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006; IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018
Barragens	- Barragens de contenção de sedimentos/ barragem verde: estruturas responsáveis por conter os sedimentos advindos de períodos de chuva. - Barragens de rejeitos: bacia de acumulação de rejeitos gerados nas instalações de beneficiamento de minério e uma forma de acumulação da água, por sedimentação, a ser reutilizada no processo industrial	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006; IBRAM, 2016; OSSA-MORENO et al., 2018
Pilha de Estéril	- Pilhas de estéril podem causar interferência do escoamento superficial, que pode vir a gerar, pequenos desvios de água e drenagem ácida de minas	ANA: IBRAM, 2013; DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006; GALANOPOULOS; SKARPELIS; ARGYRAKI; 2019; IBRAM, 2016; NORTHEY et al., 2016; OSSA-MORENO et al., 2018
Bombeamento da água subterrânea	- Bombeamento das águas subterrâneas para a viabilização da lavra	IBRAM, 2016; NORTHEY et al., 2016; OSSA-MORENO et al., 2018

Continua...

Conclusão

Beneficiamento	- Processo de flotação: processo utilizado na separação de minerais, formando um agregado, em meio aquoso. - Processos de lavagem: Etapas para limpeza do minério para a retirada da ganga, demandando elevados volumes de água. - Concentração gravítica: processo de separação que utiliza a gravidade, do sólido em meio aquoso, para a geração de polpa para cada operação. - Processos hidrometalúrgicos: dissolução do metal de requerido em meio ácido ou alcalino.	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006; IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018
Água como meio de transporte	- A água é utilizada como meio de transporte na indústria de mineração, sendo utilizada deste modo nas mais variadas operações, tais como: na lavra como desmonte hidráulico; na lavagem de minérios e nos processos de concentração a úmido.	IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018

Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em IBRAM, 2016

A água utilizada nos processos pode ser reaproveitada, sendo uma forma de minimizar custos operacionais e de captação, recuperar reagentes e reduzir os impactos ambientais advindos dos efluentes liberados ao meio ambiente (ANA: IBRAM, 2013). Observa-se que o tratamento e a reciclagem de águas residuais é uma alternativa ao desafio da gestão de recursos hídricos nas indústrias. Sendo que o principal objetivo para essa reutilização é o controle da qualidade moderando alguns aspectos de poluição convencionais, como por exemplo, demanda química de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), pH, sólidos em suspensão (SS), bactérias e metais pesados (ÜSTÜN et al., 2011).

Neste contexto de pressão pelo uso de recursos hídricos, o gerenciamento de águas é importante. Porém, a indústria de mineração pode enfrentar dois problemas advindos do gerenciamento hídrico da mina, um relacionado ao excedente de água na mina, que podem ocorrer quando os fluxos de água subterrânea, e o outro relacionado ao escoamento da água superficial que pode exceder a demanda e a capacidade de armazenamento da mina, gerando derramamentos não regulados, infiltração, escoamento difuso ou até a interrupção das operações devido a inundações ou penalidades regulatórias. O segundo problema é referente a água residual que possuem complexas interações com o meio ambiente devido a potencial toxidade (OSSA-MORENO et al., 2018).

As águas subterrâneas localizadas na região da mina de minério de ferro podem interferir nas operações de mineração, como por exemplo, possíveis inundações dos poços de escavação, riscos de acidente de trabalho e ambiente insalubre devido aos altos níveis de umidade, alto custo de investimento em equipamentos especiais e relevo e galerias instáveis.

Para evitar estes problemas, a indústria de mineração realiza o bombeamento do aquífero de forma a exceder sua capacidade de recarga, abaixando o nível dos reservatórios. Logo, é necessário gerenciar a distribuição e a canalização desta água excedente, como por exemplo, fornecimento público, irrigação, aplicações industriais, porém mesmo assim este bombeamento pode gerar impactos ambientais ao abastecimento hídrico de regiões hídricas dependentes deste sistema e comunidades ao redor (ANA: IBRAM, 2013).

A outra interação prejudicial é a chamada drenagem ácida de minas (AMD), gerada por meio da exposição de minérios ricos em sulfeto à água e o oxigênio, uma vez exposto metais pesados e sulfatos são liberados na água, interferindo em seu pH. É considerado um poluente multifator, ou seja, resulta em impactos ambientais físicos, químicos e biológicos, como por exemplo, colapso do ecossistema e destruição de cadeias alimentares e habitats terrestres e aquáticos próximos a mina. A AMD pode ocorrer no início do processo de mineração, ou seja, na exploração do espaço da mina ou após o fechamento da mina (MOODLEY et al., 2018).

Os tratamentos para AMD são diversos, mas em sua grande maioria, atuam na neutralização do pH, remoção dos metais pesados e sulfatos da água (MOODLEY et al., 2018), por meio de processos químicos, físicos e biológicos. A prevenção da AMD é uma forma estratégica para lidar com seus impactos ambientais, o principal ponto é evitar que os minerais ricos em sulfeto entrem em contato com diferentes fontes - estoques de minério, barragens de rejeitos, poços de lamas, pilhas de estéril, entre outros. Esta proteção pode ser realizada utilizando um aterro especial para os resíduos de mineração e cobertos por um agente que aja como uma barreira, como por exemplo, cobertura de água ou seca – substratos alcalinos, mistura solo-lodo, resíduos orgânicos (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

Considerando que as indústrias de mineração enfrentam o cenário de restrições do uso de recursos e a pressão de políticas públicas, há diversas oportunidades para a introdução de tecnologias e novas formas de desenvolvimento nos processos de mineração e processamento mineral (PESTRYAK, 2015), além de ampliar tecnologias que otimizem a recirculação, a regeneração da água gerada nos processos (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016).

O aproveitamento de inovações tecnológicas apropriadas para o setor de mineração, principalmente no processo de lavra e beneficiamento, é responsável pela redução dos impactos ambientais, como por exemplo, o menor uso de energia e recursos, tratamento de efluentes mais eficiente e melhor gerenciamento de rejeitos (DRIUSSI; JANSZ, 2006). As tecnologias utilizadas nas operações de produção do minério de ferro influenciam significativamente a natureza e o volume dos resíduos do setor de mineração. Consequentemente, podem interferir

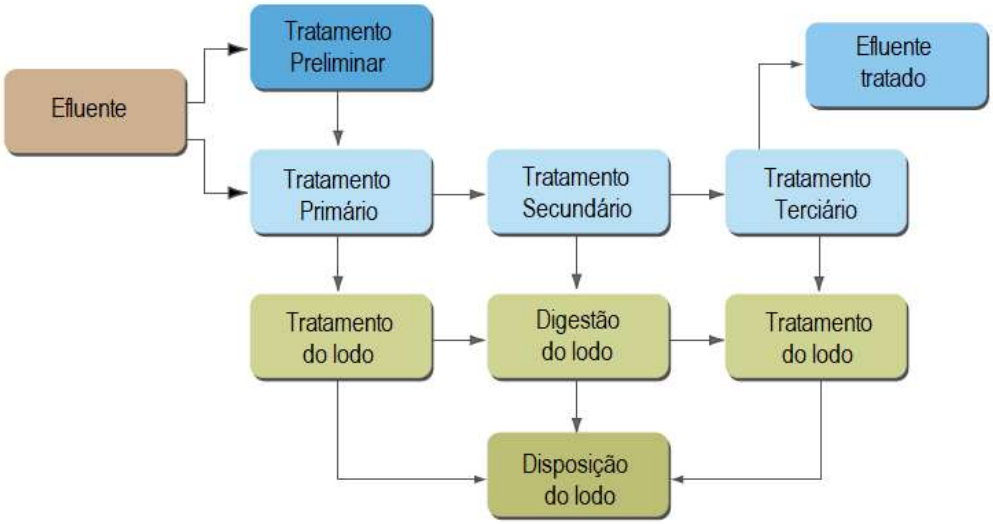
no método de tratamento e descarte de efluentes e rejeitos (DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006).

Os efluentes de mineração englobam diversas substâncias que inutilizam a água tanto para descarte como para retornar ao sistema de produção antes de um tratamento adequado (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002), pois podem conter, sólidos em suspensão, produtos químicos de reagentes, íons metálicos, óleos, sulfatos, cloretos, silicatos, material orgânico e inorgânico (BUDYKINA, 2018; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias adequadas para o tratamento de efluentes eficiente é essencial para o setor de mineração, com a possibilidade de reciclagem de água para o processo de produção e redução das barragens de rejeitos - volume e tamanho (ANA: IBRAM, 2013).

Logo, as tecnologias de tratamento de água residual da indústria de mineração devem tratar questões e características resultantes das operações, como, tratamento e reciclagem da água residual, separação do óleo, remoção e recuperação de íons e metais pesados nocivos ao meio ambiente e controle/ remoção dos reagentes químicos residuais - responsáveis pelo espessamento, modificadores, entre outros (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

A decisão do sistema de tratamento de efluentes advindos das operações de mineração e a escolha das tecnologias para este sistema, está sujeito a alguns fatores específicos, como por exemplo, as características do efluente – sua forma, biodegradabilidade, compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos; a legislação em vigor – a qualidade exigida após este tratamento; e por último, os custos associados a este sistema de tratamento. Tradicionalmente, o sistema de tratamento de efluentes consiste em processos físico, químicos e biológicos. Geralmente, divide-se em três etapas – primária, secundária e terciária - diferenciadas pelos diferentes tipos de processos – físico, químico e biológico (ANA: IBRAM, 2013). O fluxograma apresentado na Figura 10 mostra o fluxo de um sistema tradicional de tratamento de efluentes.

Figura 10 - Fluxograma de um sistema de tratamento de efluentes tradicional na mineração



Fonte: ANA: IBRAM, 2013; p. 112

O tratamento preliminar é um tratamento simples, pode ser opcional, em que se prepara o efluente para as próximas etapas, pode consistir no ajuste do pH para reduzir reações indesejadas, ou o aumento da concentração de oxigênio para a reação futuras, ou até mesmo o tempo de retenção adequado para o assentamento de sólidos precipitados – sólidos de maior tamanho – que poderiam atrapalhar os processos seguintes (AL-GHOUTI et al., 2019).

O tratamento de efluentes inicia na etapa primária, em que basicamente ocorre a remoção dos sólidos suspensões, óleos, gorduras, cascalhos – grossos e finos – e areia dos efluentes, visando a purificação da água por meio do clareamento. O tratamento secundário, consiste em processos biológicos que visa a degradação de compostos orgânicos, oxidação de nitrogênio da amônia, constituintes inorgânicos e íons metálicos. Ou seja, utiliza-se de microrganismos específicos para cada tipo de contaminantes do efluente. A terceira etapa de tratamento de efluente consiste é indicado para remoção de tipos específicos de poluentes e substâncias tóxicas que persistiram após as duas etapas de tratamento anterior, como por exemplo, íons metálicos e compostos de orgânicos sintéticos (ANA:IBRAM, 2013).

No Quadro 8 apresenta-se as principais tecnologias e processos utilizados nas etapas de tratamento de águas residuais da mineração. Apenas as etapas: primária, secundária e terciária, serão descritas no quadro, principalmente, porque a etapa de tratamento preliminar é opcional no sistema de tratamento de efluentes.

Quadro 8 - Tecnologias e processos utilizados nas etapas de tratamento de águas residuais da mineração

Etapas	Definição	Tecnologias e processos
Primária	Processo físico-químico de esclarecimento da água por meio da remoção de sólidos suspensos	- Sedimentação - Coagulação - Floculação - Flotação - Desidratação (filtros, centrifugas, prensas)
Secundária	Processo biológico que visa a degradação de compostos orgânicos e inorgânicos, oxidação de nitrogênio da amônia e íons metálicos	- Sistemas aeróbicos de crescimento suspenso (lodo ativado, lagoas aeradas); - Sistema aeróbico de filtro fixo (filtro biológico e biodisco); - Sistemas combinados (filtro biológico e filtro lodo ou lodo ativado e filtro biológico); - Sistemas anaeróbicos de crescimento suspenso (digestão anaeróbica, lagoas anaeróbias e desnitrificação suspensa); - Sistemas anaeróbicos de filme fixo (anaeróbico de desnitrificação de filtro fixo); - Sistemas que associam metabolismos aeróbicos a metabolismos anaeróbicos (lagoas facultativas).
Terciária	Processo físico-químico, ou combinado com processo biológico, que visa a remoção de compostos específicos que permaneceram após as duas etapas anteriores	Processos combinados a depender do componente específico que se deseja tratar

Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em ANA: IBRAM, 2013

Desta forma, o tratamento de efluentes é um processo desafiador devido a vários contaminantes com diversas concentrações que resultam das operações de beneficiamento e lavra. Havendo grande variedade de métodos que podem compor o sistema de tratamento de tratamento da água residual, podendo ser utilizados individuais – único processo - ou em conjunto para a remoção de contaminantes específicos. Sendo complexo a escolha do sistema de tratamento e as tecnologias adequadas, principalmente por à fatores como qualidade do efluente, preço da eletricidade, capacidade de produção, qualidade requerida do efluente e custo do tratamento (AL-GHOUTI et al., 2019).

2.3.2.1 Tecnologias e processos do tratamento primário na mineração

O tratamento primário visa a clarificação do meio líquido por meio da retirada de sólidos suspensos dispersos no efluente líquido. Sendo o foco a retirada de sólidos suspensos por técnicas de separação físico-químicas, de modo a diminuir a turbidez da água, tais quais sedimentação, floculação, coagulação, flotação e desidratação (CETEM/MCT, 2010). Os

sólidos suspensos compostos nos efluentes são caracterizados em termos de tamanho dos grãos, a mineralogia e a morfologia, sendo a interação destes fatores com o meio líquido que dita o comportamento da lama de rejeito (WANG et al., 2014a).

Um dos métodos utilizados no tratamento primário de efluentes de minério é a sedimentação, que depende de dois fatores importantes: o tamanho e a densidade da partícula, sendo um fenômeno físico, ou seja, motivado por um campo gravitacional, o processo é considerado barato e operacionalmente simples. Pode ser utilizado da maneira convencional – por gravidade somente - ou em conjunto com outros métodos, como a floculação e a coagulação, que ajudam na aceleração e eficiência do processo físico da sedimentação dos rejeitos e polpa (CETEM/MCTI, 2013; IBRAM; ANA, 2013).

O método de sedimentação mais comumente utilizado é o por meio de barragens de rejeitos, como uma forma de decantação dos sólidos suspensos (CETEM/MCT, 2010), ocorre dentro da estrutura de represamento – depressões projetadas assistida por diques e barragens como estrutura de contenção, que forma por meio gravitacional uma camada de sedimentos separado da água residual, dependendo das condições gravitacionais da suspensão do efluente. O método de sedimentação por gravidade é muitas vezes considerado ineficaz, pois precisa de um longo tempo de sedimentação das partículas e não consegue atingir sólidos finos dispersos, retendo uma quantidade significativa de água e atrapalhando o processo de reciclagem de água e a disposição dos rejeitos (WANG et al., 2014a).

Este método é de baixo custo para as empresas, sendo considerada uma tecnologia barata, mesmo necessitando de grande área superficial para disposição dos rejeitos, longo tempo de sedimentação. Há riscos ao meio ambiente por meio de interação – vento, evaporação, infiltração, drenagem ácida de mina – que pode impactar a qualidade dos lençóis freáticos e solo (WANG et al., 2014a). Além disso pode acarretar riscos as comunidades vizinhas por meio da ocorrência de desastres de rompimento destas barragens (LIU et al., 2019).

Outra forma de tratamento primário é a precipitação por agregação - métodos de coagulação ou floculação - que utilizam do princípio de sedimentação. Do ponto de vista técnico, estão sujeitos a algumas limitações, como por exemplo, a dependência da composição e do pH do efluente que podem interferir na formação dos agregados e influenciar na sua precipitação ou sedimentação, resultando na geração de alto volume de lodo ou alto teor de água e impactando em processos posteriores – como a filtragem (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

O método de coagulação é um método que utiliza a adição de substâncias químicas para desestabilizar os sólidos suspensos no líquido de forma a aglomerar estas partículas e facilitar

o processo de sedimentação ou precipitação. Existem tecnologias de densificação de efluentes baseadas no método de coagulação, que utilizam processos de rejeitos consolidados (CT) ou rejeitos não segregantes (NST), pois uma mistura conglomerada possui uma estabilização rápida e libera água com mais eficiência, realizando melhor esta separação de sólido-líquido (WANG et al., 2014a).

O processo de floculação consiste na utilização de aditivos poliméricos e outros aditivos, que em meio aquoso, interagem com a superfície do componente requerido, por meio da adsorção resulta na geração de flocos e consequentemente na clarificação da água residual. Na floculação o nível de concentração do floculante, do pH da solução e a densidade do efluente interferem nas taxas de sedimentação e posteriormente na filtragem dos finos de minério de ferro (SUBRAMANIAN; NATARAJAN, 1991; WANG et al., 2014a). Desta forma, é importante a determinação da dosagem adequada e garantir a distribuição homogênea do agente floculante com o objetivo de atingir a máxima aglomeração dos sólidos em suspensão existentes no efluente tratado (WANG et al., 2014a).

Outra possibilidade de processo para clarificação do efluente líquido vindo do processo de concentração é o espessador. As aplicações dos processos de rejeitos espessados e espessantes de pasta está crescendo na indústria de mineração, nas operações de separação sólido-líquido e clarificação. É o espessador, que utiliza o princípio da sedimentação e agregação – floculante e coagulação, sendo normalmente o primeiro estágio de desaguamento, ou seja, que separam a polpa por meio da adição de polímeros floculantes, com aproximadamente 50% de água (WANG et al., 2014a; CETEM/MCTI, 2013).

Mais um método possível de tratamento primário é a flotação, um processo que teve início no uso de separação sólido-sólido no processamento mineral - etapa de produção que seleciona diferentes minerais, que logo foi evoluindo e aplicado em outras finalidades. A tecnologia de flotação é flexível, pela possibilidade de diferentes utilizações, tais quais: como processo unitário - espessamento de lodo ou para remoção de contaminantes; processo de reciclagem da água processual; aplicado ao tratamento primário; como auxiliar do processo secundário; neutralização de drenagem ácida de mina com cal; remoção de produtos químicos; tratamento de sólidos flutuantes de espessantes - tanto para concentrados como para rejeitos (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002) e tratamento de água de processos de filtros de concentrados e drenagem do rejeito descartado (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018).

O DAF é visto como uma alternativa para a redução do consumo de água, pois possibilita a reciclagem da água da mina e consequentemente diminui a descarga da água da mina e economiza o consumo de água doce (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018). Pois o

diferencial do DAF são as bolhas geradas pelo bico de injeção, que melhor capturam os flocos ou coágulos de forma a agregá-los melhor, resultando na separação mais eficiente. Gerando uma camada de espessante grossa e estável, não havendo a necessidade de instalar coletor de espuma (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

Há diversos tipos de processos de flotação, porém o processo de flotação por ar dissolvido (DAF) é o método de flotação mais comumente utilizado no tratamento de efluentes industriais, expandindo-se para o campo da mineração (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002), independente da vazão de efluentes. Há uma diferença entre o método de flotação aplicado ao beneficiamento de minério e o processo aplicado ao tratamento de efluentes, uma vez que o objetivo especifico do processo de tratamento é a remoção/recuperação de compostos – íons, macromoléculas, tensoativos, separação de óleos, redução de matéria orgânica (DBO e DQO) (CETEM/MCT, 2010).

As vantagens dos processos de flotação, principalmente o DAF, são de cunho técnico e econômico, como, ótima qualidade da água tratada, fácil inicialização, lodo mais espessos do que outros processos de tratamento, alta seletividade de recuperação de componentes de valor, alta taxa de remoção de contaminantes, necessidade de pouco espaço de tanque de retenção e alta confiabilidade nas operações (RODRIGUES; RUBIO, 2007; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Porém, como desvantagens o processo DAF apresenta alto consumo de energia, habilidade profissional para a confiabilidade da operação, limitação do processo devido a velocidade do ar dissolvido, o alto custo operacional, principalmente, comparado aos métodos de coagulação, sedimentação e filtragem (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018).

Outro processo que consiste o tratamento primário é a desidratação, utilizado quando ainda é necessário retirar água adicional do lodo, formado após a desestabilização dos sólidos dispersos no meio aquoso, visando a redução de volume e aumento da resistência deste lodo para atender especificações de disposição segura. Havendo a necessidade do uso de energia externa – térmicas, mecânicas, elétricas ou uma combinação entre elas - para retirar a água residual presa nos poros dos sedimentos, por meio da utilização da diferença de propriedades físicas ou químicas para conseguir esta separação (WANG et al., 2014a). Com o objetivo de deixar o lodo com a menor umidade possível, a indústria de mineração utiliza diversas tecnologias para retirar este líquido dos lodos, como por exemplo, tipos de filtro prensas, de filtros rotativos, centrífugas e prensas desaguadoras (CETEM/MCT, 2010).

A técnica da filtração é considerada simples no processo de tratamento de águas residuais, utiliza-se um filtro poroso que permite que a água residual transponha, de modo que as impurezas e sólidos suspensos são retidos. Este filtro pode ser de diversos materiais, como

por exemplo, pedras, carvão ativado e areia, sendo este último o mais utilizado devido ao baixo custo e a disponibilidade. O processo de filtragem pode ser uma combinação de processos, incluindo a deformação mecânica, atividade química – floculação e coagulação realizadas anterior ao processo para melhorar a eficiência, adsorção e sedimentação (AL-GHOUTI et al., 2019).

Um desafio para o tratamento de sólidos suspensos nos efluentes de mineração são os sólidos finos, pois apresentam resistência na maioria dos processos de tratamento convencionais devido a seu tamanho, sendo extremamente difícil de separar da água residual e contribuindo para o acúmulo de lama nas barragens de rejeitos. Estes rejeitos finos interferem, principalmente, no processo de sedimentação convencional, além de que certos tipos de materiais da composição deste rejeito pode absorver a água na sua estrutura interna de forma a aumentar o volume do rejeito e interferir mais ainda na recuperação ineficiente da água nos rejeitos de minério (WANG et al., 2014a).

A maioria das tecnologias utilizadas para o tratamento de rejeitos de minerais são tecnologias de processos de concentração - beneficiamento de minério de ferro – modificadas, que passaram por um aprimoramento evolutivo. Porém nem todas são economicamente viáveis para tratar os grandes volumes de rejeitos diariamente. Ainda mais porque não existe uma única tecnologia para tratamento de efluentes, e sim uma combinação de diversos tipos de tecnologia que mitigue aos impactos ao meio ambiente (WANG et al., 2014a).

2.3.2.2 Tecnologias e processos do tratamento secundário na mineração

A etapa biológica é considerada como um estágio secundário do tratamento de efluentes, que possui como objetivo a estabilização de matéria orgânica ou a extração da matéria orgânica e nutrientes do efluente por meio de microrganismos específicos que podem reagir com cada tipo de contaminante determinado. Este método contribui com a retirada de sulfato e acidez, e possui uma eficiência na recuperação de metais contidos nos efluentes (TAO et al., 2019).

Os procedimentos utilizados no método biológico podem ocorrer em condições aeróbicas ou anaeróbicas, tratando tanto efluentes sólidos como gasoso – compostos orgânicos voláteis (VOCs), transformando material orgânico em outros compostos menos nocivos ao meio ambiente, estes processos podem ser utilizados individualmente – como um único processo de tratamento – ou em conjunto. Exemplos de procedimentos de tratamento biológico: lodo ativado, filtros biológicos, biodisco, lagoas, digestão anaeróbica, entre outros (CETEM/MCT, 2010).

Esta etapa secundária demonstra-se tecnologicamente e economicamente viável aos tratamentos convencionais físico-químicos, ganhando crescente apoio (DOBSON; BURGESS, 2007). Este tratamento é aplicado como uma forma de recuperar metais das águas residuais de processos de mineração, possuindo uma maior eficiência na remoção de sulfato e acidez das águas residuais, comparado aos métodos químicos tradicionais (TAO et al., 2019). Com vantagens como operação de sistemas passivos podem operar com uma parte dos custos de produção, menor produção de lodo úmido – correlacionado a processos oxidativos e hidrolíticos, menor necessidade de manutenção contínua – comparado a outros métodos de tratamento (COHEN, 2006). Porém, como desvantagens apresenta a necessidade de operação especializada – dificultando sua aplicação em pequenas minas (TAO et al., 2019), longo tempo de operacionalização e quantidade significativa de lodo biológico ao final do processo – havendo a necessidade de tratamento adicional (AL-GHOUTI et al., 2019).

O sistema de tratamento biológico é eficiente, porém está sujeito à vulnerabilidade por componentes tóxicos aos microrganismos que realizam o tratamento - algas, fungos e bactérias – resultando na contenção do crescimento destes microrganismos que utilizam os compostos a serem tratados como nutrientes (DOBSON; BURGESS, 2007). De modo que é importante em alguns métodos do tratamento secundário, medidas de controle e monitoramento da toxidade do componente, de modo a evitar problemas com o processo de biodegradação dos efluentes e resultar em falhas no sistema de tratamento (AL-GHOUTI et al., 2019).

O processo mais utilizado é o lodo ativado, principalmente, por ser considerado como uma tecnologia barata e simples, porém que requer um filtro com grandes dimensões, oxigênio e produção de lodo significativa no final (AL-GHOUTI et al., 2019). Em que se utiliza uma massa ativada de microrganismos em contato com o efluente de forma a estabilizar a matéria orgânica do efluente. As células de microrganismos são separadas do líquido, sendo que uma parte pode ser reaproveitada e introduzida ao efluente da entrada do tanque de aeração (CETEM/MCT, 2010).

O filtro biológico utiliza o fundamento do filtro para o tratamento de efluentes, pode ser realizado em condições anaeróbicas ou aeróbicas, porém seu diferencial são os microrganismos – bactérias ou fungos - anexados no filtro biológico, responsáveis pela eliminação dos compostos orgânicos e outros contaminantes, formam uma película viscosa no filtro, chamada de biofilme, que pode levar dias ou meses de desenvolvimento (MALAKAR et al., 2017). Há diversos tipos de processos que utilizam a biofiltração como base – biofiltro, filtro *biotrickling* e *bioscrubber* - em que os mecanismos básicos de remoção dos poluentes são parecidos, porém diferem nos microrganismos utilizados, concentração dos poluentes e o tipo de mídia do filtro.

Outro método utilizado na mineração é a lagoa, especificamente, três tipos: a lagoa aerada, lagoa anaeróbica e a lagoa facultativa (CETEM/MCT, 2010). As lagoas de estabilização de águas residuais são utilizadas em diversas regiões do mundo, consideradas como uma forma de produzir qualidade de efluente de qualidade satisfatória com menor necessidade de tratamento adicional. O desempenho e a eficiência das lagoas estão sujeitos a fatores ambientais, tais quais, quantidade de luz, temperatura do ambiente, pH, entre outros (SMYTH et al., 2018).

A lagoa aerada utiliza bactérias que utilizam o oxigênio para estabilizar a matéria orgânica, este oxigênio pode ser fornecido de forma natural - por meio da areação da superfície da lagoa pelo vento ou a fotossíntese de algas - ou mecânica - por meio de aeração induzida mecanicamente (SMYTH et al., 2018). Como um exemplo de utilização na mineração, este método eliminar o dióxido de carbono da água, elevar o pH e com a adição do oxigênio ao meio aquoso facilita a oxidação do Fe (II) e a formação de Fe (OH)3 (ALSAIARI; TANG, 2018).

A lagoa anaeróbica utiliza o fenômeno da digestão anaeróbica como metabolismo e depende da decomposição e a degradação da matéria orgânica em sustâncias estáveis por meio de microrganismos que atuam em ambientes deficientes em oxigênio. Durante este processo ocorre a geração do biogás, rico em metano e dióxido de carbono, que pode ser reutilizado como energia alternativa (WAINAINA et al., 2020). E a lagoa facultativa, mistura condições aeróbicas e anaeróbicas (CETEM/MCT, 2010), ou seja, possui uma camada anaeróbica no fundo da lagoa - local de sedimentação do lodo - e uma camada aerada na superfície da lagoa, abastecida de forma natural (SMYTH et al., 2018).

O processo de desnitrificação biológica é responsável pela redução sequencial de nitrato ou nitrito, por meio de intermediários gasosos - óxido nítrico e nitroso, esta redução de nitratos é regida principalmente por bactérias, sendo a maioria anaeróbica. A desnitrificação é utilizada no tratamento de águas residuais como forma de melhorar a qualidade da água. Porém apresenta um ponto negativo que é a geração de óxido nitroso (N2O), que contribui para o efeito estufa (LU; CHANDRAN; STENSEL, 2014).

Identifica-se que os efluentes orgânicos não podem ser estabilizados completamente somente pela digestão anaeróbica (PENG et al., 2020), pois cada condição – anaeróbica e aeróbica - apresentam importantes características. A anaeróbica é mais adequada para o tratamento de água residual com alta concentração biodegradável, utilização de menos energia e recuperação de nutrientes e bioenergia. Já a aeróbica é utilizada para água residual com baixa concentração de biodegradáveis, maior remoção de matéria orgânica biodegradável solúvel e menor efluente com concentração de sólidos em suspensão (CHAN et al., 2009).

Desta forma é vantajoso a combinação de sistemas de tratamento que utilizem tecnologias e processos de diferentes condições – anaeróbicas e aeróbicas (CHAN et al., 2009) ou processos e fenômenos de modo a combinar suas forças e benefícios para obter um tratamento mais eficiente (MALAKAR et al., 2017).

2.3.2.3 Tecnologias e processos do tratamento terciário

O tratamento terciário é comumente utilizado após os tratamentos primários e secundários, com o objetivo de tratar o efluente que contém componentes específico que não foram extraídos nos tratamentos anteriores e que afetam a qualidade do efluente. Os tipos de processos utilizados são considerados como processos combinados, podendo ser físicos, químicos e biológicos ou uma combinação de processos que utilizem estes métodos. Estes componentes podem ser íons, compostos orgânicos sintéticos, patogênicos, arsênio, fosfato, sais, cianeto, amônia, entre outros. (CETEM/MCT, 2010).

Para a aplicação de um dos princípios da economia circular no tratamento de efluentes é essencial a eficiência do uso de recursos, principalmente, a transformação de resíduo em recurso. O tratamento terciário é uma opção de tratamento que permite reuso da água residual e de componentes específicos, em grandes consumidores de água - como por exemplo a indústria - de forma a retornar esta água para a produção ou para outros processos industriais (MAKROPOULOS et al., 2018). Identifica-se que o tratamento terciário é aplicado por meio da combinação de diversos métodos e tecnologias (CETEM/MCT, 2010), como um meio de recuperar e reciclar a água residual (CUI et al., 2018).

Existem várias técnicas para a remoção de sulfato dos efluentes de mineração que podem ser divididos em passivos – são processos que utilizam a força da gravidade, produtos químicos naturais e processos biológicos – e ativos – são métodos que necessitam de dispositivos mecânicos, fornecimento contínuo de eletricidade, químicos e manutenção. Para a remoção do sulfato pode-se destacar os métodos: precipitação – por meio de gesso, calcário e polímeros; adsorção – por meio de carvão ativado, cinzas volantes, zeólitos modificados, biomassa, resíduos de papel e celulose, entre outros; troca iônica por resina; tratamentos biológicos e tecnologias de membranas (RUNTTI et al., 2018).

A etapa terciária pode utilizar procedimentos mais simples, como por exemplo, precipitação, adsorção, carvão ativado e abrandamento, de forma a retirar os contaminantes específicos dos efluentes de mineração. Como por exemplo, o abrandamento é utilizado para remoção - total ou parcial - da dureza do resíduo, que em geral resulta em incrustações nos

equipamentos industriais ou adsorção para a extração de íons cromo hexavalente, como forma de reduzir o custo com agentes redutores – químicos e bioredutores (CETEM/MCT, 2010).

Os métodos tradicionais para o tratamento de efluentes da indústria de mineração incluem a neutralização, precipitação química, tratamento microbiológico e separação de membrana. Além de que tecnologias de membrana – ultrafiltração (UF), microfiltração (MF), nanofiltração (NF), osmose reversa (RO) - estão sendo aplicadas para melhorar a reciclagem e eliminar as águas residuais do setor (CUI et al., 2018). Estas tecnologias em conjunto podem atingir os seguintes objetivos: dessalinização dos efluentes – evita a corrosão nos equipamentos de beneficiamento pela água recirculada, remoção de sulfato e recuperação de alguns componentes – íons de cobre, chumbo, ferro e manganês (CETEM/MCT, 2010).

A etapa de tratamento terciário utiliza, também, o método de flotação combinado com outros tipos de método. Principalmente a eletroflotação – combinado com células de eletrocoagulação ou eletrofloculação – que envolve os fatores como a densidade da corrente, tipo de material do eletrodo, pH, tamanho da bolha e concentração de eletrólitos (HACHA et al., 2018). Outros métodos são a flotação iônica, a flotação por ar dissolvido (DAF), que são responsáveis pela extração de compostos orgânicos e inorgânicos (CETEM/MCT, 2010) e de partículas finas e ultrafinas, de forma a garantir a qualidade da água para recirculação e descarte adequado.

Outros métodos utilizados no tratamento terciário são os processos oxidativos avançados (OAP) e a desinfecção. O primeiro tratamento objetiva a mineralização dos poluentes - conversão do C02 em ácidos minerais, ou seja, degrada os compostos orgânicos sintéticos por meio da geração de radicais livres. E a desinfecção para extrair algum microrganismo patogênico que possa atrapalhar a reutilização da água residual nos processos de mineração, como o processo de cloração que possui o menor custo e é o utilizado com mais frequência no setor (CETEM/MCT, 2010).

Atualmente utilizam-se amplamente métodos combinados no tratamento de efluentes na mineração, como por exemplo a ultrafiltração e a osmose reversa (CUI et al., 2018), pois a combinação de métodos físicos, químicos e biológicos que consigam embarcar os diversos componentes e toxinas presentes no efluente resultado dos processos de beneficiamento de minérios anterior (CETEM/MCT, 2010), de maneira eficiência e que reduza as externalidades negativas ao meio ambiente.

2.3.3 Tecnologias de tratamento e disposição de resíduos da mineração

As operações de mineração enfrentam um importante obstáculo relacionados com a diminuição do grau de minério, ou seja, geração de toneladas de rejeitos – destaca-se a oportunidade de recuperação de minerais finos destes rejeitos (PIETROBELLI; MARIN; OLIVARI, 2018). Outro desafio é o descarte dos efluentes de mineração sem tratamento que resulta em altos impactos ambientais, não somente ao redor da mina, mas em quilômetros de distância de sua localização. É um passivo ambiental que impacta a cadeia alimentar e produtiva, principalmente, por reduzir a capacidade de autopurificação e pela composição dos rejeitos – metais pesados (ANA: IBRAM, 2013).

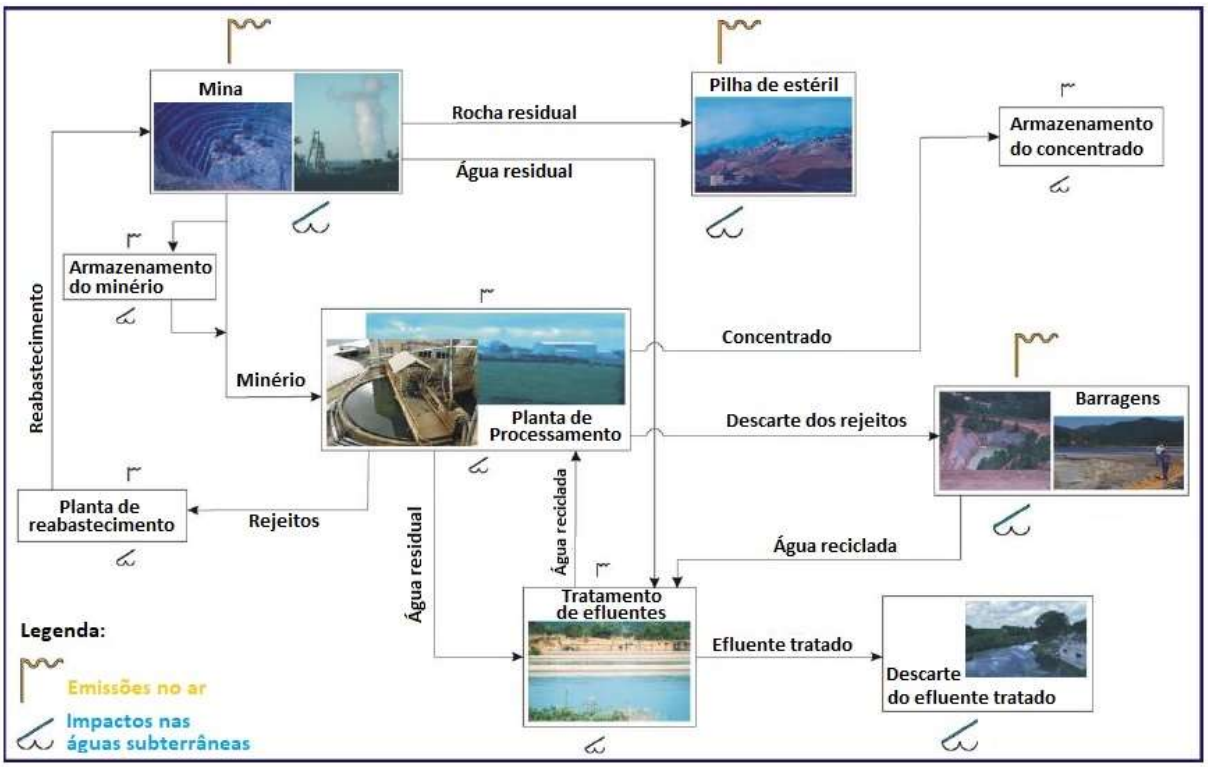
A indústria de mineração é extrativista intensiva, consequentemente gera uma quantidade enorme de rejeitos e resíduos processuais. As mineradoras brasileiras produzem e descartam cerca de 184 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro anualmente em barragens de rejeitos (DEFÁVERI et al., 2019). Este descarte e armazenamento geram riscos e passivos ambientais de alto impacto ao meio ambiente. A catástrofe ocorrida em 2015 com a violação da barragem de rejeitos Fundão, destaca-se como uma das maiores tragédias socioeconômicos da mineração mundial. A ruptura despejou 62 milhões de m^3 de lama que avançou por aproximadamente 663 km da localização da barragem do Fundão (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019). Os rejeitos de minério de ferro despejados ao meio ambiente cobriram 457,6 ha de Mata Atlântica e 1176,6 ha de área ribeirinha, afetando dois estados - Minas Gerais e Espírito Santo (GONÇALVES et al., 2019).

Os rejeitos são considerados como um material afino, denso, estável, cristalino (GALVÃO et al., 2018) de aparência turva e que contém pequenas partículas em suspensão com baixa capacidade de sedimentação (ANA: IBRAM, 2013). Porém, em geral a composição dos rejeitos de minério de ferro é composta por finos, hematita, sílica, óxido de ferro, alumina, manganês e potássio (FONTES et al., 2016; GALVÃO et al., 2018). As características dos resíduos de minério de ferro são diferentes entre minas em resposta a diversos fatores como as etapas dos processos de beneficiamento – tipo de reagentes ou tecnologia utilizado, tipo de minério bruto ou grau do depósito de minério (FONTES et al., 2016).

A indústria de mineração gera dois principais resíduos: estéril e rejeitos. Os rejeitos, são lodos advindos as etapas de processo de beneficiamento ou de etapas do tratamento de efluentes. Deste rejeito destaca-se dois tipos: rejeitos granulares – granulometria acima de 74 μm (IBRAM, 2016); e finos - lama com partículas de tamanho inferior a 10 μm (FREITAS et al., 2019) – que é um desafio para as tecnologias de concentração e tratamento de efluentes,

resultando em maior umidade do rejeito devido à dificuldade de separação sólido-líquido (WANG et al., 2014a). O estéril são resíduos sólidos de extração, ou seja, rochas com baixíssimo ou nenhum grau de minério (NORGATE; HAQUE, 2013), consiste em minérios pobres, sedimentos, solos e aparas (IBRAM, 2016).

Figura 11 - Fluxo de materiais e resíduos da indústria de mineração – processo de lavra e beneficiamento



Fonte: Autora "adaptado de" Durucan; Korre; Munoz-Melendez, 2006; p. 1059

É essencial analisar quais as tecnologias e métodos disponíveis para a disposição dos rejeitos da mineração, de forma a refletir a respeito dos impactos ambientais e dos riscos para comunidades ao redor. Os resíduos podem gerar passivos ambientais e danos ecológicos, como por exemplo, vazamento de poluentes tóxicos das barragens (WEISHI et al., 2018). Desta forma, a aplicação de tecnologias ambientais para a gestão de resíduos é uma ferramenta essencial, de modo a oferecer ao setor de mineração um desempenho ambiental significativo (GALVÃO et al., 2018) comparado ao desempenho econômico.

2.3.3.1 Impactos ambientais associados à Pilha de Estéril

O tipo de depósito para os resíduos advindos da retirada da camada de solo que ocorre no processo de lavra é chamado de pilha de estéril, são construídos perto do poço de mineração com a finalidade de descartar os materiais estéreis, ou seja, rochas que não possuem valor algum e que precisam ser removidos para permitir as operações de extração do minério de ferro. Porém, este tipo de descarte sem controle e gerenciamento pode oferece dois tipos de impactos: risco de geração de AMD - responsável por impactar o solo e as fontes de águas subterrâneas próximas as operações de mineração – ou interferir no escoamento superficial do solo em que são depositados – resultando em desvios de curso d'água (ANA: IBRAM, 2013).

Os impactos ambientais e os riscos associados ao depósito de estéril são significativos para a indústria de mineração, logo a regulamentação referente a este tipo de sistema de disposição ocasionou mais critérios técnicos de segurança e prevenção de riscos a impactos ambientais, ou seja, critérios geotécnicos e controle dos depósitos de resíduos (IBRAM, 2016). Destaca-se como forma de redução dos impactos deste sistema de disposição a utilização deste resíduo como material para recuperação de voçorocas e preenchimento de cavas exauridas no processo de lavra, ou seja, reciclagem e reaproveitamento deste material para outros fins (IBRAM, 2016).

2.3.3.2 Barragens de contenção e seus impactos

Atualmente, a estratégia mais utilizada para o tratamento de rejeitos de beneficiamento é a barragem de rejeitos, construída em vales à jusante das operações de mineração, são feitas de rochas residuais e do próprio lodo do processamento mineral – devidamente preparado (ANA: IBRAM, 2013). Os rejeitos dispostos nas barragens possuem alto teor de água, aproximadamente de 10% a 25% de sólido (IBRAM, 2016). Oferece uma forma de separação por sedimentação dos sólidos suspensos e da água residual restante após o tratamento de efluentes, pois o metal e sólidos dispostos na água ficam em um nível abaixo da água residual (NEDVED; JANSZ, 2006).

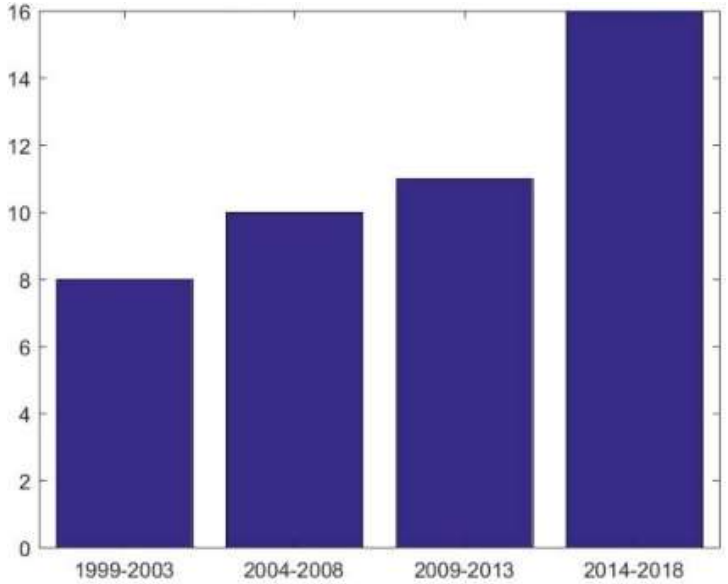
Apesar da barragem de rejeitos ser a mais utilizada pela indústria de mineração, está sujeita a falhas principalmente pelo tipo de estrutura de contenção selecionado, devido a água nos poros do rejeito, elemento gerador de instabilidade (IBRAM, 2016). As barragens exigem grandes áreas de ocupação para armazenamento dos rejeitos (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017), sendo necessário o estanque para impedir a infiltração dos efluente no solo e águas

subterrâneas, além de possui requisitos legais e normativos a serem seguidos (IBRAM, 2016). Possui alto custo de manutenção e monitoramento, além de apresentar um grande passivo ambiental com impacto direto no bioma local da mina e risco e instabilidades as comunidades próximas a barragem (BASTOS et al., 2016).

Quando há a falha de barragens de rejeitos ocorre a inundação do lodo contido pelos arredores da mineração, uma vez que esses rejeitos em quantidade significativa são tóxicos, e causa graves danos ambientais ao meio ambiente e para regiões vizinhas a barragem (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019). Há consequências trágicas como a devastação ecológica de ecossistemas - uma quantidade significativa de suspensos sólidos (SS) interferindo no oxigênio do rio, acarretando a morte da vida subaquática. Consequentemente, impactando indiretamente outros ecossistemas, como por exemplo, pássaros que se alimentam do rio ou realizam sua fase reprodutora no local.

Outro tipo de decorrência das falhas, é a influência na qualidade e abastecimento de água para regiões em torno da mineradora, ou até mesmo grandes impactos como gerar externalidades em outros estados e plantações de fazendas adjacentes (ARMSTRONG et al., 2019). Na Figura 12 é possível identificar que as falhas de barragens de mineração dobraram nos últimos anos.

Figura 12 - Representação de falhas de barragens de rejeito



Fonte: Armstrong; Petter e Petter, 2019; p. 2

A escolha do sistema de contenção de barragens e o tipo de estrutura depende de diversas questões técnicas – topografia, hidrografia, características geotécnicas, nível de

produção do rejeito – e não técnicas – menor custo de instalação e manutenção. Há três tipos de estruturações de barragens de contenção para a indústria de mineração, sendo elas, a montante, a jusante e pela linha de centro. O método a montante é o mais utilizado pelas mineradoras por ser considerado simples, de fácil execução e econômico, pois apresenta redução de custo de implementação e permite a menor relação entre volumes de areia e lama (IBRAM, 2016). Porém, é o método mais perigoso (ARMSTRONG et al., 2019).

O sistema de contenção a jusante é o mais estável, principalmente, porque nenhuma parte da barragem é construído sobre o rejeito depositado anteriormente e apresenta um maior controle do lançamento e compactação dos rejeitos, permitindo – se necessário – a instalação de sistemas de drenagem durante sua construção e alteamento. Ou seja, possui menor risco de instabilidade. Porém, comparado aos outros métodos, esta estrutura necessita de uma área maior, quantidade significativa de materiais para construção e consequentemente maior custo (IBRAM, 2016).

A barragem pelo método de linha de centro consiste em uma estrutura que mescla os dois métodos anteriores, somando vantagens e mitigando as desvantagens. A construção dos alteamentos é realizada verticalmente ao eixo do dique de partida, possibilitando dois pontos principais: redução de custo de implementação; e instalação de zonas de drenagem internas ao longo da fase de alteamento, proporcionando controle da estabilidade da barragem e da retenção da água contida nos poros dos rejeitos (IBRAM, 2016).

Alguns fatores não técnicos influenciam as falhas das barragens de rejeitos, entre eles: redução de custos operacionais e de manutenção e de controle; aumento da demanda de mercado; falha na legislação, regulamentação de agências governamentais e na fiscalização (ARMSTRONG et al., 2019). As falhas das barragens estão relacionadas a fatores naturais, como as chuvas, as características geotécnicas, o tipo de depósito (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019) e exploração de mina. O processamento de minério com menor teor de ferro, origina, consequentemente, maiores quantidades de rejeitos (ARMSTRONG et al., 2019).

Deste modo, a crescente preocupação mundial perante as falhas recorrentes nas barragens de rejeitos de mineração é uma importante pressão para que as indústrias do setor considerem alterações nos seus processos. Há três opções de tecnologias de processamento para redução da quantidade de água contida nos rejeitos: *thickened tailings*, *dry stacking* e *paste backfill* (ARMSTRONG et al., 2019). Essas tecnologias aumentam a concentração de sólidos nos resíduos de 10% a 25% nas barragens (IBRAM, 2016) a até 75% com as tecnologias *paste backfill* e *thickened tailings* (ARMSTRONG et al., 2019).

Outra oportunidade é a reciclagem e reutilização dos rejeitos como matéria-prima em novos processos, de modo, a converter o total de rejeitos da mina em coprodutos para outros processos industriais (EDRAKI et al., 2014). A reutilização dos rejeitos como uma solução para a destinação adequada, reduz o uso de aterros e mitiga as externalidades negativas consequentes deste sistema de disposição (DEFÁVERI et al., 2019).

2.3.3.3 Tecnologia Thickened tailings

Um dos principais problemas para o rompimento das barragens é o alto teor de água dos rejeitos, como solução destaca-se a tecnologia *thickened tailings*, que possui a desidratação como processo principal. Esta tecnologia reduz o risco de infiltração de íons, além de permitir economia de água e custos para a mineradora (HUAZHE et al., 2020).

Os rejeitos advindos desta tecnologia são mais concentrado e não segregantes (GAO; FOURIE, 2019), concentração de aproximadamente 55 a 75% de sólidos (ARMSTRONG et al., 2019), o valor acumulado de sólidos é bem parecido com a tecnologia *paste backfill*, o que difere os processos são as propriedades do fluxo do rejeito (IHLE; KRACHT, 2018). A vantagem desta tecnologia comparado aos rejeitos convencionais é o baixo consumo de água, mitigação da contaminação de águas subterrâneas e superficiais, redução do risco de impactos ambientais e facilidade na reabilitação do solo (GAO; FOURIE, 2019)

O processo de *thickened tailings* é visto como uma das tecnologias alternativa de melhores práticas para instalações de armazenamento de rejeitos (TSFs) mais sustentáveis, logo é comercialmente atraente para a indústria de mineração analisar o ciclo de vida do projeto, principalmente a avaliação de passivos futuros e para garantir o estabelecimento do ecossistema e sua reabilitação (CARNEIRO; FOURIE, 2020).

2.3.3.4 Paste Backfill e seus usos

O *paste backfill* é uma mistura de rejeitos da mineração desidratados, cimento e água que são utilizados para formar um material pastoso, com concentração de sólidos de 70% a 80% aproximadamente. Pode ser adicionado outros componentes como cinzas volantes, gesso e cal, de modo a alterar algumas características específicas do material - força, modulo de elasticidade, resistência à compressão uniaxial, entre outros - a depender da finalidade desta pasta (LIU et al., 2020).

Esta tecnologia é amplamente utilizado no setor de mineração, pois permite atingir o controle integrado dos rejeitos e áreas de subsidência (TAO et al., 2019), por meio do preenchimento adequado de cavas de mineração, sendo um meio de disposição para os rejeitos do setor de mineração. Possui uma durabilidade que determina a força e a permeabilidade do aterro da mina, além de reduzir os impactos ambientais advindos da disposição do rejeito, como por exemplo, a drenagem ácida de minas (LIU et al., 2020).

É um sistema de disposição de rejeitos adequado para áreas de subsidência passiva e ativa – ou seja, que ainda possuem atividades mineradoras no fundo. Como forma de evitar os problemas e impactos ambientais advindos dos sistemas de disposição tradicionais como desastres primários e secundários – diluição e perda do minério, fluxo de detritos no fundo do poço e poluição das águas subterrâneas. As propriedades que garantem sua estabilidade são pontos essenciais, como por exemplo, a permeabilidade (SUN; WANG; HOU, 2018).

2.3.3.5 Sistema de disposição Dry Stacking

O empilhamento a seco é tecnologia alternativa ao método tradicional de disposição por barragens que esta acendendo em significado para a indústria de mineração (SCHOENBERGER, 2016). Este método retira a umidade dos rejeitos de modo que o teor final fique em torno de 15% (AIRES et al., 2018), a desidratação pode ser realizada por filtro a vácuo ou a pressão. Os rejeitos secos são mais fáceis de manusear (SCHOENBERGER, 2016) e possuem menos perda de água para o meio ambiente - evaporação, infiltração, arrastamento físico do rejeito, entre outros (NORTHEY et al., 2016).

Os impactos ambientais são mitigados pelos benefícios desta tecnologia, tais quais: necessidade de menor espaço para disposição dos rejeitos (FRANKS et al., 2011); separação ideal entre a água e reagentes químicos do rejeito, evitando reações químicas responsáveis pelas potenciais toxidades – como a drenagem ácida por exemplo; facilidade para a reabilitação da mina. Porém apresenta alguns problemas técnicos, como gerenciamento de poeira, erosão dos rejeitos e gerenciamento de águas superficiais e, comparado aos métodos tradicionais, seus custos são mais altos (SCHOENBERGER, 2016).

A água e o acúmulo de umidade são críticos para a estabilidade desta tecnologia, deste modo é importante o planejamento e controle da reologia e inclinação das pilhas de rejeitos desta tecnologia, tal como, a geometria da pilha deve ser adequada a topografia do local. Pois a inclinação garante que as águas da chuva transcorram a pilha, evitando a concentração na

superfície da pilha, mantendo a secura das camadas e acumulando em valas posicionadas nas bordas externas das pilhas (STICKLAND et al., 2013).

As características do rejeito não interferem no método, podendo ser adequado por meio de análise de condições (SCHOENBERGER, 2016), porém quando o dimensionamento do rejeito é de granulação grossa, isto é, facilita o processo de desidratação. A eficiência do processo de desidratação nesta tecnologia garante a estabilidade e segurança do empilhamento, aumenta a extensão da reciclagem da água - reduzindo o consumo de água da mina (JOHNSON, 2018).

2.3.3.6 Reciclagem e reutilização dos rejeitos de mineração

O reaproveitamento gera benefícios tanto ao meio ambiente, como econômicos para a indústria, como por exemplo, minimiza a degradação ambiental, reduz os riscos da disposição de resíduos em grandes áreas, reduz os custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos rejeitos, além de reduzir a exploração de agregados naturais para fabricação de novos produtos. A indústria da construção civil apresenta um grande potencial de absorção de coprodutos da indústria de mineração, principalmente pelas características do material reaproveitado compatíveis com alguns produtos (BASTOS et al., 2016).

Alguns exemplos de uso de rejeitos de minério como coprodutos para outros processos produtivos podem ser citados: na infraestrutura rodoviária de forma a melhorar áreas urbanas não pavimentadas (BASTOS et al., 2016), na fabricação de concretos - já que a mistura mineral é um dos componentes essenciais para o concreto de alta tecnologia (WU et al., 2018), rejeitos de minério de ferro - ricos em compostos de hematita e sílica - como catalisadores em processos do tipo Fenton para tratamento de águas residuais (FREITAS et al., 2019), como compostos de tijolos ecológicos (WEISHI et al., 2018), na fabricação de argamassa de forma a fornecer propriedades mecânicas aprimoradas (FONTES et al., 2016), como material precursor para o compósito de geopoliméricos (DEFÁVERI et al., 2019), como adsorvente dos poços de águas subterrâneas contaminadas com sulfato (SADEGHALVAD; AZADMEHR; HEZARKHANI, 2016) e como pigmento para tintas sustentáveis - apresenta baixo custo e desempenho adequado, oferecendo diversas cores e texturas e evitando assim que a indústria de pigmentos reduza a quantidade de metais pesados na composição das tintas (GALVÃO et al., 2018).

Os problemas com os resíduos são uma ótima oportunidade para recuperar valor econômico significativo para a indústria de mineração (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). O desenvolvimento de tecnologias apropriadas para lidar com a disposição e o armazenamento

dos rejeitos das minas pode reduzir significativamente o impacto ambiental, sendo que a reciclagem e a reutilização destes rejeitos como um coproduto de outros processos é visto como uma alternativa de mantem o valor em potencial do material (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

2.4 MODELO DE ANÁLISE

Este estudo parte do pressuposto de que o ciclo técnico da economia circular aplicado aos processos da indústria de mineração, lavra e beneficiamento, podem mitigar por meio da circularidade nos processos e a difusão e adoção de inovações tecnológicas o impacto ambiental causado pelo setor extrativista (JESUS et al., 2019; KINNUNEN; KAKSONEN, 2019; LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017; VELENTURF et al., 2019). O avanço da tecnologia que reduz as externalidades negativas ao meio ambiente é necessária para lidar com os desafios para difusão e adoção de iniciativas ambientais e a aplicação do modelo circular, principalmente em um setor como a mineração (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). O ambiente institucional pode servir como obstáculos ou como incentivador da difusão e adoção de iniciativas ambientais (RANTA et al., 2018). Portanto, identificar as barreiras que as inovações ambientais tecnológicas – ferramentas da economia circular – estão sujeitas, permite entender como a circularidade pode ser difundida e aplicada na dinâmica setorial da indústria de minério de ferro.

O Quadro 9 apresenta as categorias teóricas deste estudo, baseado na aplicação dos princípios da economia circular aos processos de lavra e beneficiamento na indústria de mineração, pois o intuito final do trabalho é analisar a circularidade do processo de minério de ferro por meio da difusão de iniciativas e inovações ambientais tecnológicas.

Quadro 9 – Categorias e subcategorias teóricas do estudo

Categorias	Subcategorias	Descrição	Autores
Princípio 1	Conservação do capital natural por meio da gestão de recursos finitos e renováveis	O capital natural deve ser conservado e aprimorado, por meio do gerenciamento dos materiais finitos e o uso de recursos renováveis. De forma a escolher o melhor processo e equipamento que gere menor externalidade.	JESUS et al., 2019; EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KORHONEN et al., 2018; MILLAR; MCLAUGHLIN; BÖRGER, 2019; MORAGA et al., 2019; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; SUÁREZ-EIROA et al., 2019; TAM; SOULLIERE; SAWYER-BEAULIEU, 2019; VELENTURF et al., 2019

Continua...

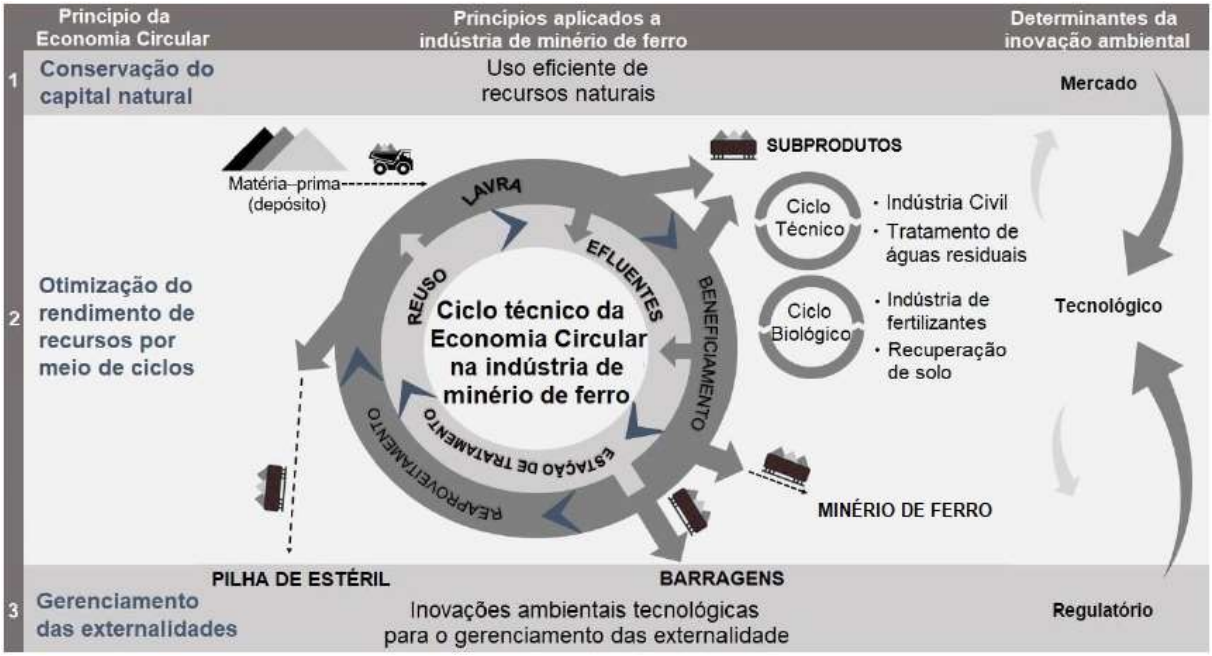
Conclusão

Princípio 2	Etapas dos processos de lavra e beneficiamento na indústria de mineração	Na indústria de mineração, há a possibilidade de recirculação de água em etapas do processo e a utilização dos rejeitos, tanto do processo de lavra como de beneficiamento, mantendo o valor do material no sistema, de forma a criar uma circularidade e otimizar o uso de recursos finitos e renováveis.	EMF, 2012; EMF, 2013; EMF, 2015; KORHONEN et al., 2018; MORAGA et al., 2019; MURRAY; REIKE; VERMEULEN; SKENE; HAYNES, 2017; WITJES, 2018; SEHNEM et al., 2019
Princípio 3	Inovações ambientais para o gerenciamento das externalidades negativas ambientais geradas pela indústria de mineração	A indústria de mineração deve realizar o tratamento de efluentes e rejeitos de forma a mitigar os impactos ambientais. A utilização de inovações tecnológicas de forma a facilitar a circularidade no processo ou em outros processos, reduzindo as externalidades negativas.	EMF, 2012; EMF, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016b; KANDA et al., 2019

Fonte: Autora

A Figura 13 apresenta os três princípios da economia circular, destacando o ciclo técnico das etapas de lavra e beneficiamento e novos processos industriais a partir do tratamento dos efluentes, rejeitos e emissões. O modelo apresenta a utilização de energia alternativa renovável, o reaproveitamento de recursos no processo e o aproveitamento de rejeitos como subprodutos em novos processos industriais. Além de utilizar os autores apresentados no referencial teórico na descrição do modelo a seguir.

Figura 13 - Modelo de análise do ciclo técnico da indústria de mineração



Fonte: Autora

O primeiro princípio da economia circular visa a conservação do capital natural por meio da gestão de recurso finitos e renováveis. O modelo de economia circular aplicado e desenvolvido no setor de mineração pode oferecer soluções significativas para adversidades da conservação do capital natural, tais quais, desperdício de recursos, poluição ambiental e escassez de recursos naturais. A mineração é uma atividade inerentemente extrativista, em que se realiza a retirada de material de depósitos de minério de ferro (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). Para a realização da extração do minério no processo de lavra, previamente deve-se desmatar a região do depósito e usar de explosivos para desbastar o solo e retirar material – ganga e minério de ferro (AZARYAN et al., 2018). A indústria de mineração de ferro precisa da utilização de água em seus processos, porém oferece riscos externos ao ecossistema, comunidades adjacentes e indústrias do entorno. Estes riscos estão sujeitos à infraestrutura nas operações de mineração que são influenciadas pelo clima e hidrologia local, pela geoquímica do corpo de minério e as estratégias da empresa de gerenciar a descarga minada, os processos de separação sólido-líquido e métodos de armazenamento de rejeitos. Há o consumo de água na lavra para a supressão de poeira (NORTHEY et al., 2016), consumo de água nas etapas de separação do minério da ganga no beneficiamento, energias não renováveis – principalmente o combustível fóssil utilizado no maquinário (IMMINK; LOUW; BRENT, 2018) e consumo energético para os equipamentos de cominuição – devido a quantidade produzida o setor torna-se eletrointensivo (CETEM/MCT, 2010).

Logo, uma oportunidade de aplicar o primeiro princípio circular seria no gerenciamento do consumo de água e energia elétrica, principalmente, na aplicação de energias renováveis e biocombustíveis, além de tecnologias e iniciativas de consumo eficiente dos recursos hídricos. De modo a equalizar as entradas das operações de mineração com os outputs, reduzindo a aceleração da exploração de recursos. Como uma forma de mitigar os potenciais riscos ambientais do processo e conservando os recursos finitos e renováveis (VELENTURF et al., 2019), minimizando o desperdício de recursos e a poluição e degradação ambiental (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

O segundo princípio da economia circular visa a otimização do valor do produto e material, por meio da recirculação no processo ou em novos processos, separando este cascateamento em ciclo técnico e biológico (EMF, 2015). A mineração se encaixa como ciclo técnico, considerando que o minério de ferro e seus rejeitos são considerados fluxos de materiais que não podem retornar à biosfera de forma apropriada (EMF, 2017a). Para que o sistema mantenha o ciclo sem comprometer a eficácia, há a necessidade de melhorias contínuas no processo (EMF, 2015). O segundo princípio da economia circular aplicado a indústria de

mineração, pode ser visto com o objetivo de manter o valor dos materiais utilizados e gerados pelo processo extrativista, criando uma circularidade e otimizando o processo por meio do uso eficaz dos recursos (MORAGA et al., 2019). Pois potencialmente os resíduos da mineração contém recursos energéticos e minerais valiosos para outros processos, que por meio da criação de novas demandas do mercado, melhoria dos preços das *commodities* e desenvolvimento de novas tecnologias pode ser aproveitado pelo setor (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

Conforme observado na Figura 13, o ciclo técnico da economia circular aplicado a indústria de mineração de ferro apresenta duas oportunidades de criação de ciclos, o ciclo de efluentes – cinza claro - e o ciclo de resíduos minerais – cinza escuro. Os processos de lavra e beneficiamento geram efluentes que após intervenção nas estações de tratamento podem ser reutilizados novamente no início do processo. O tratamento dos efluentes em estações e a recirculação de água nos processos de lavra e beneficiamento, reduzem o *input* das operações e auxilia a empresa na preservação do consumo de água doce potável (PESTRYAK, 2015).

Considerando o ciclo em cinza escuro – resíduos minerais, o processo de lavra gera o estéril como resíduos que pode ser direcionado para a pilha de estéril – forma de disposição destes resíduos – ou considerado como subproduto, ou seja, reaproveitado como matéria prima no processo de outras indústrias. Na etapa de beneficiamento são gerados os rejeitos que podem ser direcionados para as barragens – disposição mais comumente utilizada no setor mineral – ou considerado como subproduto. Identifica-se a reutilização de subprodutos como oportunidades para oposição ao descarte e como forma de redução dos impactos ambientais, como por exemplo, a reutilização de resíduos sólidos como preenchimento de cavas exauridas de minas – lavra (IBRAM, 2016), ou utilização de rejeitos como coprodutos para materiais da construção civil (WU et al., 2018). Essas formas de aproveitamento reduzem as externalidades negativas da poluição potencial do Princípio 3 da economia circular, por exemplo, instabilidade de barragens de rejeitos, contaminação de água e solos por substâncias tóxicas (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

O terceiro princípio é responsável pelo gerenciamento das externalidades negativas, de modo a proporcionar eficácia no sistema e redução de danos, tais quais, emissão de substâncias tóxicas, poluição da água e solo, entre outros (EMF, 2015). Há oportunidades de aplicação do terceiro princípio nos dois processos principais – lavra e beneficiamento. Uma vez que geram externalidades negativas, tais quais, resíduos sólidos, poeira, emissão de gases de efeito estuda (GEE), desmatamento da vegetação natural, alteração na topografia da região – interferindo no escoamento de águas superficiais (DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDEZ, 2006), geração de grandes volumes de rejeitos e consumo intensivo em energia (WEISHI et al., 2018).

Desta forma, a utilização de tecnologias ambientais para o tratamento de efluentes e o disposição e armazenamento de rejeitos de maneira segura são maneiras de lidar com as externalidades negativas (WANG et al., 2018a), de modo a reduzir os passivos ambientais do setor e facilitar a circularidade no processo – como recirculação de água e rejeitos, as externalidades geradas nos ecossistemas e comunidades adjacentes ao processo de mineração (KORHONEN et al., 2018).

Existem fatores determinantes que incentivam a difusão e o desenvolvimento de iniciativas de inovação ambiental nas organizações, podendo ser três principais: regulatória; de mercado; e tecnológica (CHEN et al., 2018; LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Estas iniciativas de inovação ambiental são resultados da preocupação com o desenvolvimento sustentável e da interação destes fatores determinantes em um contexto específico e a resposta da organização para compreender estas forças impulsionadoras (LIU; YAN, 2018).

Portanto, a pressão regulatória ambiental resulta em custos ambientais para a empresa gerando um aumento da pressão financeira sobre os processos de produção, consequentemente enfraquecendo a competitividade da empresa no mercado. Ou dependendo da sua formulação pode incentivar a difusão da inovação e investimento em iniciativas verdes na empresa (CHEN et al., 2018). Por isso, é importante a formulação de regulamentos inteligentes para desempenhar uma função de forma motriz da inovação ambiental (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). A pressão de mercado decorre de clientes, fornecedores, mídia, entre outros, que reforçam a necessidade do atendimento de requisitos ambientais por parte da empresa, principalmente quando o incentivo advém do mercado internacional (CHEN et al., 2018). Estas pressões podem ser vistas como oportunidades de inovações ambientais geradas pelas tendências do mercado. A pressão tecnológica é um dos pontos que propiciam a inovação ambiental, por meio da capacidade tecnológica da empresa e conhecimento adquirido por meio de fontes externas (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Os recursos tecnológicos de uma empresa podem construir estoque de capital – físico, social e de conhecimento – de modo a desenvolver novos produtos e processos (HORBACH, 2008).

Deste modo, como os *stakeholders* avaliam a legitimidade das empresas fundamentado no conhecimento das iniciativas e práticas ambientais organizacionais (CHEN et al., 2018) quando uma empresa se envolve em violações ambientais, pode haver impactos na sua legitimação, principalmente, advindos de pressão regulatória e de mercado. Por exemplo, evasão de investidores, recusa do produto por consumidores, aumento de tarifas e regulamentações por parte do governo, podendo até gerar pressão pela interrupção das operações da empresa (LI et al., 2017). Considerando o contexto de atividade do setor mineral

e os rompimentos de barragens recentemente (ARMSTRONG et al., 2019), fez com que o setor mineral sofresse pressões de diversas partes interessadas dentro de um contexto institucional específico.

Deste modo, o fechamento de ciclos e o consumo eficiente de energia, água e recursos naturais, além do uso de energia renovável no setor de mineração é necessário (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016). Uma vez que, todas as etapas da operação de mineração, dos processos de lavra e beneficiamento, podem ser integradas com os princípios da economia circular (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019) que é a preservação e conservação do capital natural – gerenciando recursos finitos e renováveis, otimização e a circulação dos recursos e materiais nos ciclos de produção e com isso reduzir as externalidades negativas advindas das atividades industriais (EMF, 2015).

3 MÉTODO DE PESQUISA

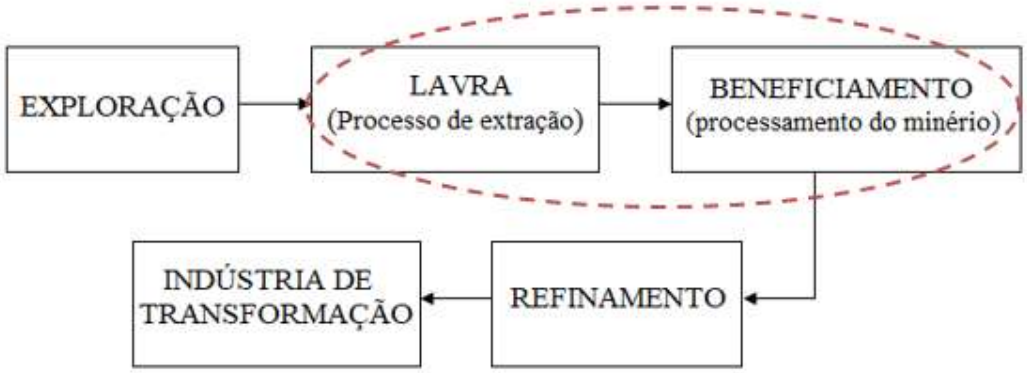
Para melhor compreender o fenômeno que será analisado a pesquisa utilizará a abordagem qualitativa, descritiva e por meio do método de estudo de casos múltiplos. O presente capítulo está dividido em três seções: a abordagem da pesquisa, os instrumentos de coletas de dados e as formas de análise e tratamento de dados.

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem metodológica utilizada será o estudo de caso. A metodologia de estudo de caso auxilia o entendimento de fenômenos sociais complexos, pois o pesquisador consegue obter uma perspectiva do contexto, por meio do enfoque do caso estudado (YIN, 2015) e da possibilidade de lidar com diversas "variáveis" a serem observadas (YIN, 1981). A escolha dos casos a serem estudados é essencial para a pesquisa, pois permite reproduzir a teoria emergente (EISENHARDT, 1989).

A abordagem de estudo de caso pode ser utilizada para diferentes finalidades, como o fornecimento da descrição de fenômenos, teste de teorias já existentes e auxílio na criação de novas teorias. Este método é estritamente ligado em evidências empíricas retiradas dos casos (EISENHARDT, 1989). O estudo do contexto busca entender o que é e como ocorrem os fenômenos (YIN, 2015), contribuindo com uma melhor compreensão e fornecimento de insumos para a análise dos trabalhos de pesquisa.

Figura 14 - Delimitação do escopo da pesquisa na indústria de minério de ferro



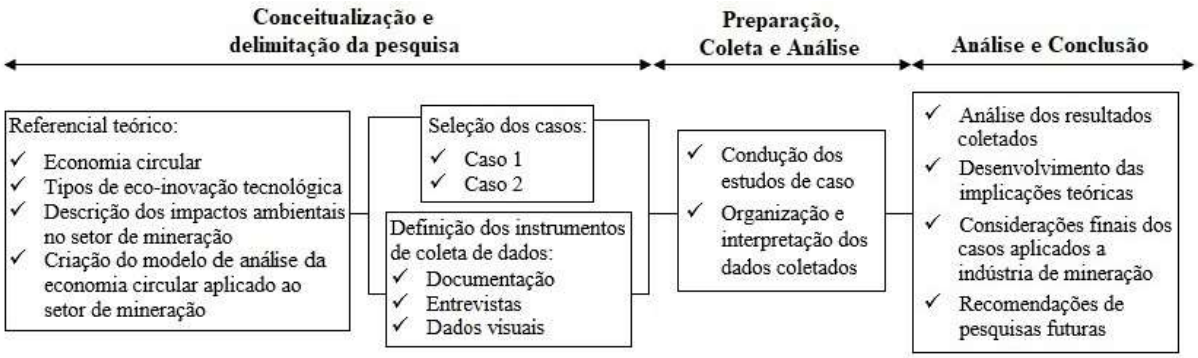
Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Jeswiet; Skeres, 2016

Optou-se pelo recorte dos processos de lavra e beneficiamento para o desenvolvimento do estudo, pelo fato de serem os principais da indústria de mineração (BOBICKI et al., 2020) e o setor de minério de ferro está envolvido em grandes tragédias e desastres ambientais ocorridos no Brasil no período de 2015 a 2019 (ARMSTRONG et al., 2019), sendo o resíduo e rejeitos destes dois principais processos um grande passivo ambiental para o setor.

3.2 ESTUDO DE CASO MÚLTIPLO

O estudo de caso múltiplos proporciona diferentes prismas do problema (CRESWELL, 2007) e as evidências coletadas por este método traz mais robustez para o estudo (YIN, 2015). Por esse motivo, esta abordagem foi escolhida para estudar a questão de pesquisa proposta: Como as barreiras institucionais dificultam a difusão da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração de ferro? Desta forma, o desenvolvimento do presente estudo compreende as seguintes etapas, conforme observado na Figura 15.

Figura 15 - Etapas do desenvolvimento do estudo de casos múltiplos na indústria de mineração



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Yin, 2015

Na primeira etapa, conceitualização e delimitação da pesquisa, foi desenvolvida a base conceitual apresentada no referencial teórico, que contextualiza os principais conceitos do estudo, economia circular e inovação ambiental, aplicados na indústria de mineração de ferro, permitindo assim a criação do modelo de análise da economia circular aplicada a produção de minério de ferro. Este início possibilitou a seleção da amostra teórica e delimitação das unidades de análise, seguindo os objetivos da pesquisa.

Na etapa seguinte, preparação, coleta e análise, realizou-se a coleta de dados, por meio de instrumentos de coleta de dados qualitativos – análise documental e entrevistas semiestruturadas, além da organização destes dados e informações dentro dos três princípios da economia circular.

A última etapa, análise e conclusão, foi realizada a análise de quadros sínteses dos resultados da pesquisa de campo, por meio da comparação dos resultados dos casos e validação das unidades de análise, dentro das categorias de análise da economia circular, desenvolvidas por meio da análise da literatura. Permitindo identificar as principais contribuições do estudo e apresentar recomendações de estudos futuros, assim como as limitações da pesquisa.

A seleção dos casos mais adequados para o estudo foi feita a partir de empresas mineradoras diferentes ou da mesma empresa, principalmente, devido à complexidade da geologia do minério de ferro, ou seja, não existe dois depósitos de minério de ferro com as mesmas características geológicas, acarretando em diferentes soluções tecnológicas e processos aplicados (PIETROBELLI; MARIN; OLIVARI, 2018). Desta forma, identifica-se oportunidades de inovações tecnológicas e diferentes aplicações de processos de cada mina, mesmo que da mesma empresa.

Figura 16 - Relação dos casos entrevistados

Fonte: Autora

Para a escolha dos casos, optou-se pelo recorte entre as 04 maiores empresas do setor de mineração, considerando que estas empresas são as principais produtoras de minério de ferro do Brasil, em porcentagem de participação da empresa no valor total da comercialização da produção mineral (ANM, 2019). A definição desta escolha está baseada na localização de minas de minério de ferro das empresas – no estado de Minas Gerais, na atuação das empresas no mercado exterior e no PIB brasileiro e pela complexidade do processo utilizado – processos de beneficiamento é baseado na estratificação de partículas de minério de ferro em um meio aquoso, que possui maior impacto ambiental. Esta escolha de casos contribuiu para responder à questão de pesquisa e objetivos da presente pesquisa.

Figura 17 - Principais empresas produtoras – 2017

Empresa	UF	Participação (%)
Ferro		
Vale S. A.	PA, MG	79,17
CSN Mineração	MG	5,84
Anglo American Minério de Ferro Brasil S. A.	MG	5,01
Nacional Minérios S. A.	MG	1,93

Fonte: Autora “adaptado de” ANM, 2019

O quadrilátero Ferrífero, localizado no estado de Minas Gerais, é uma importante região de mineração de ferro no Brasil conhecido pelos seus depósitos. Com produção de larga escala a partir da segunda metade do século XX (HATJE et al., 2017). Considerando a produção bruta de minério de ferro em 2017 o maior estado produtor é Minas Gerais com 406.877.966 toneladas, seguido do Pará com 168.495.286 toneladas e Mato Grosso do Sul com 5.020.295 toneladas (ANM, 2019).

As unidades de análise foram escolhidas seguindo o objetivo da pesquisa, optou-se por um recorte de empresas mineradoras, além de complementar este recorte com depoimento de especialistas, consultorias e institutos, de tecnologia e pesquisa do setor de mineração Brasileiro, em especial de minério de ferro. O objetivo é trazer informações adicionais as adquiridas com as mineradoras, de modo a triangular esforços e projetos relacionados a área ambiental do setor e das mineradoras envolvidas nos casos.

A pesquisa de campo foi realizada entre os meses de fevereiro a maio de 2020, quando foram contactadas as principais indústrias de minério de ferro do setor mineral brasileiro, fundamentados em um recorte de complexidade do processo e atuação das empresas no mercado exterior, solicitando autorização para entrevistas e visitas à unidade para realização da

pesquisa. No entanto, em decorrência da paralização das atividades devido a pandemia global do COVID-19, ocorrida entre os meses de março a maio, as entrevistas foram realizadas remotamente via plataformas online ou telefone, e as visitas às unidades de mineração dos casos foram impossibilitadas. Considerando este contexto, a pesquisa seguiu utilizando outras fontes de evidências que foram suficientes para atingir ao objetivo proposto, como por exemplo, entrevistas, registro em arquivos e documentação.

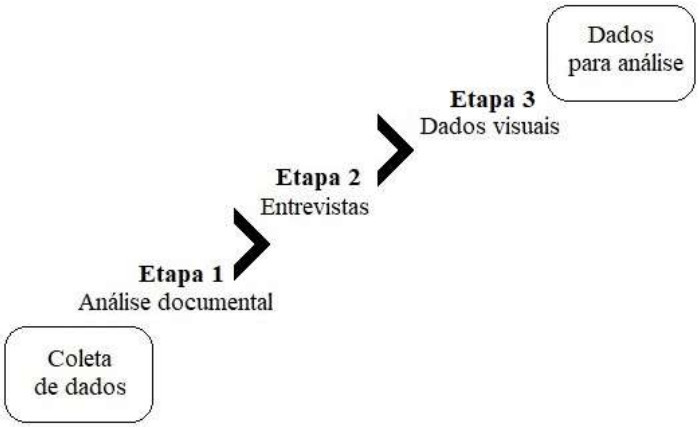
3.3 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

O método de estudo de caso pode envolver a coleta de diferentes dados, primários ou secundários, tais quais, arquivos, documentos, entrevistas, questionários e observação direta e indireta, resultando assim em uma estratégia de pesquisa com foco na compreensão da dinâmica do fenômeno estudado dentro de um contexto único (EISENHARDT, 1989).

Pode-se utilizar evidências qualitativas e quantitativas no estudo de caso, como pode utilizar diversas fontes de dados durante a coleta, sendo as mais frequentes, documentos, entrevistas e observação direta e indireta (EISENHARDT, 1989). Esta combinação de evidências permite manter o foco na questão de pesquisa resultando em uma melhor análise. Por meio da integração cíclica entre informações do caso e a literatura já existente há a construção e a compreensão da realidade em que o fenômeno estudado ocorre (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007), possibilitando a conferência desta realidade com as informações coletadas.

É comum observar a combinação de vários métodos de coletas de dados no método de estudo de caso (EISENHARDT, 1989), pois quando baseado em diversas fontes de evidência a contribuição do trabalho será mais acurada e o pesquisador terá perspectivas do fenômeno estudado. Destaca-se que os instrumentos de coleta de dados são de natureza complementar (YIN, 2015). Desta forma, o presente estudo utilizará diversos instrumentos de coleta de dados, tais quais, documentação, entrevista com funcionários e especialistas do setor de mineração e dados visuais, sendo elas, segundo Yin (2015), as mais usadas em pesquisas de estudo de casos.

Figura 17 - Etapas da coleta de dados



Fonte: Autora

O primeiro instrumento de coleta de dados, a análise documental, é a forma de obter a linguagem usual dos participantes e a criar confiabilidade para a fase de triangulação de perspectivas, pois auxilia a verificação de informações relatadas em entrevistas e informações coletadas por meio da observação durante as visitas, de forma a retratar a verdade do contexto descrito nos arquivos (CRESWELL, 2010; YIN, 2015). Para o presente estudo optou-se por analisar os relatórios de sustentabilidade, documentação administrativa, descritivo de processos e fluxos internos, estudos, publicações no site da empresa, mapas e demais documentos da indústria de mineração, de forma a investigar os aspectos ambientais do setor em que as unidades de análise estão inseridas.

A entrevista como instrumento de coleta de dados, segundo Yin (2015) é uma rica fonte de informações, pois os entrevistados possuem um alto-conhecimento do assunto tratado, além de trazer *insights* importantes sobre o contexto e sobre novas fontes de evidências que podem contribuir ainda mais com o trabalho. As entrevistas foram realizadas com atores envolvidos na indústria de mineração, funcionários e especialistas. O principal objetivo com este instrumento de coleta de dados é reunir as informações sobre o setor e as tecnologias ambientais utilizadas e como elas auxiliam a implementação do modelo de economia circular, além de identificar os principais obstáculos do modelo de análise proposto no Capítulo 2.

Deste modo, optou-se por duas categorias de seleção para entrevistas, especialistas e mineradoras, atuantes diretamente e indiretamente com a indústria e operações de mineração de ferro. Ou seja, fornecendo uma visão interna e externa, de forma a evitar viés. Entende-se que estas entrevistas forneceram informações e contribuições cruciais para o estudo de maneira a entender os determinantes e desafios para o setor de mineração de ferro e a atual difusão da inovação ambiental tecnológica na implementação do modelo de economia circular no setor.

Os critérios utilizados para a seleção de entrevistados – especialistas - para complementar as entrevistas das unidades de análise dos casos - mineradoras, foi a percepção de atores externos as empresas mineradoras, principalmente de instituições e centros de tecnologia e inovação do ramo da indústria de mineração, para a obtenção de uma visão holística do fenômeno, de forma a permitir uma análise integrada e imparcial sobre as oportunidades e a implementação de tecnologias ambientais nas indústrias de mineração. Para a seleção dos especialistas optou-se pelo critério do nível de percepção e compreensão tecnológica, de processos operacionais do setor - considerando a extração específica do minério de ferro, e o entendimento das questões ambientais que cercam a indústria mineral. No Quadro 10 é possível identificar a codificação dos entrevistados das unidades de análise – mineradoras – e dos especialistas, de forma a assegurar o anonimato dos entrevistados.

Nos apêndices A, B e C encontram-se o protocolo de estudo de caso, que possibilitou organizar informações que não foram encontradas nas fontes documentais. De modo a captar informações dos entrevistados a cerca de quatro segmentos, sendo eles: uso de energia alternativa, consumo de água, tratamento de efluentes e disposição de resíduos – rejeito e pilha de estéril. Estes segmentos fazem parte das categorias de análise dos resultados da pesquisa, além de serem fundamentados nos princípios da economia circular.

Quadro 10 - Códigos de referência dos entrevistados na pesquisa

Cargo do entrevistado	Código	Tempo de duração
Coordenadora de Desenvolvimento Sustentável – Gerencia de Meio Ambiente - Mineradora 1	EMP1-A	48 minutos
Coordenador de Recursos Hídricos e Monitoramentos Ambientais - Mineradora 1	EMP1-B	1 hora e 08 minutos
Consultor de Barragens - Mineradora 1	EMP1-C	57 minutos
Especialista em energia - Mineradora 1	EMP1-D	32 minutos
Analista Especialista Meio Ambiente - Mineradora 2	EMP2-A	1 hora e 46 minutos
Engenheiro especialista - Mineradora 2	EMP2-B	1 hora e 09 minutos
Engenheiro especialista - Mineradora 2	EMP2-C	55 minutos
Community Partner - Especialista de inovações abertas de mineração	ESP1	42 minutos
Gerente de Pesquisa e desenvolvimento - Especialista de mineração - Instituto brasileiro de Mineração	ESP2	1 hora e 15 minutos
Gerente de Sustentabilidade - Especialista de mineração - Instituto brasileiro de Mineração	ESP3	1 hora e 15 minutos
Tecnologista Pleno - Coordenação de Processos Minerais - Centro tecnológico de mineração	ESP4	34 minutos
Diretora Executiva - Consultoria de mineração - Especialista em mineração	ESP5	57 minutos

Fonte: Autora

As entrevistas realizadas com os entrevistados foram conduzidas via plataformas online - como *Skype*, *Microsoft Teams*, *Hangout Google* - ou telefone, com duração média de 40 minutos por entrevista. Todas as entrevistas foram gravadas e transcritas para auxiliar na análise de conteúdo dos dados e as codificações. Ao longo das entrevistas alguns dos tópicos estudados foram emergindo anteriormente as questões em relação ao assunto serem abordadas, portanto, foram incorporados na análise, assim como as informações disponibilizadas pelos entrevistados em outras fontes de dados. Alguns dos resultados foram apresentados aos entrevistados para adição de comentários e informações complementares, de modo a contribuir informações para o texto e aumento da robustez da pesquisa.

A etapa de dados visuais foi realizada com a análise de vídeos e fotos de etapas de processos de mineração, equipamento e tecnologias disponíveis nas operações. De forma a compreender melhor o funcionamento dos processos de cada caso e sua ligação com as categorias da economia circular identificadas na revisão da literatura. Esses dados visuais contribuíram, de certa forma, para substituir a observação que seria realizada na pesquisa de campo, impossibilitada pela pandemia.

O estabelecimento de limites do estudo, além da escolha cuidadosa do local e indivíduos a serem estudados, auxilia na limitação do viés durante a coleta de dados (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007; CRESWELL, 2010). Principalmente, deve-se coletar dados suficientes a ponto de atender as questões primordiais da pesquisa, como obter evidência confirmatória – de diferentes fontes de coleta - para os tópicos do estudo (YIN, 2015).

3.4 FORMAS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

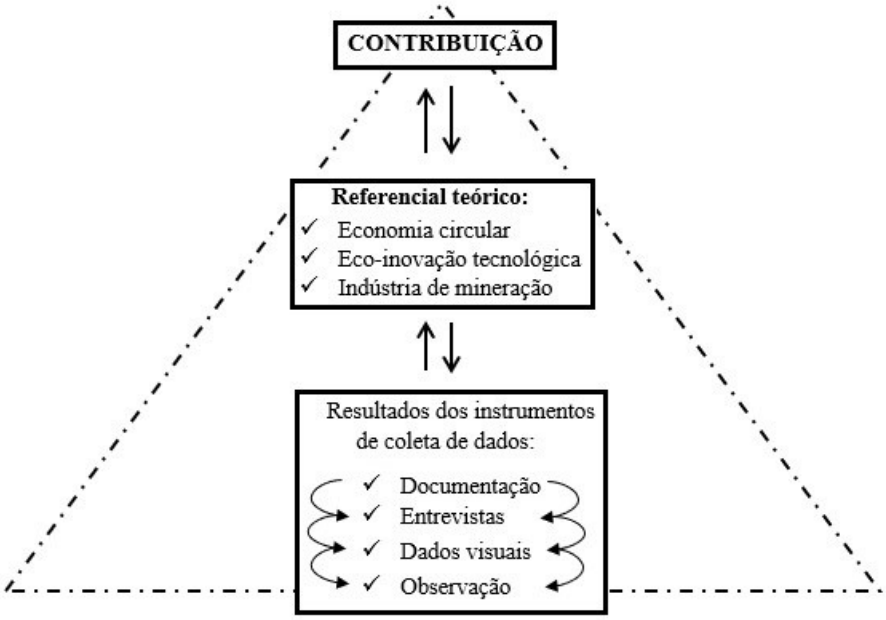
O processo de tratamento e interpretação de dados envolve uma profunda reflexão dos dados, principalmente por ser a etapa que atribui sentido aos dados coletados na pesquisa de campo, em que se pode empregar diversos tipos de análise, tanto na preparação como na interpretação dos dados (CRESWELL, 2010). É nesta etapa em que se organiza os dados coletados em campo, os preparando para a leitura cuidadosa e analítica, sendo necessário manter o foco na questão de pesquisa.

Para trazer credibilidade e confiabilidade para o presente estudo, será utilizada a convergência de diversas fontes de evidências, ou seja, a triangulação dos dados coletados, pois é uma forma de auxiliar na reflexão da complexidade do fenômeno estudado. Segundo Yin (2016) a triangulação é a forma de recorrer a diferentes fontes para corroborar o evento tratado

na pesquisa, de maneira que substância a validade do estudo, permitindo uma análise mais profunda (EISENHARDT, 1989).

A utilização de um ou mais estratégias de análise de dados é indicada para garantir a veracidade dos resultados, proporcionando um novo olhar para o pesquisador, convergindo os resultados da coleta de dado juntamente com a realidade observada (CRESWELL, 2007). Um ponto principal da triangulação dos dados é que com a mescla de diversos métodos de coleta de dados, é possível compensar os pontos fortes de cada um dos instrumentos, neutralizando seus pontos fracos e permitindo a geração de segurança para o pesquisador durante sua análise do problema de pesquisa (JICK, 1979).

Figura 18 - Convergência de múltiplas fontes de evidências



Fonte: Autora
Nota: Elaborado com base em Yin, 2015

Na presente pesquisa será utilizado a análise de conteúdo como forma de investigação e tratamento dos dados coletados em campo. A escolha deve-se ao auxílio que esta técnica traz com a comunicação, proporcionando o tratamento das informações contidas nas mensagens, por meio da categorização e tipologia, ordenando as informações segundo critérios para melhorar a análise e compreensão (BARDIN, 1977). É considerado um processo sistêmico, em que pode se utilizar o processo de organização por codificação, mantendo parágrafos separados em categorias, como uma das formas de sistematização (CRESWELL, 2010). A codificação do

texto para organização e análise foi fundamentada nas categorias criadas, de forma a facilitar recortes do texto transcrito das entrevistas e mantendo o foco na questão de pesquisa e objetivos.

Logo após a separação dos dados em categorias é feita a análise a procura de padrões de correspondência de forma a realizar a interpretação, posteriormente, o processo de generalização como uma das contribuições do trabalho (CRESWELL, 2007). Na categorização foram considerados os princípios do modelo de economia circular e suas categorias teóricas aplicadas nos processos da indústria de mineração como fundamento para as entrevistas, conforme pode ser observado no Quadro 11.

Quadro 11 - Categorização dos princípios de economia circular como base para as entrevistas

Princípios	Elementos	Categorias
Princípio 1	Equilíbrio e conservação do capital natural	- Uso de energia alternativa - Consumo hídrico
Princípio 2 (ciclo técnico)	Cascateamento hierárquico	- Reaproveitamento dos resíduos no processo produtivo ou em novos processos produtivos - Reutilização da água residual no próprio processo
Princípio 3	Gerenciamento das externalidades negativas	- Redução dos impactos ambientais por meio das tecnologias de mediação – Tratamento de efluentes - Redução dos impactos ambientais por meio das tecnologias de mediação – Disposição de rejeitos

Fonte: Autora

Considerando os princípios da economia circular e os principais impactos ambientais gerados pelo setor em cada um dos princípios, criou-se categorias que quando difundidas e adotadas inovações ambientais tecnológicas poderiam incentivar a geração da circularidade técnica na indústria de mineração de ferro. Então, para o primeiro princípio, identificou-se o consumo energético de energias alternativas e consumo hídrico. Para o segundo princípio, considerou-se a criação de ciclos pelo reaproveitamento de água e o reaproveitamento de rejeitos. E para o terceiro princípio, com forma de gerenciar externalidades e auxiliar nas outras categorias anteriores, identificou-se como principais o tratamento de efluentes e o tratamento e disposição de rejeitos. De modo a identificar por meio da entrevista como as inovações ambientais tecnológicas e iniciativas ambientais são difundidas neste setor, além da sua aplicação para cada uma das categorias, suas possíveis barreiras e determinantes. Além de orientar a análise dos resultados e a proposta do modelo final de análise.

No estudo de caso a generalização é possível através dos padrões únicos encontrados durante a execução e análise de cada caso do projeto de pesquisa que auxilia a identificação de

semelhanças ou diferenças entre os casos, sendo esta análise antagônica propícia para evitar o enviesamento da pesquisa, resultado dos preconceitos do pesquisador. As convergências auxiliam na comprovação da teoria e na confirmação das questões de pesquisa, em compensação as diferenças encontradas entre cada caso, instiga o pesquisador a analisar com maior profundidade a evidência que corrobora esta diferença, atestando o padrão identificado no final da análise e consequentemente fortalecendo a fundamentação da generalização (EISENHARDT, 1989).

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa realizada com especialistas da área, consultores da área ambiental e operacional, além de gestores e responsáveis das indústrias mineradoras que atuam especificamente no setor de minério de ferro no Brasil. A descrição dos casos está baseada em evidências empíricas, coletadas por meio de entrevistas, assim como em outras fontes de informação - dados primários e secundários, como por exemplo, documentos disponibilizados pelas indústrias de mineração de ferro e especialistas, todos relevantes para compor o escopo da pesquisa. Os resultados são apresentados de acordo com os três princípios da economia circular, considerando as subcategorias para cada princípio. A ordem de exibição das resoluções é baseada na análise individual das entrevistas de cada caso, primeiramente o caso 1 e consequentemente o caso 2, complementando com os resultados das entrevistas com os especialistas. Inicialmente para cada subcategoria apresenta-se um quadro comparativo entre os casos - *cross case*.

4.1 PRINCÍPIO 1: PRESERVAÇÃO DO CAPITAL NATURAL NO SETOR DE MINERAÇÃO

Este item apresenta os resultados relacionados as principais fontes de energia utilizadas nas indústrias de mineração de ferro e a utilização de energia alternativa e o consumo hídrico.

4.1.1 Fontes de energia e utilização de energias alternativas no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa relacionados as fontes de energia e energias alternativas na indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 12 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 12 - Comparação de itens relacionados ao consumo de energia e energias alternativas entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Consumo de energia no processo de Lavra	Combustível Fóssil	Combustível Fóssil
Consumo de energia no processo de Beneficiamento	Energia Elétrica	Energia Elétrica
O tema de consumo de energia está diretamente ligado com emissões de GEE	Sim	Sim
Projetos para adoção de energias limpas	Solar e eólica, biodiesel	Solar, eólica e combustível verde

Continua...

Conclusão

Metas direcionadas a consumo de energia eficiente	Sim	Sim
Metas direcionadas para a redução de emissão de GEE	Sim	Sim
Desenvolvimento de parcerias para projetos relacionados ao tópico	Sim	Sim
Projetos de P&D para inovar no consumo eficiente e com menor impacto ambiental	Sim	Sim

Fonte: Autora

Considerando a subcategoria de fontes de energia, a empresa 1 utiliza o diesel – lavra - e a energia elétrica – beneficiamento (EMP1-D). No caso da lavra, o alto consumo de diesel está relacionado aos meios de transporte, como os caminhões. E em relação a etapa de beneficiamento, utiliza-se a energia elétrica advindo de hidrelétricas da região e do SIN (Sistema Interligado Nacional) (EMP1-A e EMP1-D) – sistema de transferência de energia entre subsistemas por meio da malha de transmissão e interconexão de sistemas elétricos do Brasil (ONS, 2020).

A preocupação com o uso eficiente de energia está relacionada com o nível de emissões de gases de efeito estufa (GEE) gerado, principalmente, pelos combustíveis fósseis utilizados pela empresa mineradora nos processos de lavra. Há um monitoramento mensal destas emissões de GEE por área de empreendimento, chamado Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa, com a finalidade de entendimento e controle deste consumo (EMP1-A), além da adoção de tecnologias e métodos ao processo para a utilização energética eficiente (EMP1-D).

Como forma de mitigar este consumo intensivo de energia e as emissões de GEE, a mineradora 1 possui projetos para ampliar o uso de energias alternativas globais, ou seja, aplicado em cada mina da empresa pelo mundo não somente limitado a mina de minério de ferro (EMP1-A). Para o complexo da mineradora 1 localizado aqui no Brasil, há projetos em fase de desenvolvimento para a utilização de biodiesel, como uma forma de impactar menos o meio ambiente e uma alternativa ao alto consumo de diesel dos caminhões fora-de-estrada (EMP1-D).

Os desafios para a difusão e adoção de inovações e iniciativas ambientais, principalmente, as dificuldades gerais da difusão de tecnologias e projetos ligados a questão energética e de inovação industrial são: engajamento das partes interessadas – internas e externas; o fato de que a inovação é aplicada ao processo e não ao produto final, como é o caso de outros produtos tecnológicos, logo o projeto “está tratando de efeito colaterais da produção, de custo, mas isso não está atacando exatamente o cerne do nosso produto”, o que implica no engajamento (EMP1-D).

Um ponto relacionado ao tópico de energias alternativas e que pode ser uma exigência do mercado internacional e impactar a mineradora 1, é a questão do mercado de carbono – taxação do carbono. Este ponto do mercado de carbono já influencia a empresa em outros países de atuação, porém ainda não há taxação aqui no Brasil, entretanto há expectativas que o tema vá se definir nos próximos anos (EMP1-D).

A mineradora 1 possui um grupo técnico em *sustainability* responsável por definir diretrizes para padronizar as unidades de negócios global em diversas áreas, entre elas energia e carbono. De modo a atender condutas de licenciamento e de *compliance* dos países com diferentes níveis de rigor. Como por exemplo, a legislação ambiental da África do Sul é muito menos restritiva do que a legislação do Brasil, logo há uma necessidade de padronizar o processo das unidades para garantir que as atividades não causam impacto ao meio ambiente ou a comunidades próximas, igualmente para os dois países (EMP1-A).

Outras iniciativas, como o lançamento do Plano de Mineração Sustentável nem 2018. Plano este que contém metas definidas para as unidades de Negócio e a empresa, de uma forma global, para serem cumpridas até 2030. Este plano visa a melhoria da eficiência energética, por meio de uma meta principal, como: melhorar a eficiência energética em 30% até 2030. Por meio de metas complementares como: redução de 8% de energia em relação a projeção usual e implementação de projetos prioritários para atingimento da meta de 2030. Sendo que as preocupações deste plano de mineração são relacionadas com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (EMP 1-A).

Para atingir esta eficiência energética, identificou-se em entrevistas a realização de projetos pela mineradora 1 para a adoção de energia solar e energia eólica em suas unidades de negócio, com baixa emissão de carbono. Sendo que há a implementação de projetos com o objetivo de mudar a economia atual para uma economia de baixo carbono, por meio de alternativas energéticas. Como por exemplo, o investimento no contrato de produção de energia solar e eólica para o abastecimento da mina de minério de ferro do Brasil e cidades próximas (EMP 1-A).

O foco desta ação coordenada entre áreas na aplicação do Plano de Mineração Sustentável é melhorar a imagem do setor mineral como um todo. Como destacou a empresa 1, “De cada vez mais tentar inovar... porque se a indústria de mineração não se inovar, vai chegar um ponto que ela não vai conseguir mais minerar, porque a pressão da sociedade hoje é muito grande por sustentabilidade, por preservação, por cuidado com as pessoas. Então as empresas precisam se antecipar a isso, e começar a trabalhar para ser uma empresa que causa o menor impacto possível nas regiões onde ela atua.” (EMP 1-A)

A mineradora 2 possui metas alinhadas com o acordo de Paris, com foco em ser neutra em 2050 e metas de redução de emissões. A empresa está estudando diversas formas de incentivar empreendimentos de baixas emissões por meio de bônus da avaliação econômica, como uma forma de priorizar projetos que possuam uma pegada ambiental menor, mas que não são ainda competitivos financeiramente com as funções tradicionais. Deste modo, a empresa tende a escolher os projetos de novas tecnologias que possuam menor impacto ambiental (EMP2-B).

Os projetos referentes ao consumo de energia e redução de emissões para a mineradora 2, possuem diferentes escopos, incluindo fontes fixas e móveis. Há projetos com o objetivo de eletrificação de equipamentos e processos, combustíveis alternativos, outras fontes de energia e até mesmo a troca de processos existentes. Como exemplo deste último item, a substituição de caminhões fora-de-estrada, que consomem diesel, por correia transportadora; ou substituição de combustíveis não renováveis por combustíveis renováveis. A mineradora percebe como investimento positivo, aqueles projetos que auxiliam na redução do impacto ao meio ambiente e reduzam os gastos em paralelo. Atualmente possui um mix de energia renováveis, não somente no Brasil, mas em outros países de operação (EMP2-B).

Porém, esta parte de eletrificação de equipamentos é delicada, pois precisa-se analisar a fonte da energia elétrica, se é verde ou não. "É importante as duas coisas andarem juntas, a gente ter fontes verdes e baratas de energia elétrica que permita dar viabilidade financeira para esses projetos que envolvem a eletrificação, combustíveis sintéticos ou coisa do tipo" (EMP2-B).

Quando se trata de mineração de ferro, no beneficiamento - o processo de britagem, peneiramento, flotação não são processos que tem uma carga ambiental muito forte. Já a lavra é considerada de alto impacto ambiental na questão de emissões, considerando que os caminhões fora-de-estrada são atualmente o maior emissor com rodas utilizados no processo. "A questão dos caminhões é muito emblemática do setor, porque todo mundo que pensa em mineração, pensa no caminhão". O caminhão fora-de-estrada é muito utilizado devido a sua flexibilidade para as operações minerais, pois "em um ano você produz muito, um ano você produz pouco, um ano você está jogando mais material para um lado, um ano você está jogando mais material para outro lado". Outros tipos de tecnologias com uma pegada ambiental menor, como a correia transportadora, são muito inflexíveis e com alto investimento inicial (EMP2-B).

A mineradora está estudando formas de limpar o seu fornecimento de energia elétrica limpa. O setor estuda diversas opções com combustíveis verdes, HVO (*óleo vegetal hidrotratado*), caminhões de hidrogênio, entre outros. Porém, um grande desafio é que no

processo de lavra existem diversas variáveis que afetam a adoção de cada tecnologia, por exemplo, a geometria da cava e vida restante do ativo. “Não tem uma solução única que vai atender a todas as minas”. Assim, são necessárias soluções customizáveis, porém ainda há bastante incertezas sobre o fornecimento deste tipo de tecnologia no futuro (EMP2-B).

Para a mineradora, a pressão como o incentivo, resultam de agentes internos e externos. Uma mudança de colaboradores internos que começam a apresentar preocupação ligadas a geração de gases de efeito estufa, como pode ser visto na fala: “Então eu acho que também é uma coisa cultural que vai permeando a empresa [...] é realmente uma mudança de postura dentro da empresa muito importante”. Ou até mesmo um questionamento dos *stakeholders* por iniciativas que objetivam reduzir a pegada ambiental, como visto em entrevista: “[...] a gente tocar essa questão lá com os *stakeholders*, nesses eventos globais, eu acho que é uma resposta a pressão que a gente tinha de fora” (EMP2-B).

Em seu portfólio de projetos para atender as metas propostas, a mineradora possui opções de alto custo e poucas soluções comerciais, a maturidade tecnológica de alternativas de emissões reduzidas são muito baixas. “A gente precisa inclusive expandir o nosso portifólio para incluir mais alternativas, [...] [na tentativa de] poder reduzir o custo das alternativas, porque muito das tecnologias também não dão certo. Então a gente precisa aumentar o nosso portfólio para que de fato [...] a gente tenha projetos suficientes para atingir nossa meta” (EMP2-B).

Então, o baixo nível de maturidade das tecnologias causa um excesso de opções o que dificulta a escolha do melhor caminho a seguir, não apenas do lado da empresa, mas também do lado dos fornecedores. É importante que o setor defina os seus rumos e estabeleça parcerias para que as soluções sejam desenvolvidas no tempo certo (EMP2-B).

Em entrevista com especialista, destaca-se que há a possibilidade de identificar no Balanço Energético – documento do Ministério de Minas e Energia - que o principal uso de energia no setor de mineração é de matriz fóssil - óleo diesel para uso nas operações como justificativa para esses dados – e energia elétrica – advindas de concessionárias (ESP3), como mencionado também pela mineradora 1.

Porém, como dificuldade para análise de evolução em relação aos dados energéticos do setor, em entrevista com especialista destacou-se dificuldades em levantamento de dados técnicos referentes ao setor mineral o que dificulta o controle e acompanhamento de evolução ou declínio relacionado ao consumo do setor. “O setor mineral é bem desafiante na questão de dados técnicos [...]”. Considerado os dados energéticos para o setor há duas opções de informações para análises e estudos: o Balanço Energético Nacional – porém com uma restrição

já que o dado é considerado para todo o setor de mineração, não havendo um recorte para o setor específico de minério de ferro; ou os relatórios de sustentabilidade específico de cada mineradora que os publicam periodicamente (ESP2).

Ao analisar o Balanço Energético Nacional, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que presta serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), podemos confirmar um ponto indicado pela especialista. O setor de mineração é considerado junto com pelotização nos valores energéticos, não permitindo uma análise isolada por recorte de minério de ferro ou por processos de lavra ou beneficiamento. As principais fontes para o setor, considerando dados de 2018, são: eletricidade (40,80%), gás natural (15,63%), coque petróleo (14,73%) óleo diesel (11,75%), carvão mineral coque (11,53%), entre outros. Sendo assim, neste relatório as únicas fontes de energia renováveis são gás natural (15,62%) e biodiesel (1,18%) - que possui um baixo consumo quando comparado ao consumo de diesel normal, sendo que energia elétrica não é especificado, no documento, de quais fontes vem esta energia elétrica (EPE, 2019).

O setor de mineração é conservador na questão do uso de energia, não destacando tantos esforços para a questão de eficiência energética, além de formas de gestão do gerenciamento do consumo de energia em horário de pico de uso. Levantou-se que o determinante para minimização de impacto ambiental é indireto comparado a outros determinantes, como custo e otimização de espaços. Como visto na fala do especialista 5: “Eu já vi alguns projetos em mineração de área buscando o uso de placas solares, mas para a otimização do espaço em cavas em recuperação. Mais para uma questão de um novo uso do meio físico, do que o uso de uma matriz energética mais limpa.” (ESP5).

A substituição de tecnologia está relacionada com o equacionamento estratégico entre vantagens adquiridas e custo deste novo investimento. Em empresas que possuem metas de sustentabilidade, a adoção de tecnologia na empresa é mais fácil com a inclusão destas metas no P&D na rota de incentivos de investimentos. Logo, a questão do custo é uma barreira organizacional para a difusão e adoção de iniciativas ambientais – inovações ambientais que incentivem a circularidade – da matriz energética da empresa (ESP5).

Um ponto que pode servir como determinante de alterações no processo e iniciativas ambientais é a observação de mudanças por parte dos concorrentes, por meio de resultados concretos. Como visto na fala: “[...] o setor da mineração é extremamente conservador. Então para alterar alguma coisa, por exemplo, o concorrente tem que ter feito algo que resultou em um impacto financeiro, [...] ‘se meu vizinho fez, vou fazer também.” (ESP5). Deste modo o setor mineral utiliza-se muito como estratégia de difusão e adoção o *catch-up innovation*, ou

seja, analisa e descobre o que está sendo utilizado e como está sendo aplicado pelo concorrente ou outra indústria, como uma forma de diminuir os riscos advindos da novidade de inciativas e inovações no processo.

Quanto a pressão – barreira ou impulsionadores - advinda da legislação referente a difusão e adoção de tecnologias e inovações ambientais para o consumo eficiente de energia, fica a critério da legislação dos estados em que as operações de mineração estão localizadas e, principalmente, das exigências para o licenciamento ambiental dos empreendimentos que apresentam condicionantes para a gestão da água e energia. Porém é discricionário, não havendo um padrão do órgão regulador. Como visto na fala: "Então, talvez exista algum direcionamento legal, no regulamento legal, que recomende a boa prática. Mas não é uma exigência e o órgão ambiental é discricionário, em alguns casos ele atua em outros não. Eu não vi isso em alguma NR como restrição, e sim como boa prática." (ESP5). A regulamentação não é tão incisiva para o tema de energias alternativas ou o consumo eficiente de energia (EMP2-B).

Referente a inclusão da energia alternativa pelas mineradoras, identificou-se em entrevista com o especialista que há um determinante advindo de países importadores, principalmente a Europa e a China (ESP2). Esta pressão que vem do mercado, de investidores por produtos que garantam eficiência processual, energética, tecnológica e hídrica, essencialmente, pois "um minério que tenha o uso de tecnologias limpas ele vai ter um valor diferenciado em uma bolsa, então, ele é mais atrativo aos investimentos" (ESP3).

Como forma de pressão de mercado, há empresas que atendem o *Global Reports Iniciatives* (GRI) - organização internacional de padronização - quando são listadas na bolsa de valores. Sendo comum a apresentação de relatórios de sustentabilidade periódicos – anuais ou trimestrais (ESP5). Por isso, foi apontado que o determinante mercadológico pode ser mais efetivo do que determinantes regulatórios, para que a empresa mineradora aplique em novas tecnologias com base sustentável (ESP3).

Deste modo, há um consenso do alto consumo energético pela indústria de mineração, tanto pelas mineradoras como para os especialistas, sendo as principais matrizes energéticas a fóssil e hidrelétricas. O consumo de energia está vinculado a emissões de GEE, resultando na preocupação do consumo energético eficiente e utilização de fontes de energias renováveis. Porém, a difusão e adoção de iniciativas ambientais pela empresa neste tópico ainda está relacionada a equacionamento de custos, resultados de concorrentes e exigências regulatórias e de mercado.

4.1.2 Consumo hídrico no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa referentes ao consumo hídrico da indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 13 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 13 - Comparação de itens relacionados ao consumo de água entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Principal atividade de consumo de água	Separação da ganga e minério	Separação da ganga e minério
Principais fontes de água	Subterrânea e rios outorgada	Subterrânea e rios outorgada
Possui metas de redução de consumo e consumo eficiente	Sim	Sim
Possui gerenciamento integrado de uso de recursos hídricos	Sim	Sim

Fonte: Autora

Segundo a mineradora 1, os principais consumos de água na mineração, são: consumo de água para supressão de poeira, na etapa de lavra. E em relação a etapa do beneficiamento o alto consumo é referente a separação do minério de ferro e a sílica, realizado a úmido. Após este consumo da água pelos processos, o efluente é encaminhado para a barragem, que funciona como um receptor de rejeitos e um sistema de recirculação de água para o processo (EMP1-A).

As principais fontes de abastecimento do empreendimento da mineradora 1 são: captação de água nova – captação em rio outorgada; e captação de água subterrânea – proveniente da atividade de rebaixamento do lençol freático durante a criação das cavas. Além desta água nova, a usina de beneficiamento da mineradora 1 utiliza a recirculação de água, proveniente da barragem de rejeitos (EMP1-B).

Baseado em um cenário de escassez de água e estresse hídrico a mineradora 1 possui a metas descritas em seu Plano de Mineração Sustentável referentes a questão do consumo de água nas operações, tais quais: reduzir a captação de água doce em 50% para regiões com escassez de água, com prazo de 2030; redução da captação de água doce em até 20%, com prazo para 2020 (EMP1-A).

As mineradoras sofrem como a pressão regulatória, das outorgas para captação de água. A mineradora 1 segue as conformidades da legislação do estado de Minas Gerais, com captação outorgada de um rio que fica a cerca de 30 km da área de beneficiamento de minério. Como identificado na fala do funcionário da mineradora 1: “essa outorga é 100% legal, ela foi instrumentada, os estudos de disponibilidade hídrica - que é o cotejo [...] entre oferta e demanda foi realizado conforme a metodologia e técnicas adequadas. Isso foi validado junto ao órgão

ambiental e a captação nesse rio representa cerca de 3% de toda a oferta hídrica do curso da água. Então não existe um impacto significativo da retirada dessa água" (EMP1-B).

Neste contexto, o gerenciamento de recursos hídricos da mineradora 1 não envolve somente o balanço hídrico, é um gerenciamento integrado, no sentido de avaliar todos os usos da água do empreendimento. O programa avalia os usuários dispersos na bacia, analisando como estão se comportando em relação ao consumo de água, permitindo estudos do balanço hídrico regional. Esses dados geram um banco de dados que permite uma análise mais precisa em relação às informações de recursos hídricos, de forma a subsidiar outros estudos, como um plano de segurança hídrica. Este plano avalia e media conflitos de uso da água, além de encontrar novas fontes de consumo e que sejam mais satisfatórias para a processamento de minério como um todo (EMP1-B).

A mineradora 1 possui atividades de gestão florestal para a conservação de recursos hídricos. Como identificado na fala do funcionário: "[...] 12 mil hectares de área de reserva legal, de área preservada, e dentro dessas propriedades são feitos trabalhos de enriquecimento florestal, de enriquecimento de plantio de espécies nativas da região, além de um projeto de cercamento de nascentes. E o cercamento de nascentes, traz uma qualidade ambiental ao longo dos cursos d'água porque ajuda a preservar toda aquela área de drenagem, além de melhorar na recarga e no armazenamento de água de toda a bacia" (EMP1-B).

A legislação atual não estabelece uma meta de consumo de água por parte das mineradoras. As outorgas estaduais e federais apenas regem os usos múltiplos da água - valor máximo de consumo e vazão residual. No estado de Minas Gerais estabelece um volume que pode ser captado em uma determinada drenagem e a vazão residual - um volume que precisa ser garantido a jusante do ponto de captação. Neste caso a mineradora 1 possui iniciativas próprias e metas baseadas na redução para todas as minas de sua responsabilidade, de forma a garantir empreendimentos mais eficientes, tanto para consumo energético como para consumo de água, de modo atrelado ao sistema do Plano de Sustentabilidade Mineral. Além dessas metas a mineradora 1 possui uma gerência específica de inovação e melhoria contínua, dentro da uma diretoria técnica de projetos e sustentabilidade, responsável pela adoção das iniciativas de desenvolvimento tecnológico necessário para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do negócio (EMP1-B).

A mineradora 2 lançou em 2018 a Meta Água que objetiva a redução de 10% do uso específico (água doce captada e usada nos processos por tonelada produzida) até 2030, considerando o ano base 2017. Desde o lançamento a empresa tem reforçado suas iniciativas que promovem: o fortalecimento da governança no tema água, o estabelecimento de comissões

de Gestão de Recursos Hídricos e Efluentes nas unidades operacionais, na ampliação do monitoramento hídrico, no mapeamento de riscos e na identificação de oportunidades e otimização do uso de água em suas unidades operacionais. Destaca-se que essa meta está suportada por um programa de sustentabilidade da organização, o qual possui orçamento específico dedicado para os Recursos Hídricos considerando estudos, capacitação de equipe, projetos de engenharia, aquisição de instrumentos para o monitoramento como também projetos de P&D. Uma das formas de estimular a redução da captação de água nova é a substituição da captação pelos processos de reutilização, como também na gestão ativa de recurso que inclui: monitoramento, inspeções, auditorias, revisão dos conceitos, capacitação, verificação do balanço hídrico e eliminação de perdas (EMP2-A).

Os projetos de P&D, além de incentivar e desenvolver tecnologias, investem também em outros tipos de solução, como a metodologia de riscos hídricos. Essa última é utilizada para assegurar que os riscos estão mapeados, classificados e priorizados. A bacia hidrográfica adjacente à unidade operacional de minério de ferro é considerada como unidade de gestão. Dessa forma os riscos não ficam restritos somente as questões da mineradora, tais quais: conflito com a comunidade, região de estresse hídrico. Essa metodologia será aprimorada por meio de convênio entre a mineradora e pesquisadores internacionais, pois o objetivo é ter uma metodologia global com a adoção nas unidades operacionais. Há também o Comitê de Recursos Hídricos, que ocorre no mínimo semestralmente e envolve os especialistas de recursos hídricos de suas unidades operacionais, incluindo internacionais. Em que há o compartilhamento das boas práticas, apresentações de projetos em desenvolvimento, integração e aproveitamento de soluções, de modo a estimular cada unidade de operação. "[...] esse projeto é interessante para mim, também aplicarei na minha unidade que haverá ganho" (EMP2-A).

A mineradora possui iniciativas e projetos para estudo da biodiversidade, pois "conhecimento de parâmetro físico e químico são conhecidos e muito estudados. Agora para os parâmetros biológicos, há muito a aprender, é preciso monitoramento e mais estudos". Por meio de diferentes projetos de tratamento de efluentes e gerenciamento de recursos hídricos de forma a atender o problema e capturar informações para o processo, entender os impactos ambientais de uma atividade que muitas vezes não se entende de forma ampla ou de oferecer informações ao público geral e cidades adjacentes ao processo. Por exemplo, o projeto de uma plataforma que permite a empresa visualizar seu papel no cenário de recursos hídricos, mas também, transmitir informações de recursos hídricos para o público em geral. Esses projetos precisam de engajamento das partes interessadas internas da empresa, como também das partes externas, como comitê de bacias, poder público e outras empresas (EMP2-A).

A difusão e adoção de tecnologias e inciativas ambientais aplicadas ao processo de mineração e o gerenciamento hídrico são muitas vezes determinadas pela demanda de mercado e suas especificações da qualidade e composição do minério. “Então não depende só da tecnologia existente [...] [ou] de quem produz, depende também da demanda do mercado.”. Principalmente porque “à medida que ele [mercado] determina um produto, a empresa vai buscar qual a melhor tecnologia que vai colocar aquele produto da melhor forma [...]” (EMP2-A). Ou seja, as especificações para o produto final definidas pelo mercado – cliente – fazem com que a mineradora se auto regule – procure tecnologias e processos para atender esta predefinição, atuando como um ator externo para a difusão e adoção de tecnologias e iniciativas de inovação ambiental. É importante ressaltar, que o impulso destes atores externos precisa estar alinhado para a causa ambiental, caso contrário, podem atuar como uma barreira.

No que diz respeito a parte regulatória, a mineradora 2 segue as legislações vigentes pertinentes aos locais de sua atuação que podem ser a nível federal ou estadual. No caso da existência de mais de uma legislação ao local onde está sua unidade operacional é adotada aquela que possui os limites mais restritivos. A parte regulatória influencia a empresa a aplicar tecnologias nos processos de tratamento de água e para o consumo eficiente de água (EMP2-A).

Deste modo, observa-se que as questões sociais – engajamento das partes interessadas, regulatórias são mais desafiadoras do que as soluções tecnológicas para a gestão dos recursos hídricos na mineração (EMP2-A).

Segundo entrevistas com especialistas, as fontes de abastecimento de água na mineração são as mesmas fontes disponíveis para outras indústrias, o setor é mais um usuário dentro de uma bacia hidrográfica. A mineradora precisa seguir a mesma formalidade para o uso da água igual outras empresas, ou seja, solicitar ao Comitê de Bacia uma outorga de uso de modo a pleitear a partir de um plano de uso de água, baseado no consumo de suas atividades. Caso haja cobrança da água na bacia da mina, o valor de cobrança é gerado (ESP3).

A média do consumo de água nova para o minério de ferro é de 0,1 a 0,5 m^3/ ton em ROM (*Run of Mine*). Sendo o entendimento de água nova para o setor de mineração o consumo de toda a água superficial, subterrânea e de concessionária em todos os processos da mina – desde consumo humano, parte de produção, de beneficiamento, até a parte de transporte. É importante ressaltar, que não se contabiliza a água do lençol freático – que normalmente surge na execução da cava – que é bombeada e retornada ao meio ambiente sem ser utilizada (ESP3).

Cada minério é único, cada estrutura mineral e geológica possui uma especificidade, o que altera o processo de lavra e beneficiamento de cada mina (ESP3). Em termos mineralógicos

uma área nunca é igual a outra, ou seja, um depósito será diferente de outro depósito do mesmo minério. Como visto em entrevista com especialista: "[...] um exemplo, se [a empresa] tiver que fazer um peneiramento ou uma moagem específica para atingir uma granulometria de interesse, [considerando que] um minério é diferente do outro, eles vão gastar energia diferente, vão gastar água diferente" (ESP5). Outro exemplo pode ser identificado na fala do especialista: "o mineral extraído em Mariana é diferente do minério extraído em Itabira, que é diferente do de Barão de Cocais, que têm a estrutura geológica diferente. Então, provavelmente o processo de lavra e beneficiamento vão ser diferentes também." (ESP3). Esta diferença entre o consumo de água entre diferentes minas de minério de ferro, está relacionada ao tamanho da mina, disponibilidade hídrica da região, tipologia do minério, ao volume e ao tempo de produção – minas antigas possuem menor eficiência, principalmente por possuírem diferentes processos operacionais (ESP3 e 5).

As empresas eventualmente compram água ou optam por poços próprios – quando possível. A disponibilidade hídrica e a sazonalidade da região em que a mina está situada é um ponto importante, podendo até inviabilizar um projeto ou o tornar mais caro, porque a água é essencial para o processo de mineração. Esta escassez faz com que a legislação tenha um maior rigor nas principais diretrizes referentes ao consumo de água que são definidas e no licenciamento ambiental do empreendimento, principalmente, quando está localizado em região de estresse hídrico (ESP5).

As mineradoras sofrem pressão tanto para o controle da quantidade de água consumida no processo como para qualidade desta água na saída do processo de mineração, atestando sua qualidade para retorno a natureza (ESP2 e 3). Como confirma o especialista 5: "para não extrair mais que devolvem em qualidade ou e quantidade". Logo, mede-se a quantidade e qualidade a montante e a jusante, para identificar que o índice definido no licenciamento ambiental está sendo atendido, tanto qualitativamente quanto quantitativamente (ESP5).

Há uma exigência maior da legislação no Brasil em relação ao consumo de água eficiente, principalmente, porque a mesma bacia hidrográfica atende a outorgas de diferentes seguimentos produtivos. Além, da questão de cobrança para as bacias hidrográficas, como identificado em entrevista: "Do ponto de vista da empresa, como são todas privadas, a mineração é uma atividade privada, eu tenho certeza que as empresas fazem questão da eficiência hídrica e energética porque isso é custo na ponta do lápis." (ESP2).

Para o consumo hídrico o mercado se autorregula, em uma dinâmica setorial de *commodities*, ou seja, o preço que irá determinar o fechamento do negócio, não sendo de grande importância se a empresa utiliza um consumo de água eficiente ou se possui consumo hídrico

mínimo, ainda mais considerando a disponibilidade hídrica do Brasil comparado com outros países. Portanto, o custo mostra-se tanto quanto uma barreira ou determinantes para a difusão e adoção de iniciativas e inovações ambientais relacionadas ao consumo hídrico eficiente, de modo que o equacionamento de custos, isto é, caso a inciativa sinalize a redução de custos é considerada como a melhor estratégia para a empresa e implementada, se não é mantido o conservadorismo (ESP5).

Deste modo, o consumo hídrico da indústria de mineração está sujeito a dois pontos principais, a característica hídrica da região de localidade da mina, que pode ditar regulamentações mais rígidas ao consumo. E ao depósito do minério que influenciará no processo e tecnologias utilizadas ao longo da operação, que interfere no consumo e uso eficiente da água. De forma que, tecnologias e métodos mais eficientes se fazem necessário para manter um circuito de água fechado e garantir o abastecimento do item fundamental para a operação.

4.2 PRINCÍPIO 2: OTIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO DE RECURSOS POR MEIO DA CRIAÇÃO DE CICLOS NO SETOR DE MINERAÇÃO

Este item apresenta os resultados relacionados as principais medidas para a criação de ciclos que maximizam o valor do produto, ou seja, o cascateamento de produtos e materiais. No caso da mineração de ferro, foram identificadas a reutilização de água no reaproveitamento interno e a reutilização de rejeitos como matéria-prima externa. Assim como os possíveis determinantes e desafios para a criação de ciclos e maximização do valor do produto.

4.2.1 Reaproveitamento de água no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa relacionados ao reaproveitamento de recurso hídrico na indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 14 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 14 - Comparação de itens relacionados ao reaproveitamento de água entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Utiliza a recirculação de água	Sim, 70%	Sim, 80%
Possui metas relacionadas a taxa de recirculação de água	Sim	Sim
Projetos de P&D relacionados ao tópico	Sim	Sim

Continua...

		Conclusão
Realização de parcerias (universidades, empresas, fornecedores) para desenvolvimento de projetos referentes ao tópico	Sim	Sim

Fonte: Autora

Considerando a pressão regulatória que as empresas sofrem em relação as outorgas para captação de água das fontes de captação de água. Sendo que esta pressão fica mais evidente quando a região da mina sofre de estresse hídrico ou está sujeita a grandes períodos de seca. A unidade operacional da mineradora 1 possui estas duas variáveis, ou seja, está localizada em uma região suscetível a períodos de seca em determinada época do ano, momento em que o nível da água do rio que abastece o consumo do empreendimento diminui, sendo necessária a recirculação de água no processo, proveniente do reservatório da barragem de rejeitos. A mineradora 1, baseado neste cenário de escassez de água, possui metas descritas no seu Plano de Mineração Sustentável referentes a questão do reaproveitamento de água, em que deve aumentar os níveis de reciclagem de águas residuais para 75%, com prazo para 2020 (EMP1-A).

Como visto na fala do funcionário da empresa 1: "Então em termo de números, a taxa de recirculação de todo o consumo total necessário para o beneficiamento de minério representa cerca de 70% de água de recirculação, cerca de 20% de água nova [...] e os outros 10% dos poços de rebaixamento. Essas são as principais fontes de água para o beneficiamento de minério" (EMP1-B). Uma parcela da água utilizada no beneficiamento é aproveitada no transporte do minério até o porto de exportação, pois o modal de transporte utilizado pela empresa 1 é o mineroduto, que utiliza 60% de particulado sólido e 40% de água. Quando esta água do mineroduto chega na região portuária, é reaproveitada na região, após tratamento, com uma taxa de reuso de 20% - equivalente aos empreendimentos atuais do porto, que ainda está em crescimento - e 80% é lançado no emissário submarino, considerando todos os controles qualitativos exigidos pela legislação ambiental local (EMP1-B).

A mineradora 2 reutiliza água em seu processo de mineração, seu resultado no ano de 2019 foi de 82%. Porém, é importante destacar que a reutilização de água deve ser analisada em conjunto com o volume captado do meio ambiente. A reutilização por si só não pode comprovar a eficiência da operação, por exemplo, considerando 2 unidades operacionais em mesma escala de produção com as seguintes características: a primeira possui taxa de reutilização de 5% e utiliza por mês 50 mil metros cúbicos de água, a segunda possui taxa de reutilização de 70% de água e utiliza 100 mil metros cúbicos. Fica claro que a primeira é mais eficiente mesmo que a taxa de reutilização seja inferior a segunda unidade operacional do

exemplo. “É importante sempre focar na redução da captação e uso de água nova nos processos, pois promove a redução da geração de efluente e estimula a substituição da água nova por água de reutilização”. Porém, é importante ressaltar que uma mina da mesma região pode apresentar usos de água distintos devido a alguns fatores, como por exemplo, o tempo de operação da mina, qualidade do minério – especificações que o mercado requer, tecnologia aplicadas ao processo e a região de localização – geografia e pluviometria (EMP2-A).

A mineradora 2 faz duas distinções quanto ao conceito de águas de reuso e de recirculação, sendo a recirculação a água ou efluente líquido proveniente de um processo tratado ou não, que é reutilizado no mesmo processo. E o reuso é considerado quando este efluente é utilizado em processo diferente do gerador. Logo, a recirculação é aquela que volta para o mesmo processo e o reuso é quando o efluente é destinado para um outro uso (EMP2-A).

Os projetos para reutilização e tratamento de água enfrentam alguns desafios, tais quais: falta de regulamentação para a implementação de processos de reutilização, cultura e engajamento das partes interessadas dos processos internos e externos - como o *know-how* dos fornecedores. Quanto aos parâmetros de qualidade, as legislações ambientais – por exemplo CONAMA - definem parâmetros de qualidade para águas superficiais, subterrâneas e efluentes. Logo, não há regulação da prática da reutilização considerando suas demandas - como lavagem de máquinas, controle de poeiras, entre outros (EMP2-A).

Em geral, a mineração funciona com o circuito fechado, de modo a garantir a disponibilidade de água para a produção (ESP5). Esta recirculação da água nos processos pode ser feita de duas formas, primeira depositando o rejeito na barragem diretamente, aguardando a decantação – conforme citado pela mineradora 1. A segunda forma é realizar métodos de tratamentos diretos, físico-químicos, por exemplo, para a separação de impurezas e particulados, de modo a reaproveitar esta água novamente em processos (ESP4), de uma forma direta. Porém, não é possível reaproveitar totalmente a água tratada dependendo de sua nova aplicação no processo. Por exemplo, caso sua aplicação seja no processo de tratamento de efluentes é preciso purgar, ou seja, eliminar uma quantidade de água para diminuir a quantidade de íon que podem se acumular e atrapalhar a eficácia do processo (ESP4).

Portanto, para o minério de ferro, a porcentagem de reuso de água novamente em seus processos é alta, atingindo até 90% de recirculação dentro da lavra e beneficiamento, gerando um efeito positivo e consequentemente diminuindo a demanda de água nova (ESP3).

Deste modo, considerando que a água é um item essencial para a indústria de minério de ferro, as mineradoras utilizam a recirculação de água como uma forma de reduzir a captação

de água nova. O depósito de minério influencia nas tecnologias utilizadas e os processos minerais, que consequentemente interfere na taxa de recirculação de água. A falta de delimitação de regulamentação para esse tópico de recirculação de água é uma barreira. A questão da recuperação de valor econômico advindo da redução da captação de água nova atua como determinante para a adoção do reuso de água na mineração.

4.2.2 Reaproveitamento de rejeitos no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa referentes ao reaproveitamento de rejeitos na indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 15 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 15 - Comparação de itens relacionados ao reaproveitamento de rejeitos minerais entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Estudos de P&D voltados ao tema	Sim	Sim
Realização de parcerias (universidades, empresas, fornecedores) para desenvolvimento de projetos referentes ao tópico	Sim	Sim
Relatou problema de capacidade técnica e escalabilidade, advindo da quantidade de volume	Sim	Sim
Iniciativas e tecnologias com foco no reprocessamento e reaproveitamento dos rejeitos	Sim	Sim

Fonte: Autora

A mineradora 1 possui convênios com institutos de pesquisa da região, Minas Gerais, para trabalhar a questão de reaproveitamento dos rejeitos dispostos nas barragens. Apesar do projeto ser incipiente, a mineradora identificou a oportunidade de valor agregado que este rejeito possui (EMP1-A e EMP1-C), principalmente para a indústria da construção civil (EMP1-C). Há o reaproveitamento de rejeitos como calçamento para um centro de educação ambiental localizado dentro da mina da mineradora 1 (EMP1-A), como também existe a possibilidade do uso de rejeitos para a confecção de blocos cimentícios de cerâmicos – construção civil, confecção de material propante – indústria de óleo e gás, na construção de micro pelotas – metalurgia (EMP1-C).

O reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro apresenta desafios. O rejeito de minério de ferro possui uma característica que influencia os projetos e a forma de reaproveitamento do rejeito, que é o seu alto volume, ou seja, os projetos idealizados devem considerar maneiras de se tornarem escaláveis para a grande quantidade de rejeitos dispostos

nas barragens (EMP1-A). Contudo, o problema não é a aplicabilidade do rejeito em outras indústrias e processos, e sim o volume gerado pelo setor de mineração, principalmente de ferro, "é muito superior à demanda dessas indústrias [...] o poder de geração de rejeitos de uma empresa mineradora é infinitamente superior a demanda desses materiais do mercado." Entretanto, mesmo que o volume seja ínfimo precisa-se estudar a viabilidade desta utilização, mesmo que o impacto no volume de barragem seja mínimo (EMP1-C).

Logo, não é uma perspectiva simples, ou seja, não adianta somente projetar produtos com estes rejeitos sem antes pensar em toda a cadeia de forma integrada e no mercado que irá consumir este produto, além da sustentabilidade do produto. Como identificado na fala do entrevistado (EMP1-A): "[...] não adianta a gente produzir determinado produto que não vai ser utilizado na região de atuação, e com isso a gente tenha que transportar, por exemplo, aí vai ter impacto em emissões atmosféricas, impacto em segurança em rodovias. Então, tem que pensar toda a cadeia de forma integrada, então esse é o objetivo desses projetos, de pensar não só na utilização, mas na viabilidade daquele produto para a região onde a gente atua, ou de que forma que a gente possa fazer com que ele tenha valor, mas ao mesmo tempo em que a gente não tenha aquele impacto do transporte da utilização dele em outro local.".

Outro ponto levantado em entrevistas é o desafio pela falta de legislação específica sobre o tema, ou seja, não ter certeza sobre a comercialização de um determinado produto e qual a responsabilidade da empresa perante aquele rejeito utilizado como matéria prima. Como visto em entrevista com especialista: "... a empresa faz um estudo e vê que não tem uma estabilidade suficiente para construção, se você repassa isso [este rejeito] para outra pessoa, [...] para dar uma [...] destinação para esse rejeito, ela desenvolve blocos e depois essa casa cai, a responsabilidade volta em cima da empresa que fez essa doação sem saber exatamente onde o rejeito ia ser empregado. Então, as vezes a empresa quer desenvolver uma iniciativa ou fazer uma doação ou disponibilizar o material, mas nem sempre é possível porque você tem que pensar qual vai ser o risco se acontecer alguma coisa errada depois, qual vai ser o risco para a empresa" (EMP1-A).

No que diz respeito ao reaproveitamento de rejeitos, a mineradora 2 destaca que é importante diversificar o portfólio de coprodutos, pois em virtude da grande quantidade de rejeito não é possível ter uma única destinação. Logo, a empresa possui um *trade off* de iniciativas que focam em tecnologias de baixa complexidade tecnológica e alta atratividade em termos de consumo para o rejeito. De modo a planejar o faseamento dos projetos, quais nichos, quais parceiros se encaixam melhor em quais projetos, de modo a criar um portfólio de projetos diverso, possibilitando a absorção pelo mercado (EMP2-C).

Um exemplo de projeto de reaproveitamento é a criação de uma planta piloto de produção de artefatos de rejeitos - pisos intertravados, blocos estruturais e blocos de vedação - instalada dentro da unidade operacional da mineradora. De modo a ficar dedicada a pesquisa, em parceria com instituto de pesquisas, porém esta planta terá capacidade de produção robusta, com destinação ao consumo interno da empresa e doações para as comunidades vizinhas (EMP2-C).

Outro desafio é o engajamento e comunicação entre os setores que estão além da mineração, ou seja, setores de base que possuem alto potencial de absorver o volume de rejeitos, como forma de facilitar a inclusão deste rejeito no mercado. O reaproveitamento, depende de engajamento externo e interno. Como identificado na fala da especialista: "[...] não basta eu apenas pegar aquele material que todo mundo costuma ver, por exemplo, no caso do rejeito de minério de ferro, avermelhado, úmido, disposto em uma barragem, para conseguir de fato inseri-lo em outras cadeias produtivas. É preciso de um diferencial, isso não é só para o mercado externo, mas internamente também, para que as equipe e as pessoas consigam utilizá-lo, de fato ter uma viabilidade técnica". Logo, a mineração precisa entender que seu rejeito é solução de outra indústria, e vice versa, outras indústrias terem conhecimento que aquele rejeito possui valor, ao invés de pensar que a mineradora está se desfazendo de um problema (EMP2-C).

Para criar ciclos da economia circular é preciso cria-los dentro da própria empresa, logo, adequar-se tecnologicamente e tecnicamente. De modo que o engajamento interno é essencial, para que os funcionários entendam o processo e tenham conhecimento do rejeito como um coproduto ao invés de um material descartável. "A gente vê que isso faz total diferença para você conquistar de fato esse mercado. Então acho que todo esse ciclo que se cria pensando nos produtos parte muito de dentro da empresa já ter essa cultura e a forma de se mostrar, [...] aumentar esses usos internamente, mas ainda é um grande desafio" (EMP2-C).

Um outro ponto, identificado como desafio é a falta de estrutura fiscal, contábil e jurídica, vista em outros países, que fomenta o reaproveitamento de fato. "Para a gente, hoje, sair com o nosso material, como areia, eu não tenho direito de lavra sobre areia, então eu acabo impossibilitado inclusive de fazer testes por causa disso. É toda uma conjuntura, é toda uma estrutura jurídica [...] que a gente precisaria [...] de estrutura fiscal e política de incentivo. Recentemente teve até um projeto de lei aqui na Assembleia do Estado de Minas que dizia que pré-moldados produzidos a partir de rejeito de minério de ferro teriam isenção de até 10% de ICMS. Medidas como essa impulsionam e alavancam iniciativas! [...]" (EMP2-C).

Outro ponto importante para conseguir alavancar o reaproveitamento de rejeitos, além de mesclar as inovações tecnológicas, é a inovação de modelos de negócios. "eu acho que para

fechar esse ciclo [da economia circular] de fato [...], eu não posso fazer o negócio da mesma forma como era feito no passado. Não há mais espaço para modelos de economia lineares". Logo, pensar nos grandes parceiros, mas também nas indústrias locais, fomentar um *hub* em torno dos centros produtores de rejeito de modo a facilitar o reaproveitamento. "Então, partindo da premissa de que para eu alavancar o ciclo de economia circular eu preciso também pensar em modelos de negócios que não sejam exatamente como se trabalhava anos atrás, vem aí a oportunidade, a melhor definição, de trabalhar a criação de valor compartilhado". E partindo da premissa da criação de valor compartilhado, há a possibilidade da criação de modelos de negócios híbridos, trazendo flexibilidade, fomentando projetos de reaproveitamento de rejeitos e possibilitando dar destinação aos grandes volumes produzidos (EMP2-C).

A mudança de modelo de negócio, permite aproximar parcerias para P&D da empresa, seja com futuros parceiros ou até mesmo com clientes. De modo a diminuir as incertezas do processo de inovação e pesquisa, por meio da aproximação da empresa com centros universitários, empresas, fornecedores. Como visto na fala da entrevistada: "Então, acho que a forma de se pensar precisa ser bem diversa, não tem uma régua, um padrão [...] certo para se trabalhar" (EMP2-C).

Ou seja, o alto volume de rejeitos produzidos na mineração de ferro e a indefinição de responsabilidade e regulamentação referente ao tema de reaproveitamento de rejeitos, dificulta iniciativas e projetos que possam reduzir os impactos e passivos ambientais das mineradoras.

Segundo especialista, o reaproveitamento de resíduos na mineração encontra alguns desafios, tais quais, tornar o processo escalável – apesar de custos e grande volume de resíduos - e analisar a viabilidade econômica do projeto. Parcerias apresentam-se como uma solução em desenvolvimento de projetos, entre empresa, universidades e centros tecnológicos – privados e público (ESP 2 e 3), como confirmado pela mineradora 1. Porém alguns projetos encontram limitações para sua execução, pois apresentam inviabilidade técnica, no entanto, não apresenta viabilidade em outros pontos, por exemplo logística. Como identificado na fala: "[...] na fabricação de tijolo, consegue-se as vezes fabricar tijolos, existe uma certa viabilidade técnica, porém quem demanda está muito longe. E a questão logística acaba tornando o produto mais caro, aí a pessoa não compra porque prefere comprar o tradicional que é mais barato, que comprar um reaproveitado desses que o custo é grande, muitas vezes essa questão logística" (ESP4).

Para o especialista (ESP5), um dos pontos para lidar com rejeitos da mineração e seu armazenamento é ter um pensamento mais holístico, ou seja, pensar na geração de resíduos antes de produzi-lo. Como visto em sua fala: "Entre um tijolo feito de resíduo e um tijolo feito

de barro, o de barro é 10x mais barato [...] E isso é um exemplo clássico, todo mundo quer fazer tijolo de resíduos. Não tem necessidade de tijolo para todas as pessoas e o frete para levá-lo [...] é completamente inviável. As soluções e propostas [para lidar com os resíduos da mineração] são ruins. [...] a quantidade de resíduos produzidos pela mineração é gigantesca e esses valores dobram trinta vezes a cada 5, 10 anos". Ou seja, o consumo de minério de ferro é exponencia, o resíduo acompanha esta curva de crescimento. Sem repensar o consumo, as tragédias de barragens vão continuar acontecendo na sociedade (ESP5).

Deste modo, a tendência para o setor mineral: "[...] a grande tendência da sociedade e da própria comunidade da mineração é a otimização do processo para evitar gerar resíduos, porque qualquer coisa que [...] realize depois é paliativo e nunca vai se aproveitar 100% dos resíduos [...]" (ESP5).

Os estudos e projetos de reaproveitamento de resíduos do setor mineral ganhou grande força a partir do incidente com barragens ocorrido em 2015 em Mariana. Evoluindo para um movimento global que impulsionou as mineradoras a aplicar soluções para disposição dos rejeitos que ofereçam menor risco, por meio de determinantes de mercado, sociedade civil e regulatório. Estes projetos avaliam a real necessidade daquele reaproveitamento de resíduos para se transformar em um novo produto, focando na capacidade de processamento destes projetos, logística e adoção em novos setores. Como por exemplo o risco que o reaproveitamento de rejeitos pode oferecer para outras cadeias de produção (ESP2 e 3). E principalmente até que ponto este reaproveitamento é amigável para o meio ambiente, ou seja, levar em consideração consumo de energia, emissões de GEE e consumo de água para transformar este resíduo em produto, com base em sua vida útil ao longo do tempo e sua destinação pós vida útil (ESP3). Ou seja, pensar de uma forma holística em todo o processo.

Como exemplo (ESP2) citou a utilização de resíduos para a pavimentação, pigmentação para paredes, blocos de cimentos e como componentes para placas fotovoltaicas – uma porcentagem pequena. E há projetos em fase inicial também para o uso deste reaproveitamento em projetos para o cunho social, como por exemplo, construção de casa popular, mas ainda em fase introdutória.

Porém a falta de definição e alinhamento de políticas públicas para a reutilização de resíduos industriais da mineração como coprodutos (ESP5) atua como barreira para projetos de reaproveitamento (ESP 2 e 3), conforme citado pelo entrevistado da mineradora 1. Tais quais, redução de insumo, redução de custos de produção, definição de responsabilidades, entre outros – impede o desenvolvimento de formas de reaproveitamento de rejeitos e tratamentos destes

efluentes, de modo que esta falta de definição se torna um ônus para a empresa, interferindo em novas formas de atuar neste tópico (ESP 2 e 3).

Deste modo, há um consenso entre mineradoras e especialistas em relação a possibilidade de transformação dos rejeitos em novos produtos. Entretanto, há algumas limitações de ordem técnica – processamento do alto volume de rejeitos gerados durante a produção – além da falta de regulamentação para este coproduto. Neste contexto, é necessária a integração entre as cadeias de suprimento para minimizar a geração de rejeitos e otimizar processos de logística.

4.3 PRINCÍPIO 3: GERENCIAMENTO DAS EXTERNALIDADES NEGATIVAS NO SETOR DE MINERAÇÃO

Este item apresenta os resultados relacionados as principais tecnologias e métodos utilizados para o tratamento de efluentes e a disposição dos rejeitos, medidas de gerenciamento das externalidades negativas adotados pelas mineradoras. Assim como os possíveis determinantes e desafios para a implementação de tecnologias e métodos ambientalmente responsáveis direcionados a estes tópicos.

4.3.1 Tratamento de efluentes no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa relacionados ao tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 16 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 16 - Comparação de itens relacionados ao tratamento de efluentes minerais entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Métodos de tratamento mais utilizados	Físico-químicos e biológicos	Físico-químicos
Processos de tratamento mais utilizados	Flotação, percolação, decantação, filtros cerâmicos rotativos e reator anaeróbico de fluxo ascendente e descendente	Flotação e decantação
Todas as minas possuem ETE	Sim	Sim
Utilização da barragem de rejeitos como parte do tratamento de efluentes	Sim	Sim

Continua...

Conclusão

Recirculação de efluentes	Sim	Sim
Retorno de efluentes tratados para cursos d'água	Sim	Sim

Fonte: Autora

A mineradora 1 separa seus efluentes em dois tipos, sanitários e industriais. Para os efluentes sanitários ela possui diversas estações de tratamentos compactas baseadas na topografia do terreno do empreendimento. Os efluentes industriais podem ser diferenciados em oleosos – efluente da oficina dos caminhões fora-de-estrada, o seu sistema de tratamento opera em um circuito fechado de tratamento físico-químico com destinação do óleo separado para refinaria; e água residual advinda do processo mineral tratada na barragem de rejeitos – que atua como um reator aeróbico de grande porte, permitindo a clarificação da água por meio do processo físico-químico (EMP1-B).

A barragem possui uma ETE a jusante, de modo a tratar o efluente industrial que está no seu interior, conforme a legislação de classificação de corpos d'água, para liberar água e atender a quantidade e qualidade da vazão residual mínima – água que deve retornar ao o curso d'água. Esse sistema é composto por um sistema físico-químico convencional constituído por flotação, decantação (EMP1-B) e percolação (EMP1-C). A água residual do porto, advinda do mineroduto é separada do minério por meio de estação de filtros cerâmicos rotativos e 20% dessa água vai para o reuso em atividades do próprio porto e os outros 80% é lançado no emissário submarino, de acordo com o padrão de lançamento no mar exigido. Sendo que para os dois efluentes a mineradora 1 deve atender legalmente o padrão de lançamento definido pelas agências ambientais e órgãos fiscalizadores do estado (EMP1-B).

Quanto aos métodos e tecnologias aplicadas no tratamento de efluentes, a mineradora 1 não possui nenhum poluente de difícil tratativa, advindo do seu depósito de minério de ferro. Logo utiliza-se de diferentes métodos convencionais físico-químicos – como flotação-decantação - ou biológico - reator anaeróbio de fluxo ascendente ou descendente seguido de filtro biológico percolador (EMP1-B).

A mineradora 2 possui projetos de tratamento de efluentes que consideram soluções internas ou externas, como por exemplo, há um projeto conceitual que visa a reutilização de efluentes das cidades adjacentes no processamento mineral. Há muito interesse em projetos de tratamento de efluentes e reutilização que trarão benefícios ao meio ambiente e conservação do capital natural (EMP2-A).

A mineradora 2 possui unidades de pesquisa voltadas ao desenvolvimento de tecnologias e soluções. Com base neste centro tecnológico está sendo implementado um projeto

piloto de sistema de monitoramento da qualidade de efluentes o qual possui capacidade de coletar e analisar concentrações de metais - ferro, manganês, entre outros. Com a aprovação deste piloto, o tempo de resposta considerando o monitoramento tradicional passará de 15 dias para 40 minutos. O desenvolvimento de sensores e equipamentos automatizados, com o tempo de resposta mais curto, suporta as metas globais da empresa, auxilia no gerenciamento dos riscos e antecipa futuros problemas advindos do desbalanceamento da qualidade do efluente. Além disso, reduz a falha humana e garante a consistência dos dados de suas unidades operacionais (EMP2-A).

Este sistema de monitoramento será testado a jusante de uma barragem de rejeitos para monitorar seus efluentes, pois a barragem poderá passar por um processo de dragagem que visa o reprocessamento do material sólido para reaproveitar o ferro. Atividade está que promove a alteração da qualidade da água do reservatório da barragem em razão da suspensão das partículas sólidas. Deste modo, este sistema de monitoramento tem o objetivo de monitorar a qualidade dos efluentes da barragem e subsidiar na tomada de decisão das ações em execução (EMP2-A).

Um dos desafios para a questão de tratamento de efluentes, muitas vezes não é o efluente industrial – advindo da usina do beneficiamento – e sim, os efluentes advindos das chuvas - que promovem o carreamento dos sólidos. Estes efluentes são direcionados para sistemas de controle – por exemplo: diques de contenção de sedimentos, porém, na ocorrência de eventos extremos, podem não haver tempo suficiente para o processo de decantação e com isso a impossibilidade de plena contenção e tratamento destes efluentes. Além do tratamento de efluentes estas estruturas também os armazenam para posterior reutilização e recebem manutenção para a retirada do sedimento depositado ao fundo e sua correta disposição (EMP2-A).

Em entrevista com especialista, identifica-se a existência de parcerias entre mineradoras e centros de tecnologias – público e privado - para criação e viabilização técnica de processos de tratamento de lama e efluentes, com o intuito de reprocessar estes rejeitos que seriam descartados em barragens, para retirada de material que ainda pode ser reaproveitado como produto. Um dos principais determinantes para a procura por parte das empresas para parcerias com os centros tecnológicos, além dos ganhos econômicos – por parte do reaproveitamento de material útil entre os rejeitos, é o ganho ambiental, principalmente após as tragédias no Brasil, envolvendo as barragens. Estes eventos originaram uma pressão advinda de diversas entidades, essencialmente o governo, para uma melhoria na eficiência dos processos, principalmente para questão do descarte de rejeitos (ESP4).

A possibilidade de tratar e reaproveitar os rejeitos incentivam a difusão e a adoção de inovações ambientais tecnológicas, principalmente considerando o alto volume de material a ser reprocessado pelas grandes mineradoras e o investimento que pode ser realizado ao processo em conjunto com fornecedores de equipamentos ou centros tecnológicos. As mineradoras apresentam uma maior preocupação com a difusão, adoção e investimentos de tecnologias e inovações ambientais que anteriormente não era continuadas ou analisadas (ESP4).

Porém, a difusão e adoção destas tecnologias e inovações ambientais pode enfrentar o desafio de questões técnicas – escalabilidade de projetos - e econômicas. Como visto em entrevista com especialista: "muitas [tecnologias] tem uma boa solução, mas não tem a capacidade de processamento requerida para as grandes empresas". Ou seja, a tecnologia é ideal, porém não possui capacidade de processar grandes vazões de rejeitos, apresentando uma limitação técnica. E na questão financeira, isto é, quando uma tecnologia é ideal, porém para processar a quantidade desejada é necessário a compra de muitos equipamentos, apresentando uma limitação econômica (ESP4).

Para o tratamento de efluentes para reaproveitamento dentro da própria mina, o tratamento é muitas vezes simples, utilizando métodos físicos e químicos, ou seja, fazendo uso de algum coagulante ou floculante. A tecnologia de flotação permite processar grandes volumes, sendo a mais utilizada atualmente no setor de mineração à úmido (ESP4), sendo um dos métodos utilizados pela mineradora 1. Como visto em entrevista com especialista: "[...] quando se fala de tratamento de minério, em muitas usinas a flotação é a preferidas pela capacidade de processamento, é uma tecnologia que permite uma capacidade de processamento alta. Coisa que nem todas as [tecnologias] outras conseguem.". Outro ponto positivo da tecnologia de flotação é o custo de operação acessível (ESP4).

A inovação ambiental mais difundida e adotada pelo setor, considerando-se a mais promissora para o tratamento de lamas de rejeitos minerais é a flotação em coluna. A adoção desta tecnologia permite o tratamento de particulados finos que normalmente são os mais difíceis de tratar, evitando a perda de minério de ferro ainda útil (ESP4). Quando há o reaproveitamento da lama que seria descartada, para projetos de minério de ferro, utilizando a tecnologia de flotação em coluna, o reaproveitamento é em torno de 40 a 50%, havendo a recuperação desta porcentagem do que seria descartado em novo produto, resultando em ganhos econômicos como ambientais para a empresa (ESP4).

A lama de minério de ferro que é descartada como rejeito na barragem, é constituída de partículas finas - geralmente abaixo de 10 a 20μ - que no processo de flotação normalmente não é recuperado, mesmo possuindo minério de ferro útil na lama. Porém, utilizando a

tecnologia de flotação em colunas especificamente para a lama, ou seja, especificamente voltado para esse tamanho de partícula, com reagente específico há a possibilidade de reaproveitar este produto útil que seria descartado. Porém o sucesso do reaproveitamento desta lama de rejeitos está sujeito a diferentes variáveis, tais quais, a tipologia no minério de ferro e ao reagente utilizado no processo de separação físico-químico (ESP4).

Há a possibilidade de uma boa taxa de recuperação, aproximadamente de 70 a 80% do ferro, porém o produto desta recuperação não é de alto teor de ferro, entretanto o produto pode ser blendado – misturado – com um produto mais rico, de modo que as especificações de venda sejam atendidas. Como visto na fala: "Então você tem algumas especificações que você consegue, com esse produto obtido, com esse concentrado obtido da lama que era perdida, você juntar com outro mais ricos e o *blend*, a mistura destes dois, ainda atender as especificações de mercado." (ESP4).

E para o tratamento de água residual existe a difusão e adoção de tecnologias e inovações ambientais como por exemplo, flotação por ar dissolvido (DAF), processos físico-químicos com reagentes de processos melhorados. Há a difusão e adoção de tecnologias por membranas e filtração, porém, não são tão adotadas, apesar de oferecerem eficiência, principalmente devido ao custo de investimento. Como visto em entrevista com especialista: "[...] muitas empresas já estão tentando implementar um processo de filtração que seja mais barato ou empilhamento mais adequado. Retirar o máximo de finos da água [...] [permite] empilhar melhor, em questão dessas tragédias que ocorreram. Então existe tecnologias que estão ainda sendo estudadas." (ESP4).

Não é possível generalizar qual o melhor equipamento ou o processo mais eficiente para o tratamento de efluentes, pois o tipo de minério de ferro em cada depósito é um fator chave para a escolha das tecnologias e processos selecionados para a operação de mineração de ferro, vai interferir no layout e no programa do processo. Quando se trabalha com o processamento a úmido não há uma única tecnologia dita eficiente, há uma gama de tecnologias disponíveis para a separação sólido-líquido, como por exemplo, a flotação, separação magnética – porém possui uma limitação devido ao tamanho das partículas, métodos gravíticos de concentração – baseados na diferença de densidade e no tamanho do minério. Como visto na fala: "então existe algumas tecnologias que acabam gerando menos efluentes, mas em compensação as vezes não tem a capacidade de processamento requerido ou as vezes não tem o ganho técnico requerido. Não se chega a uma especificação técnica requerida..." (ESP4). Há até a identificação do uso de tecnologias de filtração, porém não é tão usual.

O minério de ferro interfere na tecnologia para tratamento de efluentes, logo, não tem como definir um método mais eficiente ou um único método utilizado para o tratamento. De modo que uma empresa possa ter diferentes minas de minério de ferro em uma região, por exemplo um estado, e os processos e tecnologias aplicados nos processos de mineração serão diferentes entre as minas (ESP4).

Quanto ao retorno do efluente nos corpos d'água, algumas empresas realizam o tratamento antes do despejo, realizando uma análise técnica e um controle, seguindo as especificações do CONAMA. Porém não há como atestar que todas as empresas realizam o acompanhamento da qualidade deste efluente retornado a natureza, sendo que pode haver a liberação de efluentes tratados acima do limite tolerado (ESP4).

As minas de minério de ferro são obrigadas a ter uma estação de tratamento de efluentes devido a legislação, em especial da Agência Nacional de Mineração (ESP2). Outro ator responsável é a Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) por meio do licenciamento ambiental, principalmente no estado de Minas Gerais. Logo, a empresa precisa ter conhecimento da quantidade de água que entra e sai do processo industrial e de acordo com todas as resoluções do CONAMA (ESP3). De modo, que existe toda uma pressão advinda de regulamentações e legislações de órgãos de regulamentações.

Todas as minas necessitam de um mapeamento dos efluentes gerados nos processos, de modo a entender as consequências destes efluentes e seus tratamentos (ESP5). Empresas que possuem um Sistema de gestão ambiental integrado, como por exemplo o ISO 14000, normalmente já realizam alguns atendimentos a requisitos legais. De modo que a maioria dos atendimentos ambientais realizados pelas empresas é resultado de uma obrigação ou demanda externa, e não interna. Principalmente devida ao conservadorismo do setor mineral, que realiza a análise da questão custo benefício antes de implementar iniciativas ambientais (ESP5).

Deste modo, a legislação está muito presente neste tópico, de forma a determinar a necessidade e qualidade da água a ser tratada. E é forte a presenta de parceria com centros tecnológicos para desenvolver métodos e tecnologias mais eficazes que consigam lidar com os dois principais pontos que podem interferir no tratamento de efluentes, ou seja, a escalabilidade do projeto e a singularidade de cada depósito mineral.

4.3.2 Disposição de rejeitos no setor de minério de ferro

Os resultados da pesquisa referentes ao tratamento e disposição de rejeitos minerais na indústria de minério de ferro são apresentados neste item. O Quadro 17 apresenta um comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 17 - Comparação de itens relacionados ao tratamento e disposição de resíduos minerais entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Principais resíduos minerais do processo	Estéril e rejeitos	Estéril e rejeitos
Disposição do estéril	Pilha de estéril	Pilha de estéril
Tecnologias adicionais relacionadas a pilha de estéril	Malha de monitoramento para entender a composição do minério antes de perfurar	-
Principal método de disposição de rejeitos minerais	Barragem	Barragem
Separação do rejeito	15% lama - rejeito fino - e 85% rejeito arenoso de flotação	Aproximadamente 78% arenoso e 21% rejeito que necessita aperfeiçoamento
P&D de projetos de novos meios de disposição de rejeitos	Sim, desaguamento - filtragem e ciclonagem	Sim
Gerenciamento de riscos e parâmetros ambientais	Sim	Sim

Fonte: Autora

A mineradora 1 utiliza como forma de disposição de rejeitos o depósito em pilha para o rejeito seco – pilha de estéril, considerando o teor de ferro e alumina contido no material para separação como minério ou estéril. Como tecnologia para evitar o excesso de rejeitos secos, a mineradora 1 utiliza malhas de furos de sonda, aproximadamente a cada 25 metros, como forma de analisar as correlações químicas do depósito e fazer a delimitação do que é estéril e o que é minério (EMP1-C).

Os rejeitos advindos da rota de beneficiamento podem ser categorizados em dois tipos: a lama (15%) – granulometria bem fina – e o rejeito da flotação (85%) – rejeito arenoso, composto praticamente por sílica. Estes dois rejeitos, advindos de diferentes processos da usina de beneficiamento, são direcionados para o espessador, processo responsável em aumentar a porcentagem de sólidos e consequentemente recuperar água que retorna para o processo de produção. O resultado deste processo, a polpa, é direcionada e disposto para a barragem de rejeitos. De modo que a única forma de disposição de rejeitos úmidos atualmente na mineradora 1 é a barragem de rejeitos de maciço argiloso, alteada pelo método a jusante, considerado o a estrutura de alteamento mais segura de barragem (EMP1-C).

A classificação deste rejeito da barragem é vista como não perigosa, pois não é um material poluente, não oferecendo perigo de contaminação do lençol freático e solo, logo, não há necessidade de barragem impermeabilizada. O rejeito possui alta turbidez e assim que disposto na barragem de rejeitos, por meio de processos físico-químicos ocorre a decantação do particulado sólido. Permitindo duas destinações para a água: o bombeamento de água de volta para usina de beneficiamento ou o encaminhamento desta água para uma ETE a jusante da barragem, para em seguida retorno aos cursos d'água (EMP1-C).

Para o tópico de disposição de rejeitos, a mineradora 1 sofre exigências regulatória, não por parte de legislação, mas sim por meio de condicionantes ambientais advindas do licenciamento ambiental, que podem ser atualizadas na revalidação deste licenciamento. Logo, estas condicionantes ambientais motivam a empresa a utilizar novas tecnologias de processos e iniciativas ambientais. Como por exemplo a condicionantes 52 que "cinco anos para estudar alternativas que minimizem a necessidade de uma barragem de rejeito, ou seja, aumente o tempo de vida dessa estrutura que está sendo construída ou que faça com que a gente não necessite mais de barragem de rejeito". Principalmente porque o rejeito sempre vai ser gerado na atividade mineral, porém, a forma de dispô-lo pode ser diferente, além de aplicar tecnologias durante o processo que diminuam a quantidade de rejeitos. (EMP1-C).

Neste cenário, a mineradora 1 possui algumas iniciativas e projetos para postergar o fim da vida útil da barragem de rejeitos, tais como: o aumento do ângulo de praia da barragem com a adoção de polímeros agregadores de partículas sólidas, de modo a decantar mais rápido as partículas sólidas e aumentando o ângulo de praia das barragens; e o multi espigotamento que distribuir o despejo dos matérias advindos do processo de espessamento em diferentes pontos pela barragem, evitando que a polpa seja lançada em um único ponto com uma vazão muito alta. A divisão de fluxo de lançamento diminui a energia que consequentemente aumenta a precipitação do material particulado para o fundo da barragem, aumentando a inclinação do ângulo da praia (EMP1-C).

Além de outras iniciativas e projetos com a finalidade de evitar enviar rejeitos para a estrutura de barragem, há o projeto na mineradora 1 do reaproveitamento da lama atual do processo – rejeito advindo do processo de deslamagem, sem considerar a lama que já está na barragem – que precisaria de um novo processo de mineração, devido a separação e um novo beneficiamento. Este rejeito concentra em torno de 40 a 42% de ferro e atualmente é enviado para a barragem de rejeitos. Com projeto para implementação até 2022, a mineradora 1 aplica uma tecnologia chamada *hydrofloat*, que possui a capacidade de recuperar o ferro contido neste

rejeito de particulado fino, consequentemente reduzir a quantidade de rejeito enviado para a barragem (EMP1-C).

E para a finalidade de evitar a disposição de rejeitos em estrutura de barragem, na mineradora 1 há as iniciativas de projetos, com testes em escala piloto, que utilizam a tecnologia de desaguamento, ou seja, ciclonagem e filtragem. Estas tecnologias estão sujeitas a alguns fatores, tais quais: o tamanho da operação mineral, a quantidade de rejeitos gerados e a granulometria do material. A filtragem normalmente é a mais eficaz. A ciclonagem faz a partição das partículas grossas e das finas, é responsável também pelo aumento da porcentagem de sólidos, permitindo o armazenamento desse rejeito desaguado por ciclonagem em baias de decantação, logo após a decantação natural pode-se realizar a escavação mecânica e empilhamento deste material no lugar desejado. "Então a gente vai saber qual é o comportamento geotécnico desse material em diferentes tipos de umidade, qual seria a espessura máxima de lançamento desse material, qual seria o grau de compactação mínimo necessário para que esse material seja estável e não tenha o comportamento contráctil." (EMP1-C). Fatores relacionados com o gerenciamento de riscos e parâmetros ambientais de impactos.

A mineradora 2 possui três abordagens principais para a questão de rejeitos minerais, sendo elas: métodos e tecnologias alternativas de disposição – substituir as barragens e diques por estruturas de empilhamento drenado; tecnologias mais eficientes – aprimorar a retirada do ferro, que por exemplo, pode evoluir para uma areia ou quartzo, dependendo do grau de pureza; e o reaproveitamento, que é a utilização deste rejeito como coproduto de outro processo. Possuindo uma gerência exclusiva para cada uma das abordagens, com estratégias de trabalho integradas para lidar com a questão dos rejeitos e melhorar a eficiência do processo (EMP2-C).

Um dos principais desafios ao lidar com rejeitos é o grande volume de produção gerado. A mineradora 2 possui diversos projetos bem-sucedidos em escala de bancada e testes experimentais de pequenas quantidades, porém a "[...] transferência de tecnologia, de fato, de uma escala piloto para uma escala industrial, é o grande desafio hoje a meu ver na parte de reaproveitamento de rejeitos". A empresa atualmente produz aproximadamente 70 milhões de toneladas de rejeitos, sendo este valor dividido em 55 milhões de toneladas de um produto arenoso – produto que de fato há a possibilidade de inseri-lo no mercado de coprodutos – e os outros 15 milhões de rejeitos são classificados como um produto em aperfeiçoamento, que apresenta desafios tecnológicos maiores (EMP2-C).

O método de disposição dos rejeitos auxilia no reaproveitamento do rejeito, isto é, garante escalabilidade para conseguir inserir o rejeito como produto em outro mercado, de modo a "ter a mesma estabilidade de oferta que um produto natural teria". Como forma de

manter a qualidade desse produto, ou seja, garantir, por exemplo, uniformidade granulometria e química, umidade específica e isenção de matéria orgânica. Além de permitir a retirada de volumes controlados de rejeito, ou seja, volumes pequenos ou significativos a depender da demanda, de modo a ofertar a quantidade que os mercados conseguem absorver (EMP2-C).

Segundo especialista, o interior de Minas Gerais possui um teor de minério de ferro baixo, comparado a outras regiões do Brasil. A mineração com seu caráter extrativista, para conseguir retirar o minério acaba-se gerando resíduos. Em uma média do país de que o teor de minério de ferro é aproximadamente de 65%, logo de 100% de material extraído do depósito de minério, 65% vai ser concentrado de ferro e 35% será de estéril – resíduo como sílica, ganga, entre outros (ESP2).

Há duas fontes de resíduos na mineração, pilha de estéril – resíduos secos - e rejeitos – resíduos úmidos. Porém, em entrevista com especialista identificou-se um complemento a fonte de resíduos sólidos do processo da mineração, além dos advindos do decapeamento – processo de lavra, que seriam os advindos do processo de beneficiamento, material que consegue ser separado antes de entrar no processo à úmido, que também é acumulado nas pilhas de estéril. Logo temos dois materiais secos que são acumulados nas pilhas de estéril (ESP5).

As empresas precisam ter um controle geotécnico muito grande da pilha de estéril para evitar muitos problemas e impactos, como por exemplo, deslizamento de materiais e a contaminação do solo e águas. Logo, é de extrema importância o acompanhamento e controle desta pilha de estéril, não basta achar que esta pilha de resíduos esta seca e, portanto, não precisa de preocupação. Este controle geotécnico permite o controle da estabilidade. Caso a mina do depósito possua algum componente que seja contaminante das águas subterrâneas, se faz necessário o uso de tecnologias para maior controle desta pilha, como por exemplo, canaleta de recolhimento da água escoada, manda geotêxtil, entre outros métodos. De modo, a evitar o contato deste contaminante com os lençóis freáticos. Porém, quando o mineral é inerte, apenas realiza-se o controle de pontos de impacto físicos e não bioquímicos (ESP5).

A outra forma de disposição de rejeitos úmidos, a lama, é a filtro prensagem, que retira o máximo possível da água por meio do método de prensagem físico, possibilitando a disposição destes rejeitos em pilhas. Forma que traz mais estabilidade para o armazenamento destes rejeitos (ESP5). As empresas estão se atentando mais em relação a investimentos em tecnologias que antes não eram analisadas, principalmente após os incidentes com barragens. A nova forma de empilhamento de rejeitos apresenta-se como uma nova perspectiva. Como identificado em entrevista com especialista: “[...] empilhamento dos rejeitos [...] as empresas

estão vendo com outros olhos esse tipo de tecnologia que antes elas não olhavam. Esse não é o custo." (ESP4).

Porém em entrevista com outro especialista destacou-se que esta tecnologia de filtro prensagem possui dois limitantes, o preço de operação que é alto e a capacidade técnica de processamento, que não permite o processamento de grandes quantidades de rejeito. Inclusive, há empresas de minério de ferro localizadas na região próxima a Belo Horizonte que utilizam tecnologias deste tipo (ESP5). É uma tecnologia promissora e já é aplicada na mineração de ferro no Brasil, porém apresenta deficiências como a sua escalabilidade e seu preço de operação, logo, o custo benefício desta tecnologia ainda está em avaliação.

O método de barragem é o mais utilizado atualmente para a disposição de rejeitos úmidos na mineração, como uma forma de disposição dos rejeitos e reaproveitamento e recirculação da água (ESP 2 e 3). Outro método ou tecnologia para lidar com a disposição de rejeitos líquidos – lama – seria o estudo e melhor entendimento do minério. De modo a realizar um processo de lavra mais seletivo, ou seja, mais eficiente – retirando menos ganga junto ao minério. Consequentemente um processo de beneficiamento mais eficiente, que realize a separação do minério e da ganga sem gerar tanto rejeito (ESP5). De modo a repensar os processos para torná-lo mais eficiente.

Outro ponto que se destaca como resultado das falhas nas barragens é a necessidade de monitoramento e gerenciamento de riscos na indústria de mineração, para ser mais específico uma forma de tratar os riscos com eficiência para evitar tragédias nas barragens, que precisa de um monitoramento constante em um ambiente difícil como a mineração. Um dos métodos mais tradicionais de controle e monitoramento de riscos é por meio de leituras manuais e coleta de dados de sensores de fio vibratório, incorrendo em custos de logística e uso de trabalhadores, resultando em informações coletadas desatualizadas rapidamente e ou irrelevantes (IBRAM, 2020).

Uma alternativa para este cenário é migrar da coleta de dados via cabo para soluções de múltiplos sensores, depositados na barragem ou ao redor do talude, para averiguar a poropressão e sua estabilidade. Destaca-se que a análise em tempo real dos dados concedida pelos avanços tecnológicos e o IOT (*Internet of Things*) permite que as mineradoras fiquem menos dependentes das leituras manuais via cabo, existindo um maior controle e aumentando a segurança e a produtividade da empresa (IBRAM, 2020).

Além do depósito ser um grande direcionador das tecnologias e processos na mineração de ferro, existe outro fator que pode ajudar explicar a diferença entre tecnologias e métodos entre minas de minério de ferro de uma mesma empresa, que resultam em resíduos diferentes,

a incorporação de empresas menores, com rotas de tecnologia e métodos divergentes para gestão de resíduos (ESP5), geologia do depósito e tamanho da produção (ESP2 e 3).

Identificou-se que principalmente após as tragédias de rompimento de barragens de rejeitos ocorridas no Brasil em 2015 e 2019, o setor de mineração teve como uma resposta requisitos legais mais restritivos (ESP5), como por exemplo, o estimulo por parte da Agência Nacional de Águas (ANA) às implementações de ações orientadas ao aprimoramento da gestão de recursos hídricos. Com investimentos repassados para a adoção de ações destinadas ao enfrentamento da crise hídrica advinda do incidente de rompimento e seus desdobramentos. Objetivando os efeitos deste tipo de evento referente a segurança hídrica dos cursos d'água e ecossistema localizados a jusante destes barramentos, criou-se o indicador de Segurança nas Barragens de Rejeitos, de modo a controlar e evitar efeitos negativos às bacias hidrográficas próximas deste tipo de incidente (ANA, 2019).

Além de uma maior preocupação da empresa sobre o assunto, principalmente com a imagem da mineração, que advém do custo com este tipo de incidente que abala a imagem da empresa (ESP5). Como identificado na fala da especialista 5 (ESP5): "Porque impactou de uma forma muito severa o setor [de mineração e a] imagem do setor [...] teve um impacto na compra de ações da empresa [na bolsa de valores]. Isso sim, tanto que vimos que as ações da Vale caíram abruptamente logo depois do incidente". Logo a perspectiva de pressão do mercado para a organização é orientada a bolsa de valores e não ao fechamento de negócio pelo comprador do minério de ferro (ESP5).

Após estes incidentes os países importadores assim como a sociedade civil oferecem uma nova e forte pressão a mineradora para a não utilização de barragens e por métodos com menor risco. Sendo que globalmente alguns países importadores estão prestando mais atenção para este cenário e processos de disposição de rejeitos com alternativas as barragens – opções atuais (ESP 2 e 3), além de atuarem diretamente por meio de representantes do setor em relação ao debate do futuro das barragens no Brasil, após impactos severos, como pode ser observado pela fala de especialista e análise documental da vinda de representantes de outros países para tratar o tema (ESP1).

A questão regulatória é um importante determinante dentro do setor mineral, como por exemplo a nova lei de descomissionamento das barragens a montante – uma resposta direta aos incidentes com barragens. No geral, são mais de 50 barragens a montante no setor mineral brasileiro, sendo um grande processo que impacta e pressiona as mineradoras. Principalmente pela interferência no local do processo, isto é, as barragens normalmente estão posicionadas

antes das usinas de beneficiamento o que requer a mudança da estrutura da mina para o descomissionamento das barragens (ESP2 e 3).

Deste modo, a indústria de mineração de ferro é extrativista por natureza, porém, além de possuir um alto gerenciamento de riscos, ainda está sujeita a grandes passivos ambientas, como rompimentos de barragens e outros. Mostrando-se necessário uma maior difusão e adoção de inovações ambientais tecnológicas que permitam a disposição de resíduos minerais e a otimização de processos minerais como forma de reduzir a geração de rejeitos finais.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O pressuposto desta pesquisa é que o modelo de economia circular aplicado aos processos da indústria de minério de ferro, lavra e beneficiamento, permite reduzir os passivos ambientais causados pelo setor, principalmente por meio da difusão e adoção de inovações ambientais tecnológicas que visam a recuperação e reaproveitamento de recursos e resíduos, fomentando a circularidade do processo (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017; VELENTURF et al., 2019). As tecnologias advindas da difusão e adoção da inovação ambiental garantem o melhor fluxo e aplicação do modelo circular, de forma a reduzir as externalidades negativas (JESUS et al., 2019), sendo aplicável em indústrias de grande porte e com altas capacidades poluidoras. Nesta perspectiva, a indústria de mineração por meio dos três princípios da economia circular, pode preservar o capital natural e reduzir os impactos negativos ao ecossistema (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019), além de enfrentar obstáculos ou determinantes gerados pelo ambiente institucional (RANTA et al., 2018). Por seguinte, apresenta-se como necessário identificar e mapear as barreiras que a difusão das inovações ambientais tecnológicas enfrenta, permitindo entender a circularidade na dinâmica setorial do minério de ferro.

Portanto, este capítulo aborda a análise e discussão dos dados coletados em campo – entrevistas – e documentação, de modo a comparar com os pontos mapeados na literatura. Os resultados da pesquisa, fundamentados em elementos dos princípios da economia circular baseados na indústria de mineração de ferro, permitiram identificar as principais barreiras e determinantes para a difusão de inovações ambientais tecnológicas em cada princípio, considerando a dinâmica setorial desta indústria.

5.1 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 1 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO

Esta seção aborda os principais recursos naturais consumidos na indústria de minério de ferro, de modo a apresentar as barreiras e determinantes para a difusão de inovações ambientais que permitem a aplicação da circularidade no Princípio 1 da economia circular.

Quadro 18 - Elementos do primeiro princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas

Economia Circular	Elementos	Barreiras para a difusão de inovações ambientais tecnológicas	Determinantes para a difusão de inovações ambientais tecnológicas
Princípio 1	Uso de energia alternativa	**Tecnológica:** Baixo nível de maturidade das tecnologias causando incertezas das inovações e iniciativas, propiciando o *catch up* de inovação **Organizacional:** Equacionamento de investimentos em tecnologia (custo vs. benefício) **Mercado:** Dinâmica setorial que orienta os custos	**Mercado:** Exigências por produtos mais verdes e eficientes **Mercado:** Taxação de carbono
	Consumo de água	**Organizacional:** Equacionamento de investimentos em tecnologia (custo vs. benefício)	**Regulatório:** Pressão regulatória das outorgas, referente aos riscos em potenciais de abastecimento **Organizacional:** Minimização do custo de operação advindo da cobrança pelo recurso da água **Mercado:** Demanda por especificações que influenciam as inovações e iniciativas ambientais

Fonte: Autora

Desta forma, o consumo energético e hídrico nas indústrias de minério de ferro é intensivo e contribui com o alto impacto ambiental do setor, de modo a se tornar um tópico importante para a conservação do capital natural. Cada categoria apresenta determinantes e barreiras para a difusão da inovação ambiental e aplicação do modelo de economia circular, que convergem na literatura e prática.

5.1.1 Uso de energias alternativas na indústria de minério de ferro

Conforme os resultados apresentados, as principais fontes da indústria de mineração de ferro atualmente, para os dois casos estudados, são combustíveis fósseis para a operação de lavra e consumo energético de rede de fornecimento nacional para beneficiamento. Sendo que a redução das emissões de GEE uma preocupação latente nas duas empresas, descritas em metas futuras para desenvolvimentos de projeto. As fontes mais utilizadas na indústria de mineração são os combustíveis fósseis e a eletricidade da rede nacional. De modo que o gerenciamento de emissões de carbono está diretamente ligado com a questão energética do setor mineral e no desenvolvimento futuro das empresas (VOTTELER; BRENT, 2016).

O setor de mineração é intensivo em energia, consequentemente pequenas reduções podem resultar em economias consideráveis em relação as emissões de gases de efeito estufa e custos com energia (LEVESQUE; MILLAR; PARASZCZAK, 2014). As energias alternativas

podem ser aplicadas no setor de mineração como uma alternativa para reduzir o consumo de combustível fóssil e emissão de gases de efeito estufa (LEVESQUE; MILLAR; PARASZCZAK, 2014). As mineradoras dos dois casos estudados possuem o desenvolvimento de projetos tanto para a eficiência energética como para o uso de energias alternativas, como uma solução para o consumo energético do setor. É importante ressaltar, que as duas mineradoras possuem áreas responsáveis por estes projetos sustentáveis, integradas com outras áreas da empresa.

Em análise externa de especialistas sobre o tópico, identificou-se que o setor de mineração possui uma preocupação ambiental relacionada ao tópico de consumo energético e uso de energias alternativas, mas há um equacionamento do investimento, ou seja, a análise dos benefícios tangíveis comparado ao investimento financeiro. De modo que a questão do custo de tecnologias e iniciativas ambientais é uma barreira organizacional para a difusão de inovações ambientais que incentivem a circularidade da matriz energética da empresa de mineração. A dinâmica setorial da mineração, de *commodities*, dificulta a ampla difusão de métodos de energia renováveis, uma vez que a redução nos preços dos combustíveis e a queda nos lucros da empresa podem implicar em barreiras para esses investimentos a longo prazo, não resistindo a pressões de investidores por capital de curto prazo (VOTTELER; BRENT, 2016).

Apesar do consumo energético estar entre uma das questões mais importantes para a indústria de mineração, principalmente pela associação aos altos impactos ambientais (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016). Como determinantes, identificou-se que a questão regulatória não é tão evidente em relação ao tema, que fica a critério das exigências dos estados e do licenciamento ambiental, de forma discricionária.

No setor de mineração busca-se por fontes alternativas de eletricidade e energia, com o intuito de reduzir custos, diminuir a pegada de carbono e criar maior independência – diferentes matrizes de energia para fornecimento confiável (VOTTELER; BRENT, 2016). A difusão e adoção de tecnologias adequadas e a adoção de inovação auxiliam com os desafios ambientais e outros desafios (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016). Pelas mineradoras dos casos estudados, a implementação de práticas e tecnologias ambientais possui riscos e incertezas. Logo, há uma procura por tecnologias e iniciativas já implementadas por outros setores ou outras empresas concorrentes, que possa ser adaptado pela mineradora em seus processos. Este *catch up* de inovação é visto como uma estratégia para redução de riscos e incertezas.

As cooperações entre empresas fundamentam-se na criação de valor e melhora do desempenho econômico de projetos (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Outro ponto que permite a empresa a lidar com as incertezas dos projetos de inovação, são as parcerias e relação

de cooperação, seja em projetos de energia alternativa, como no desenvolvimento de soluções e tecnologias relacionados com o consumo eficiente de energia e redução de emissões de GEE, sendo o engajamento de partes interessadas internas e externas importantes nos desenvolvimentos de projetos de P&D.

As principais estratégias são a de eficiência energética e descarbonização de energia. Porém, deve-se entender que as iniciativas ambientais e tecnologias de eficiência energética e mitigação de emissões de GEE podem variar consideravelmente entre diferentes *commodities* ou diferentes etapas da cadeia de valor. Práticas ambientais que são implementadas na indústria da mineração, muitas vezes são tecnicamente viáveis, porém economicamente apresentam diferença entre custos de capital e custos operacionais (MCLELLAN et al., 2012). As estratégias das empresas são influenciadas por determinantes do tipo mercado, que reforçam a importância de garantir a eficiência processual, energética e tecnológica, essencialmente para conseguir um 'produto verde' como um diferencial de mercado atrativo para investidores e melhoria da imagem da empresa. Outro ponto que pode influenciar o tema como determinante de mercado é a taxação de carbono, já realizada em outros países de atuação das mineradoras, que auxilia na priorização de projetos mais sustentáveis. E outra forma de pressão de mercado, são as formas de padronização internacional das organizações, que quando listadas na bolsa de valores devem atender alguns requisitos, como por exemplo, *Global Reports Iniciatives* (GRI).

5.1.2 Consumo hídrico na indústria de minério de ferro

A mineração é um importante consumidor local de água na região de atuação, pois além do impacto do consumo hídrico há potenciais riscos na qualidade da água (NORTHEY et al., 2016). As mineradoras apontam que as principais fontes de água para as plantas de mineração, são as águas de rios – outorgadas pelo licenciamento ambiental – e águas subterrâneas.

A água é um recurso essencial para as operações de mineração (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014). Aponta-se que o maior consumo hídrico na mineração de ferro é para a atividade de separação à úmido do minério de ferro e a ganga, no início do processo de beneficiamento. A água nos processos a úmido, destina-se principalmente para a lavagem e separação do minério e da ganga, além da concentração final deste minério – separação sólido-líquido (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014). As duas empresas destinam a água residual do processo nas estruturas de barragens, como forma de disposição e tratamento para reuso no processo. A água utilizada no processo de beneficiamento termina no fluxo de rejeitos minerais, sendo

necessário tratamento deste efluente e em muitos casos a aplicação de processos para a recuperação desta água (NORTHEY et al., 2016).

Considerando o cenário de estresse hídrico, períodos de seca e concorrência de captação de água nas bacias, as empresas mineradoras apresentam metas referentes a redução do consumo de água nova e o aumento da taxa de recirculação de água no processo. Além de reforçar o desenvolvimento de projetos de P&D e tecnologias como solução para o consumo hídrico. Outra iniciativa importante por parte das mineradoras é o investimento em iniciativas de preservação ambiental do capital natural adjacente a mina, como forma de preservar e garantir o abastecimento hídrico da região. Além de projetos que incentivem pesquisas sobre a biodiversidade e possíveis impactos ambientais em potencial com as atividades mineradoras. Os riscos hídricos referentes ao consumo hídrico são potenciais, devido a competição pelo acesso à água que cresce entre os usuários da bacia. Estes riscos podem ser resultados da escassez e estresse hídrico da região, aumento das limitações regulatórias para a utilização de água, questões financeiras – ou seja, custo de captação de água – e imagem da empresa. Além dos riscos diretos a produção, isto é, interrupção da produção, fechamento das operações, aumento dos custos operacionais, entre outros (NGUYEN et al., 2014).

Identificou-se em entrevistas, tanto com especialistas como com mineradoras, que existe uma diferença entre o consumo hídrico das minas da mesma empresa ou da mesma região, principalmente devido a características do depósito mineral, que interferem no processo mineral, nas tecnologias utilizadas, entre outros. Além de questões do depósito, o tempo de atuação da mina, o volume produzido, o tamanho geográfico do espaço também pode ser relacionado com a diferença de consumo hídrico entre minas de minério de ferro. O contexto da unidade operacional pode influenciar o gerenciamento hídrico da indústria de mineração, principalmente porque as características geológicas e o cenário hidrológico da região (OSSA-MORENO et al., 2018). Na indústria de mineração, as operações são dinâmicas e possuem mudanças que estão relacionadas com as características da mina operante, sendo necessário um sistema de gerenciamento hídrico flexível para responder rapidamente a estas variantes (CETEM/MCT, 2001).

As empresas mineradoras sofrem com pressões regulatórias advindas da regulamentação mais rigorosa para a questão do gerenciamento hídrico, que incentivando a recirculação de água nas operações (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018). Observa-se que a questão regulatória possui um maior rigor no tópico de consumo hídrico, principalmente devido aos riscos em potenciais, como por exemplo, falta de água para comunidades adjacentes e outras indústrias da região. De modo que o licenciamento ambiental e órgão do estado de

atuação exigem uma vazão máxima de consumo de água e uma vazão residual mínima – água de retorno, após o processo. Exigindo um controle e gerenciamento amplo da mineradora, referentes a qualidade e quantidade de água captada e retornada as bacias, dos seus fluxos de água internos e seus gastos hídricos.

A mineração é um importante consumidor local de água na região de atuação, pois além do impacto do consumo hídrico há potenciais riscos na qualidade da água. Apresentando-se como um potencial causador de conflitos entre os usuários hídricos da região, como comunidade, outras indústrias, entre outros. É imprescindível que a mineradora mantenha um controle e gerenciamento dos fluxos de consumo de água, de modo a entender as variáveis contidas que afetam o consumo potencial de água e apresente alterações na qualidade da água (NORTHEY et al., 2016). Deste modo, observa-se que na mineradora 1 o gerenciamento do balanço hídrico é integrado, pois analisa o comportamento de outros usuários dispersos pela bacia, de modo a desenvolver um plano de segurança hídrico e mediar conflitos entre usuários. Na mineradora 2 há uma preocupação em estudar os riscos hídricos envolvendo a unidade operacional, pois os riscos relacionados ao consumo de água não estão somente associados a unidade operacional.

O gerenciamento de água pode gerar benefícios como, mitigação do desperdício, minimização da necessidade de água para certas operações e recirculação e reciclagem da água processada. Deste modo, o desenvolvimento e a utilização em conjunto de tecnologias inovadoras podem permitir o uso eficiente da água na mineração (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014). Referente a pressão de mercado para este tópico, destaca-se que o mercado se autorregula, ou seja, o mercado pré-define as especificações, gerando uma resposta organizacional da mineradora, incentivando a difusão das tecnologias e inovações ambientais nos processos da empresa. Porém, o equacionamento de custos com os benefícios será realizado na fase de difusão e adoção de inovações ambientais, isto é, tecnologias e métodos serão analisados e equacionados pela mineradora antes do investimento e aplicação. Por exemplo, o mercado está pedindo uma especificação x para o minério, a empresa irá equacionar o custo do investimento com o retorno de atendimento a especificação, para então aplicação deste projeto.

5.2 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 2 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO

Esta seção aborda os principais recursos consumidos na indústria de minério de ferro e que podem ser reincorporados na produção ou em outras cadeias produtivas. De modo a manter por mais tempo o valor deste recurso na cadeia produtiva, consequentemente mitigar impactos ao meio ambiente. Aborda-se, também, as barreiras e determinantes identificados na pesquisa para a difusão de inovações ambientais que permitem a aplicação da circularidade no Princípio 2 da economia circular.

Quadro 19 - Elementos do segundo princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas

Economia Circular	Elementos	Barreiras para a difusão de inovações ambientais tecnológicas	Determinantes para a difusão de inovações ambientais tecnológicas
Princípio 2 (ciclo técnico)	Reutilização da água residual	**Regulatório**: Falta de delimitação de regulamentação de efluentes e condições práticas de reutilização **Organizacional**: Equacionamento de custos (custo vs. benefícios)	**Regulatório**: Pressão regulatória das outorgas referentes aos recursos hídricos **Organizacional**: Redução de custos operacionais advindo da redução da captação de água nova
	Reaproveitamento dos resíduos	**Regulatório:** Falta de definição de regulamentação para reaproveitamento e responsabilidades **Tecnológico:** Limitações de ordem técnica, referente a reprocessamento de finos e escalabilidade da operação – devido à grande quantidade de rejeitos **Organizacional:** Equacionamento de investimentos em tecnologia (custo vs. benefício) **Mercado:** Falta de demanda, modelos de negócios e inviabilidade de custos logísticos	**Mercado:** Impulsionadores da sociedade e mercado, após grandes tragédias ambientais **Regulatório:** Impulsionadores regulatórios – fiscalizações frequentes e licenciamento ambiental mais rígido – devido a tragédias das barragens **Organizacional:** Ganhos econômicos com o reprocessamento de ferro e valor agregado do rejeito

Fonte: Autora

Deste modo, a criação de ciclos é essencial para a difusão e a adoção da economia circular na indústria de minério de ferro. As categorias apresentaram possibilidade de agregar valor e reduzir custos para as empresas. Além, de apresentarem barreiras e determinantes para a difusão da inovação ambiental e aplicação do modelo circular, atividades ambientais que visam a redução do impacto do setor mineral.

5.2.1 Reaproveitamento de água na indústria de mineração de ferro

A reutilização da água traz benefícios como redução dos custos operacionais, atendimento as exigências ambientais e redução das áreas de represamento dos rejeitos

(ARJMAND; MASSINAEI; BEHNAMFARD, 2019). A recirculação de água possui efeitos positivos para indústria de mineração de ferro e reduz a demanda de água nova das mineradoras. Portanto, identificou-se que é um tópico importante para as duas empresas mineradoras, que investem, individualmente ou em parcerias, em métodos e tecnologias para o tratamento de efluentes e eficiência do consumo hídrico. Estes fatores incentivam a empresa mineradora a adotar metas de recirculação e redução do consumo hídrico. A mineradora 1 possui metas para reduzir a captação de água nova nas plantas e aumentar a taxa de recirculação de água até 2020. A mineradora 2, possui apenas metas para minimizar a captação de água nova nas plantas de mineração, porém explicou que a escolha de apenas meta de redução de captação foi o indicador escolhido para abranger também a taxa de recirculação. Pois a taxa de recirculação de água e a captação de água não são itens que podem ser considerados separados, estes dois critérios devem ser avaliados conjuntamente para uma análise de sustentabilidade do cenário real da planta de mineração.

O setor de mineração atualmente possui o grande desafio de lidar com o impacto tecnogênico no meio ambiente, além de conciliar este desafio com a maximização da extração das reservas minerais. A introdução de novas soluções tecnológicas e novos métodos no sistema de abastecimento de água reciclada auxilia a lidar com os desafios relacionados com o abastecimento de recursos hídricos (PESTRYAK, 2015). O gerenciamento de água verde e o método de recirculação de água é bem visto em regiões com escassez de água ou estresse hídrico, de modo a reduzir o impacto ambiental com o consumo de recurso natural limitado, trazer economia de custo para mineradora – com a economia de captação de água – e melhorar a sustentabilidade da indústria de mineração (HUAZHE et al., 2020). A taxa de reaproveitamento atual nas unidades operacionais de mineração, podem variar de unidade para unidade, considerando que as características geológicas e tecnológicas de processo alteram tanto o consumo hídrico como a taxa de reaproveitamento da planta de mineração de uma mesma região ou empresa. As duas empresas possuem uma média de reaproveitamento de aproximadamente 70%. Um ponto interessante é exemplificar que a mineradora 1 possui taxa de recirculação para a água de transporte, utilizada no mineroduto, ou seja, há um reaproveitamento de água também fora da planta de mineração e beneficiamento, no porto. Especialistas confirmam dados da literatura e das empresas, afirmando que o setor de mineração costuma operar com circuito e água fechado, com taxa de recirculação e reuso de água.

As políticas de reutilização de água no processamento mineral são incentivadas com o objetivo de redução dos impactos das atividades do setor de mineração, assim como as restrições de qualidade da vazão residual – água descartada nos cursos d'água.

Consequentemente as empresas mineradoras têm objetivado tecnologias e pesquisas de métodos de tratamento de água residual que permita o reuso no processo, além de atender as novas exigências ambientais atuais e futuras (CETEM/MCT, 2001). As demandas do licenciamento ambiental e outorgas são mais intensificadas quando a região de localidade da planta mineradora possui escassez de água ou grandes períodos de seca, priorizando o tema de recursos hídricos e reutilização de água. Porém, identifica-se falta de delimitação das regulamentações prática da reutilização considerando suas demandas, o que pode ser uma barreira para investimentos em inovações ambientais.

A recirculação de água apresenta um obstáculo principal, a recirculação de contaminantes que podem interferir na eficácia de processos que utilizam essa água de reuso, sendo necessário um sistema de tratamento de efluentes eficiente (ARJMAND; MASSINAEI; BEHNAMFARD, 2019). Para que o sistema de recirculação de água opere com eficiência é necessário ter métodos e tecnologias que permitam o tratamento adequado da água residuais, de modo a evitar que impurezas e outros componentes – por exemplo íons - contidas nas águas recicladas atrapalhem a eficácia do processo de mineração que reutilizar esta água (PESTRYAK, 2015). Conforme evidenciado na literatura, o especialista destacou que não há como reaproveitar 100% da água, devido a contaminantes e componentes químicos que podem perdurar na água após o tratamento de efluentes e interferir em processos da etapa de beneficiamento. Sendo necessário o descarte de uma parte desta água e a captação de água nova para balancear os componentes da água no processo.

5.2.2 Reaproveitamento de rejeitos minerais na indústria de mineração de ferro

Os rejeitos e sua quantidade significativa gerada são um desafio ambiental. O problema dos resíduos apresenta-se como uma oportunidade para recuperar o valor econômico de materiais, por meio da criação de novas demandas do mercado, melhoria dos preços das *commodities* e desenvolvimento de novas tecnologias (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). Os resíduos minerais contêm uma quantidade significativa de recursos metálicos com valor agregado, antes sendo dispostos como rejeitos, porém são atualmente apontados como recursos potenciais de recuperação de valor na mineração (ILANKOON et al., 2018). Quando se fala de reaproveitamento de rejeitos, há duas formas de realizá-los, ou seja, a utilização deste material como matéria-prima para outra indústria, ou o reprocessamento deste rejeito para reaproveitá-lo como produto final.

No entanto, estas aplicações possuem como desafio principal o grande volume de rejeitos produzidos diariamente (YELLISHETTY et al., 2008). Ou seja, as mineradoras possuem dificuldade em desenvolver projetos com uma escalabilidade que atenda quantidade necessária e a demanda para estes volumes. Há a criação de parcerias com universidades, centros tecnológicos, empresas privadas – futuras clientes – e fornecedores. Porém os projetos no nível de teste de bancada ou experimentos são bem sucedidos, mas falta recursos tecnológicos e outros pontos para dar seguimento nos projetos pilotos em escala real.

Outro desafio é a demanda de mercado para lidar com estes produtos remanufaturados, ou seja, a quantidade de rejeito é tão significativa que a demanda existente, por exemplo, de blocos cimentícios para a construção civil, apenas consumiria uma parte dos rejeitos de minério de ferro. Além, da questão do custo deste produto perante produtos similares já existentes no mercado, isto é, remanufaturar um produto utilizando rejeito de minério de ferro e acrescentar a logística de transporte até a demanda de mercado, aumentaria o seu custo comparado com projetos manufaturados com matéria-prima natural. É preciso o avanço de novos modelos de negócios e tecnologias de reprocessamento eficazes de modo a permitir o fechamento de ciclos de materiais na indústria de mineração (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

A aplicação de um modelo circular na indústria de mineração possui um potencial significativo para a resolução dos desafios advindos da escassez de recursos minerais, poluição ambiental e o desperdício de recursos, podendo agregar lucro econômico para a mineradora (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). O fechamento de ciclos por meio da reciclagem, reutilização e reprocessamento de produtos finais, permite que o valor do material circule por mais tempo na sua cadeia de suprimentos. Resultando na redução de insumos primários e consequentemente na eficiência do processo - evitando perdas desnecessárias (GEISSLER et al., 2018). Deste modo, é importante pensar amplamente na questão de reaproveitamento de rejeitos minerais, ou seja, usar tecnologias no processo para reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos. Além de repensar os modelos de negócio junto a fornecedores e clientes, desenvolver o entendimento de que o rejeito de minério de ferro é sim uma matéria-prima para produções de outros produtos, a fim de criar um diferencial para esse produto. Então estar mais preparado em relação as especificações que este rejeito deve conter para ser utilizado novamente em outras cadeias de produção. Ou seja, pensar na viabilização deste novo produto e não somente na utilização. Sendo um ponto que converge com o primeiro e segundo princípio da economia circular, uma vez que você planeja o processo e seu produto, de modo a projetar qual resíduo se formará e o que realizar com este resíduo para agregar valor à cadeia de suprimentos.

Para o reprocessamento deste rejeito fino – que ainda contém teor de ferro – e para o reaproveitamento é difícil achar tecnologias com capacidade técnica para a quantidade do volume gerado. Sendo necessário o equacionamento do custo de investimento e o retorno econômico para a empresa. Pois, a empresa possui determinantes referente ao valor econômico deste reprocessamento, porém muitas vezes a empresa precisa de mais de um equipamento tecnológico para reprocessar este minério – o que é investimento e custo de operação. As barreiras tecnológicas são apresentadas como uma das barreiras para a adoção do conceito da economia circular na mineração, em que há uma lacuna tecnológica no setor. Embora o desenvolvimento tecnológico possa ser considerado como um fator de valorização dos resíduos minerais, ainda há a necessidade de evolução destas tecnologias, pois a renovação destas tecnologias é prejudicada devido à natureza intensiva de investimentos. Pois esta tecnologia deve ser testada, vista como funcional e ser avaliada quanto ao valor e lucro de modo a justificar o alto investimento (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

Relacionado com o grande volume de rejeitos, os resultados da pesquisa apontam que é importante diversificar o portifólio de projetos e parcerias, de modo a realizar um *trade off* de iniciativas e tecnologias, para aproveitar os melhores nichos e parceiros para cada projeto e tecnologia. Para assim possibilitar a absorção pelo mercado dos seus rejeitos. Discorre-se, também, sobre a dificuldade de engajamento das partes interessadas para o andamento de projetos e iniciativas ambientais de reaproveitamento de rejeitos, desde o funcionário – interno – até o fornecedor e empresas clientes – externo. A reutilização dos resíduos minerais da indústria de minério de ferro envolve uma nova aplicação ou uso dos resíduos da mineração, podendo ser na sua forma original – sem reprocessamento, ou reciclagem, que é a reutilização deste material como matéria-prima em outro processo, ou somente a utilização de componentes valiosos para algum reprocessamento (EDRAKI et al., 2014). Como alternativas de reaproveitamento aponta-se a utilização destes materiais na indústria da construção civil, de modo a reciclar e reutilizar estes materiais para a produção de produtos sustentáveis e diminuir a extração de matérias-primas naturais (SHETTIMA et al., 2016).

A regulamentação pode atuar tanto como determinante como uma barreira para iniciativas ambientais direcionadas para lidar com os rejeitos de mineração. A falta de delimitação e incertezas do quadro legislativo pode ser um impeditivo para iniciativas ambientais e circulares (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). Como barreira para este tópico de reaproveitamento de rejeitos as empresas identificam a falta de definição de regulamentação sobre o tema. Pois a falta de autorização para manipular certo tipo de material ou a definição de riscos e responsáveis por este material pós manufaturado, impede o desenvolvimento de

projetos e iniciativas para reaproveitamento de rejeitos. Além da falta de incentivos fiscais e a dupla taxação do produto remanufaturado, são pontos que se apresentam como barreira para este tópico.

Uma estratégia para reduzir os desafios dos rejeitos da mineração é investir em métodos de reaproveitamento e no desenvolvimento de tecnologias processuais para evitar a geração significativa de rejeitos finos, de modo a reduzir a pegada ambiental (GRABSCH; YAHYAEI; FAWELL, 2020). O reaproveitamento de rejeitos resulta em benefícios para o meio ambiente e a indústria de mineração – em termos econômicos, como por exemplo, minimização da degradação ambiental, redução dos riscos de incidentes e tragédias relacionadas a disposição de resíduos em grandes áreas, reduz os custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos rejeitos, além de reduzir a exploração de agregados naturais para fabricação de novos produtos (BASTOS et al., 2016). A sociedade e o mercado externo agregaram exigências e pressões por iniciativas ambientais das mineradoras, após diversos desastres ambientais ocorridos no setor de mineração, principalmente após o rompimento da barragem ocorridos em 2015 e 2019. Servindo como um agravante para os determinantes regulatórios – que aumentaram a fiscalização nas barragens e proibiram as barragens do tipo montante – como para pressão de mercado, relacionadas a imagem da empresa, em que investidores e a sociedade exigem práticas ambientais.

5.3 BARREIRAS E DETERMINANTES PARA A DIFUSÃO DE INOVAÇÕES AMBIENTAIS EM ELEMENTOS DO PRINCÍPIO 3 DA ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE MINERAÇÃO

Esta seção aborda os principais métodos e tecnologias aplicados ao processo da indústria de minério de ferro identificados na pesquisa, que auxiliam na aplicação dos ciclos da economia circular e na mitigação das externalidades negativas do setor de minério de ferro. De modo a contribuir para a aplicação eficaz do Princípio 1 e 2. E apresenta-se as barreiras e determinantes identificados na pesquisa para a difusão de inovações ambientais que permitem a aplicação da circularidade no Princípio 3 da economia circular.

Quadro 20 - Elementos do terceiro princípio da economia circular no setor de mineração, principais barreiras e determinantes para difusão de inovações ambientais tecnológicas

Economia Circular	Elementos	Barreiras para a difusão de inovações ambientais tecnológicas	Determinantes para a difusão de inovações ambientais tecnológicas
Princípio 3	Redução dos impactos ambientais por meio das tecnologias - tratamento de efluentes	**Tecnológica:** Limitação de capacidade de processamento e alto custo de investimento **Organizacional:** Equacionamento de custos (custo vs. benefícios) **Regulatório:** Falta de delimitação da regulamentação sobre o tópico	**Regulatório:** Delimitação da qualidade vazão residual **Organizacional:** Retorno econômico - reciclagem de água e reprocessamento de rejeitos **Mercado:** Pressão e exigências após incidentes com barragens
	Redução dos impactos ambientais por meio das tecnologias - rejeitos	**Tecnológica:** Capacidade de processamento limitada devido ao alto volume de rejeitos **Organizacional:** Equacionamento de custos (custo vs. benefícios) **Regulatório:** Falta de estrutura jurídica, contábil e fiscal na empresa	**Organizacional:** Ganho econômico com o valor agregado dos rejeitos **Regulatório:** Regulamentações e licenciamento ambiental mais rígido após incidente com barragens **Mercado:** Perda de investimento e imagem organizacional comprometida após incidentes com barragens

Fonte: Autora

Sendo assim, o tratamento de efluentes e a disposição de resíduos minerais auxilia no gerenciamento de externalidades, além de contribuir com o fechamento de ciclos e consequentemente com a preservação do capital natural, dois princípios anteriores da economia circular. Cada categoria apresenta determinantes e barreiras para a difusão da inovação ambiental e aplicação da circularidade considerando o terceiro princípio da economia circular, de modo a afluir literatura e prática.

5.3.1 Tratamento de efluentes na indústria de mineração de ferro

Na indústria de mineração, a lavra e o beneficiamento geram efluentes e rejeitos que oferecem um risco potencial de poluição das águas superficiais e subterrâneas, sendo necessário um controle e gerenciamento rigoroso das operações envolvidas e seus principais fluxos poluidores. Além de um sistema de tratamento de efluentes eficaz para a remoção dos contaminantes e a separação sólido-água, de modo a evitar a contaminação de águas e solos, e atender as exigências ambientais existentes na região da mina (CETEM/MCT, 2001). Neste contexto, os projetos de tratamento de efluentes auxiliam na questão de reaproveitamento de água e reaproveitamento de rejeitos – em outras indústrias ou o reprocessamento de ferro ainda útil. As mineradoras são obrigadas a possuir uma ETE (estação de tratamento de efluentes), para todos os resíduos, de modo a atender a legislação ambiental local. O efluente foco da pesquisa é o industrial, advindo dos processos de lavra e beneficiamento.

A estratégia mais utilizada no tratamento de efluentes é a própria barragem de disposição de rejeitos, que serve de um grande reator para o processo físico de sedimentação das partículas sólidas e do líquido. Ou em alguns casos antes deste efluente ir para a barragem ele passa por processos físico-químicos que auxiliam nesta separação de sólido-líquido e de outros componentes da água (NEDVED; JANSZ, 2006). Diversos métodos de tratamento de efluentes vem sendo utilizados na mineração, sendo eles, físicos, químicos, biológicos ou a combinação entre eles. São técnicas que aplicadas aceleram a separação sólido-líquido e outros contaminantes utilizados no processamento do minério (WANG et al., 2014a). Conforme apresentado pelo especialista, não há como definir um único método de tratamento de efluentes como o mais eficiente, pois a escolha das tecnologias e métodos aplicados no sistema de tratamentos está sujeito a composição química do depósito de minério. As duas empresas utilizam a barragem de rejeitos como principal fonte de tratamento de efluentes, além de processos anteriores de separação sólido-líquido. Sendo os principais métodos de tratamento de efluentes utilizados pelas mineradoras os físico-químicos. Em alguns casos há a utilização de outros métodos, como biológico ou combinados para o tratamento. Porém é consenso de que a flotação seguida de decantação é bem vista na mineração de ferro. Todavia, o especialista levanta outras vertentes da tecnologia de flotação como útil para o tratamento de efluentes na mineração, como a flotação por ar dissolvido (DAF) e a flotação em coluna, confirmando que os métodos mais comuns para o setor de minério de ferro são os físico-químicos.

A decisão de qual o melhor método e tecnologias de tratamento de efluentes, está sujeito a alguns fatores específicos, tais quais, as características do efluente; a legislação em vigor – especificação da qualidade exigida após este tratamento; e por último, os custos associados ao investimento deste sistema de tratamento (ANA:IBRAM, 2013). As tecnologias para tratamento de efluentes ainda enfrentam questões técnicas, como a escalabilidade de projetos para lidar com a grande quantidade de rejeitos, além da viabilidade econômica. Isto é, muitas vezes a tecnologia é ideal para aplicação no processo, porém sua capacidade técnica é mínima, sendo necessária uma grande quantidade de equipamento, tornando-se inviável economicamente. Portanto, há um equacionamento dos benefícios ambientais e financeiros do desenvolvimento e aplicação dos projetos de tratamento de efluentes. Foi identificado que a questão regulatória atua tanto como um determinante como uma barreira. Como determinantes na questão da definição de especificação de qualidade técnica da vazão residual de uma mineradora para retorno aos corpos d'água, exigindo um esforço importante para um mapeamento dos efluentes gerados nos processos e seus tipos de tratamento. E como barreira, identificou-se que a falta de delimitação da regulamentação sobre tratamento de efluentes e em

quais atividades pode-se utilizá-los, limita e dificulta o desenvolvimento de projetos e iniciativas ambientais que tratem sobre este tópico.

É um consenso na indústria de mineração a importância de controlar a poluição ambiental gerada pelas águas residuais, sendo um dos pontos essenciais o tratamento de efluentes, que além da mitigação das externalidades ambientais, é a possibilidade de recirculação de água nos circuitos do processo, por meio de tecnologias adequadas para a remoção dos contaminantes (NEDVED; JANSZ, 2006). Identificou-se a existência de parcerias, entre empresa e centros tecnológicos/ universidades, para o desenvolvimento de métodos, projetos e tecnologias que visam o tratamento de efluentes e rejeitos. Um dos principais determinantes é o retorno econômico de reprocessamento do minério contido neste efluente que seria descartado. Outro determinante para a procura de tecnologias e melhora no tratamento de efluentes seria as recentes tragédias ambientais advindas do rompimento das barragens, que tornaram o setor mineral alvo de policiamento da sociedade e órgão ambientais.

Outra questão que envolve o tratamento de efluentes, são as águas de descargas advindas de chuvas, que podem oferecer uma composição química prejudicial ao meio ambiente. Deste modo, precisa passar por uma neutralização e tratamento antes de ser descartada nos cursos d'água, muitas vezes são redirecionadas para bacias de drenagens para tratamento (NEDVED; JANSZ, 2006). As duas empresas possuem diques de contenção para segurar os efluentes advindos da chuva, porém especificou-se que é um grande desafio quando o volume da chuva é alto, pois não há tempo hábil para o tratamento destes efluentes. A água e resíduos que ficam dispostos nestes diques de contenção são reaproveitados posteriormente.

5.3.2 Tratamento e disposição de rejeitos minerais na indústria de mineração de ferro

Os rejeitos minerais são misturas heterogenias e sua caracterização é feita considerando três fatores principais: o tamanho do grão, a mineralogia e a morfologia de seus componentes (WANG et al., 2014a). Na atividade de mineração de ferro destaca-se dois tipos de resíduos minerais principais, o estéril – resíduo sólido advindo da decapagem do depósito de minério – e os rejeitos – resíduo úmido resultado do beneficiamento mineral. Os resíduos sólidos são armazenados em pilhas – as pilhas de estéril (IBRAM, 2016). E os rejeitos advindos do processamento de minério de ferro são enviados para o mesmo tipo de disposição, as barragens (FREITAS et al., 2019) - reservatórios criados por diques de contenção ou estruturas de barragens, feitos de solo natural ou construídos pelo próprio rejeito (IBRAM, 2016). Relacionado a questão dos resíduos as duas mineradoras apresentaram dois principais rejeitos,

o estéril – resíduo seco – e o rejeito – resíduo úmido. Podendo haver uma separação entre o rejeito úmido advindo do beneficiamento, fato que converge com a literatura. O método mais comumente utilizado para a disposição do estéril é o empilhamento e para a disposição dos rejeitos – seja lama ou rejeito arenoso - é a barragem de rejeitos. Um grande desafio para este tópico é o grande volume de rejeitos gerados pelas atividades de mineração. As duas mineradoras explicam não haver necessidade de tratamento específico do rejeito. Sendo necessário apenas a realização de controle de pontos de impacto físico e geotécnico.

Existem diferentes modos de dispor os rejeitos atualmente, sendo os mais comuns: as barragens, em cavas esgotadas, disposição em passa, por empilhamento a seco. A escolha para a seleção destes métodos deve levar em consideração as condições geológicas, topográficas e meteorológicas da região da mina; o poder de impacto ambiental dos contaminantes contidos nos rejeitos; a natureza do processo de mineração (IBRAM, 2016). A barragem para as duas empresas serve como método de disposição de rejeitos, como armazenamento de água e separador sólido-líquido de decantação natural. Identificou-se projetos que utilizam o uso de reagentes químicos para acelerar este processo de decantação, como uma forma de diminuir o ângulo de praia da barragem e consequentemente aumentar a vida útil da estrutura. As empresa, quando se trata de qual o método de estrutura de barragens escolher, avaliam a atratividade das opções considerando os custos das diferentes formas de disposição e três variáveis principais: preço da *commodity*, custo com possíveis penalidades e a probabilidade de falha na barragem (ARMSTRONG et al., 2019).

A reputação negativa do setor mineral está relacionada as consequências ambientais e sociais advindas das atividades extrativistas (GEISSLER et al., 2018). E a geração e acumulação de grandes quantidades de rejeitos minerais é um grande desafio para o setor de mineração (QI; FOURIE, 2019). Com o avanço das tecnologias, permitiu-se que as empresas mineradoras explorassem a extração de depósitos com menor teor de minério, porém, este tipo de exploração gera maiores volumes de rejeitos – em 2012 foi aproximadamente 2,25 toneladas de rejeitos por 1 tonelada de minério (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019). Ou seja, a difusão e o desenvolvimento de tecnologias avançadas permitiram prolongar a vida útil de um depósito de minério de ferro. Porém, este prolongamento gera maiores resíduos, sendo ainda necessário a difusão e desenvolvimento de tecnologias que possibilitem reprocessar o material considerado como rejeito, de modo a tecnologia permita explorar o recurso com a mitigação dos impactos ambientais dos processos.

De modo que tragédias de rompimentos de barragens estão relacionadas com o aumento da demanda de minério, grau e o custo de produção (ARMSTRONG; PETTER; PETTER,

2019). Após os desastres ambientais do rompimento de barragens ocorridos em 2015 e logo depois em 2019, cresceu pressões regulatórias e de mercado para o setor de mineração. Impactando na imagem do setor de mineração como um todo, exigindo um maior gerenciamento de riscos e investimentos neste tópico. A pressão regulatória pode ser identificada com a condicionante 52 do licenciamento ambiental que obriga as mineradoras a estudar alternativas que minimizem a necessidade de barragens como forma de disposição de rejeitos e com o descomissionamento das barragens a montante. A pressão do mercado é vista em forma de perda de investimentos e prestígio das empresas mineradoras na bolsa de valores.

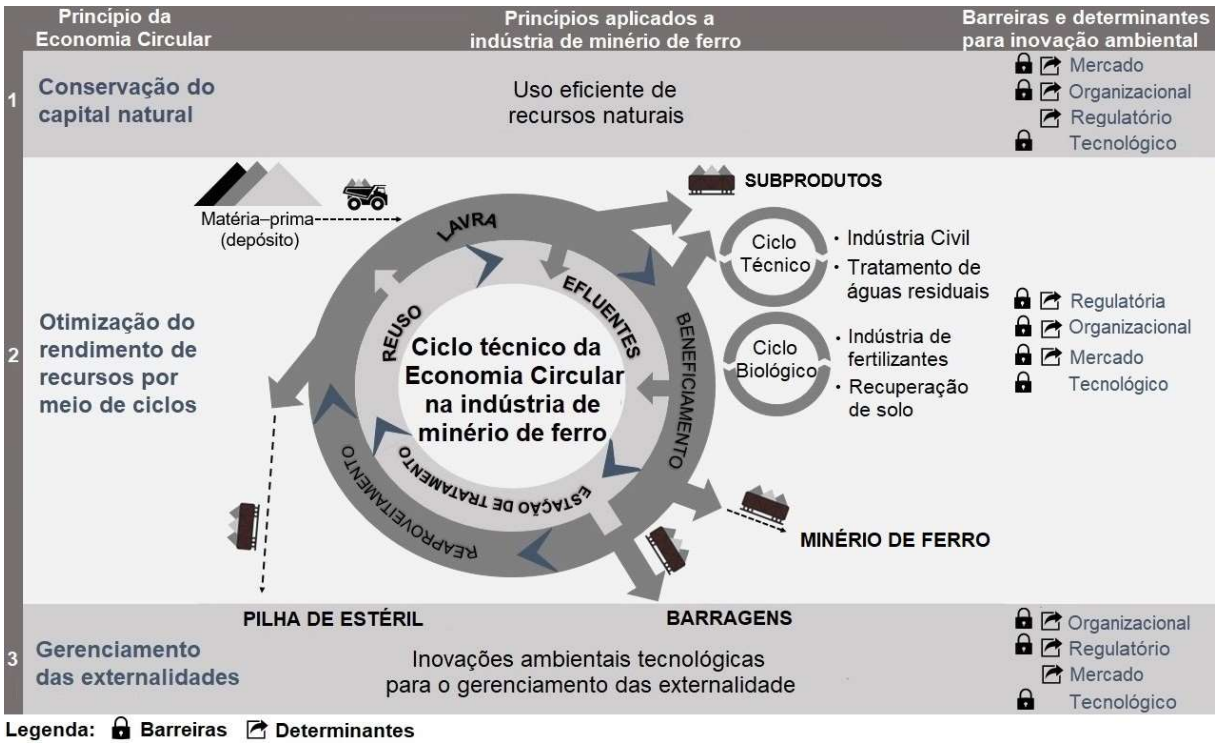
É importante ressaltar que não existe um único método responsável por resolver os problemas de rejeitos finos, e sim deve se combinar métodos e tecnologias para lidar com este grande desafio (WANG et al., 2014a). A forma mais difundida como eficiente a longo prazo, é a mudança das tecnologias do processamento mineral, a fim de reduzir e mitigar a geração de grandes quantidades de rejeitos. Outra maneira, é a utilização de novas tecnologias e inovações que permitem espessar o rejeito, ou seja, aumentar a sua concentração de sólidos para até 75%, permitindo o empilhamento e o uso de aterros em passa. E a última forma é a reutilização, reciclagem e o reprocessamento de rejeitos também como uma forma de redução da quantidade de rejeitos dispostos (ARMSTRONG et al., 2019). Como forma de lidar com este cenário de pressão para este tópico de rejeitos, a difusão de inovações ambientais tecnológicas apresenta-se como uma nova perspectiva para lidar com este desafio. Como por exemplo as tecnologias de desaguamento – ciclonagem, filtragem e prenssamento – que permitem dispor os rejeitos por meio do empilhamento, pois retira a água permitindo uma maior concentração de sólido e líquidos. Então as empresas estão investindo em pesquisas e desenvolvimento da aplicabilidade destas tecnologias no setor de uma maneira mais ativa, sem equacionar tanto a parte do custo, como uma mudança no posicionamento estratégico da organização. E a especialistas levantou que é necessário um pensamento amplo de todo o processo mineral – principalmente o beneficiamento, para evitar a geração de resíduos, em convergência com o princípio um da economia circular que destaca o planejamento do produto e processo deste o início.

Quando há um rompimento das barragens, ocorre graves danos ambientais e perdas de vidas (ARMSTRONG et al., 2019). Por estas e outras razões que a questão do descarte e disposição de rejeitos recebeu enorme atenção da sociedade e governo, resultando em um dos maiores desafios atuais enfrentados pelo setor de mineração (QI; FOURIE, 2019). Baseado neste cenário, o gerenciamento de resíduos minerais está em pauta para regulamentações governamentais e o próprio público em geral, de modo a fazer as empresas mineradoras abordarem os impactos ambientais deste tópico da atividade da mineração. Porém as

tecnologias atuais, ainda apresentam limitações técnicas – capacidade de processar a quantidade de rejeito desejado – e limitações de custos – alto custo de investimento (WANG et al., 2014a). Além de projetos para postergar a vida útil da barragem orientados pelo licenciamento ambiental mais rigoroso – como por exemplo o condicionamento 52 as duas mineradoras possuem pesquisas de P&D para métodos alternativos de disposição, para o reprocessamento de produto útil contido nos rejeitos – ferro contido nos finos – e para o reaproveitamento dos rejeitos como matéria prima em outras indústrias. Porém aponta-se que a questão regulatória não é tão definida, falta estrutura jurídica, fiscal e contábil para incentivar inovações e iniciativas ambientais no setor de mineração, como políticas de incentivo. Que podem impossibilitar testes e projetos de P&D por falta de definição de direito de manipular certos materiais, por exemplo.

De modo que os resultados apresentados neste capítulo são aplicados no modelo de análise, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Modelo de análise do ciclo técnico de economia circular do setor de mineração e barreiras e determinantes da difusão de inovações ambientais tecnológicas



Fonte: Autora

Deste modo, por meio do modelo de análise apresentado é possível identificar o ciclo técnico da economia circular dentro dos processos de lavra e beneficiamento de minério de

ferro. E fundamentados nos princípios da economia circular, apresenta-se as barreiras e determinantes para a difusão de inovação ambiental que contribuem de modo a influenciar a circularidade no setor de minério de ferro. As categorias do modelo foram fundamentadas em elementos dos princípios da economia circular, principalmente, considerando que o objetivo final da difusão das inovações ambientais é auxiliar na circularidade do setor de minério de ferro.

Identifica-se que os itens de Mercado, Organizacional e Regulatório podem atuar tanto como determinantes como barreiras para a difusão da inovação ambiental, o que irá definir é o alinhamento com as causas ambientais destes componentes. Porém, identifica-se que o item Tecnológico não atua como determinante da difusão da inovação ambiental em nenhum dos princípios da economia circular no caso da indústria de mineração de ferro, este fato pode ser explicado pelo nível de desenvolvimento das capacidades tecnológicas das mineradoras, ou seja, a capacidade de absorver informações e valores influencia o potencial de inovação de uma empresa. Pois, uma vez que a empresa adquire conhecimento de fontes externas internas é uma forma de aumentar inovações, principalmente as de cunho sustentável (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019). Isto é, uma vez que a empresa assimila conhecimentos de modo a difundir inovações, reconhecendo o valor agregado destas iniciativas, estimula o P&D e respostas organizacionais verdes a desafios da dinâmica setorial.

Outro ponto a se destacar, a questão organizacional está presente como barreira e determinantes da difusão da inovação ambiental nos três princípios da economia circular, sendo a principal causa o equacionamento do benefício e custo. Pode-se entender como uma forma cultural, ou seja, a empresa não entende de imediato a circularidade das inovações difundidas, apresentando uma dificuldade em alinhar as decisões organizacionais a causa ambiental de imediato. Isto é, há iniciativas ambientais e discursos organizacionais difundindo iniciativas sustentáveis, porém ainda não se apresentam como suficientes, ainda estando em evolução nesta dinâmica setorial de alto impacto ambiental. Aponta-se que restrições financeiras tendem a limitar as inovações ambientais muito mais do que outros tipos de inovações (LEITÃO; DE BRITO; CUBICO, 2019), sendo complexo o desenvolvimento de capacidades organizacionais que promovam inovações de cunho ambiental em maior amplitude que inovações tradicionais.

Desta forma, é complexo o alinhamento destes itens que podem atuar tanto como barreiras como impulsionadores da difusão de inovação e circularidade na indústria de minério de ferro, lidando com a atividade contínua de influência de atores externos e internos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar os desafios que dificultam a difusão da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração. Para alcançar este objetivo foi realizado, primeiramente, uma revisão na literatura como forma de identificar os impactos ambientais relevantes acarretados pelas atividades da mineração de ferro; assim como mapearas inovações ambientais tecnológicas que podem reduzir estes impactos quando difundidas e aplicadas ao setor; e explorar as possíveis barreiras e determinantes para a difusão destas inovações ambientais tecnológicas de modo a influenciar a circularidade na indústria de minério de ferro.

Diante disto, mapeou-se os principais impactos ambientais ocasionados pela indústria de mineração de ferro: o alto consumo de recursos e a geração de grandes volumes de resíduos minerais, principalmente quando relacionado ao volume da produção. Sobretudo para a questão da água, é necessário um controle de qualidade e quantidade de volume consumido e devolvido para o meio ambiente, de modo a não causar impactos em comunidades e empresas adjacentes a atividade mineradora. Para a questão da energia identificou-se o uso de energias alternativas, essencialmente de matriz hidrelétrica, considerando as características do Brasil. E em relação a geração de resíduos, o grande desafio é o grande volume processado pelo setor, de modo a possuir potenciais riscos e passivos ambientais na sua questão. Principalmente considerando os eventos ocorridos em 2015 e 2019, rompimento de barragens, que gerou uma enorme atenção para o setor de mineração referente a este tópico.

Quanto as inovações tecnológicas ambientais difundidas e aplicadas no processo de mineração de ferro, em sua maioria, são tecnologias focadas em separação sólido-líquido e tratamento de efluentes baseados em método físico-químico principalmente, podendo ser em alguns casos específicos métodos biológicos. Apesar destas tecnologias estarem agregadas no Princípio 3 da economia circular, ou seja, gerenciamento das externalidades, também influenciam nas categorias do Princípio 2. Isto é, é necessário tratar os efluentes antes de reutilizar a água no processo e é preciso adotar tecnologias de separação de sólido-líquido para reaproveitar o rejeito para outra indústria ou reprocessar a lama e estéril. Além de que tecnologias de separação sólido-líquido permitem novas formas de disposição de rejeitos diferentes das tradicionais.

Na aplicação do Princípio 1, conservação do capital natural, referente a categoria de consumo energético e energias alternativas, a indústria de mineração de ferro utiliza matriz de combustíveis fósseis e energias alternativas, esta última como forma de mitigar o alto consumo

e redução de emissões de GEE de suas atividades. Além de difundir e realizar projetos de P&D para aprimorar e desenvolver a eficiência energética. A preocupação com o tema é identificada, também, com a definição de metas referentes ao tópico como forma de direcionar esforços do setor. As mineradoras realizam parcerias para auxiliar tanto em projetos de energias alternativas como no desenvolvimento dos projetos de eficiência energética. As barreiras para a difusão de inovações ambientais desta categoria são principalmente: organizacionais – relacionada ao equacionamento de valor devido ao alto investimento para os projetos; tecnológicas – muitas vezes as tecnologias existentes no mercado não podem ser aplicadas ao porte da atividade de mineração de ferro; e de mercado – considerando a orientação dos custos pela dinâmica setorial do minério de ferro. Os determinantes para esta categoria são de mercado analisando as exigências por produtos verdes e a taxação de carbono que orientam as iniciativas ambientais. Observa-se que o item de Mercado, considerando esta categoria, atua tanto como determinante, como barreira, principalmente devido ao alinhamento externo para a questão de proteção e responsabilidade ambiental.

Para o Princípio 1, preservação do capital natural, categoria de consumo de água, identificou-se que a indústria de mineração possui um grande interesse no tópico, principalmente considerando a importância do recurso para as operações. Portanto, há a definição de metas de redução de captação de água nova e difusão e desenvolvimento de projetos para o consumo hídrico eficiente. A única barreira identificada para este tópico foi de caráter organizacional, quando a empresa considera o equacionamento do benefício e custo antes de implementar uma iniciativa ou inovação ambiental. Como determinantes, destaca-se: o regulatório – pressão das outorgas e licenciamento ambiental; organizacional – retorno financeiro com a redução da captação de água nova; e de mercado – demanda por especificações do minério interferem na escolha e aplicação de iniciativas e inovações ambientais. Neste caso, observa-se que o item Organizacional está atuando nesta categoria tanto como determinantes, como barreira, isso pode estar relacionado ao alinhamento interno da empresa comparado aos desafios da conservação dos recursos naturais.

Quanto ao Princípio 2, otimizar os rendimentos de recursos por meio da criação de ciclos, referente a categoria de reaproveitamento de água, não foram identificadas barreiras relevantes para o tema. As mineradoras utilizam a forma de reuso do recurso hídrico, como uma maneira de reduzir a captação de água do setor – redução de custos, estar dentro das exigências de licenciamentos ambientais e garantir o abastecimento deste recurso para a produção. As duas mineradoras dos casos da pesquisa possuem metas definidas, relacionadas a redução da captação de água nova, que influencia diretamente na taxa de recirculação de água nas

empresas, atuando com uma taxa de aproximadamente 70% de reaproveitamento. Como barreiras para a difusão de inovações ambientais nesta categoria, identificou-se: o regulatório – falta de delimitação de condições práticas da reutilização da água tratada - e organizacional – equacionamento de custos. Destaca-se que os itens das barreiras atuam como determinantes, porém por razões diferentes: organizacional – redução de custos advinda de menor captação de água nova – e regulatório – pressão regulatória das outorgas, determinantes do consumo hídrico que também atua nesta categoria de reaproveitamento de água.

No que diz respeito ao Princípio 2, categoria de reutilização de rejeitos, identificou-se barreiras de mercado, tecnológica e regulatória, cada qual aplicada em um cenário específico. O reaproveitamento de rejeitos da mineração pode ser entendido como reprocessamento de material – ferro – ainda útil que antes, por falta de tecnologia eficiente, era considerado como rejeito; e reaproveitamento de rejeito como insumo para outras indústrias. A barreira de mercado apresenta-se como a falta de estrutura de demanda de produtos realizados com o reaproveitamento de rejeitos, ou seja, o grande volume de rejeitos não seria atendido apenas pela demanda de uma indústria específica, necessitando de parcerias, novos modelos de negócios e *trade off* de oportunidades e demandas. A barreira tecnológica é criada devido ao grande volume de rejeitos gerados pela atividade mineradora, de modo que a tecnologia não possui uma capacidade técnica de processamento que atenda ao grande volume, sendo muitas vezes bem-sucedida em escala laboratorial, porém com dificuldades para escala industrial. A barreira regulatória está presente na falta de delimitação e incentivos fiscais para a reutilização dos rejeitos como matéria-prima de outras indústrias, ou seja, como forma de definir responsabilidade e cobranças fiscais. Ou seja, não havendo nenhum tipo de sistema tributário que incentive os benefícios da recuperação junto a empresa, impossibilitando o alinhamento de estratégias organizacionais e de arranjos institucionais com *stakeholders*. E a barreira organizacional é resultado do equacionamento da empresa perante os custos e os benefícios da iniciativa ambiental. É consenso que há um determinante para o tema advindo das tragédias ambientais de rompimento de barragens ocorridas em 2015 e 2019, aplicados principalmente pelo mercado e regulatório, que incentivam desenvolvimento de projetos e tecnologias alternativas para a disposição pura do rejeito, surgindo como oportunidade para esta categoria. Outro determinante identificado é o organizacional que surge com a possibilidade de recuperação de valor com o reprocessamento e reaproveitamento de material útil considerado como rejeito. Para esta categoria no Princípio 2 identifica-se como grande desafio, que está relacionado praticamente com todas as barreiras desta categoria, o alto volume de rejeitos gerados no processo, apresentando-se como necessário novas soluções de circularidade e

processos que gerem menos resíduos minerais, de modo a facilitar esta categoria e diminuir as barreiras destacadas acima.

Para o Princípio 3, gerenciamento das externalidades negativas, categoria de tratamento de efluentes, identificou-se duas barreiras, a tecnológica e a regulatória. É importante ressaltar que em relação a este tópico, a geologia do depósito de minério influencia e não permite a definição de uma tecnologia ou um método único como mais eficiente, destacado por especialistas e mineradoras. A barreira tecnológica é determinada na incapacidade técnica de escalabilidade dos projetos, resultado do grande volume de rejeitos gerados. Apesar da regulamentação e licenciamento ambiental exigirem estações de tratamento de efluentes nas operações de mineração – atuando como determinante, a barreira regulatória deve-se a falta de delimitação de possibilidades de atividades de utilização após aquele tratamento, o que dificulta a difusão e desenvolvimento de projetos e iniciativas ambientais por parte das empresas mineradoras para esta questão. O quesito organizacional, também atua como determinante e barreira, pois apesar de apresentar um retorno financeiro para empresa com a possibilidade de reaproveitamento hídrico e tratamento de rejeitos, a mineradora ainda realiza o equacionamento do investimento referente as iniciativas e inovações ambientais. Outro ponto identificado como determinantes é a pressão do mercado devido as tragédias envolvendo rompimento de barragens ocorridos em 2015 e 2019, que impactou a imagem do setor exigindo atitudes ambientais das mineradoras. Portanto, é possível identificar para esta categoria o caráter dúbio dos itens que dependendo do alinhamento e da motivação, podem atuar tanto como barreiras como determinantes para a difusão de inovações e iniciativas ambientais, influenciando no alinhamento e decisões estratégias da organização.

Quanto ao Princípio 3, categoria de tratamento e disposição de rejeitos, há três formas de tratar e lidar com este tópico, que é o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos para diferentes modos de disposição de rejeitos perante os atuais – barragens são as mais utilizadas; o reprocessamento do material útil contido neste rejeito, de forma a reduzir os rejeitos dispostos; e o reaproveitamento dos rejeitos com insumo para outras cadeias de produção – também como uma forma de diminuir a quantidade de rejeitos dispostos. O grande desafio da indústria de mineração é o grande volume de rejeitos gerados por suas atividades de processamento. As barreiras identificadas para esta categoria foram: tecnológica, relacionada a esta questão da quantidade significativa de rejeitos e a capacidade técnica de processamento, implicando ou na impossibilidade de aplicação em escala industrial ou muitas vezes no alto custo de investimento; regulatório, advinda da falta de estrutura de incentivo fiscal, jurídico e contábil que outros países possuem; e organizacional, com o equacionamento entre alto custos de

investimento e os benefícios da inovação. E para esta categoria como determinantes identificou-se os eventos de rompimento de barragens ocorridos em 2015 e 2019, que consequentemente incentivaram e evidenciaram a indústria da mineração tanto no quesito de licenciamentos ambientais mais rígidos – exemplo do condicionamento 52 do licenciamento ambiental e a lei de descomissionamento de barragens a montante; e de mercado – impacto na imagem da empresa perante mercado financeiro e perda de investimentos na bolsa de valores. Outro ponto que pode incentivar a difusão de inovações e iniciativas ambientais pela empresa é a possibilidade de recuperação de valor agregado advindo dos rejeitos de mineração. Fatores estes que impulsionam a empresa mineradora a desenvolver e pesquisar tecnologias para lidar com o tópico de tratamento e disposição de rejeitos. Para esta categoria, também é possível identificar a dualidade de itens, que podem atuar como barreiras ou determinantes, a depender do alinhamento para a questão ambiental e sua motivação, gerando um caráter ambíguo para a empresa, que pode ver vantagens em alguns pontos, mas ainda equacionar incertezas e custos antes de difundir e desenvolver projetos de inovação ambiental.

Portanto, é possível observar que as barreiras apresentadas para cada categoria de cada princípio da economia circular é um obstáculo para a difusão de inovações ambientais tecnológicas para o setor de minério de ferro, que dificultam o alinhamento e motivação das estratégias organizacionais. Um ponto em comum que poderia auxiliar no enfrentamento destes desafios para todos os itens – Mercado, Regulatório, Organizacional e Tecnológico – seria articular arranjos institucionais que permitam a difusão de iniciativas ambientais e a circularidade nesta dinâmica setorial. Ou seja, integrar os diferentes agentes – internos e externos - envolvidos na cadeia de valor, de modo a convergir interesses e alavancar mudanças de paradigmas, por meio de consórcios de pesquisas empresa-fornecedor, empresa-empresa, ou empresa e poder público. É valido apontar, que o setor de mineração, incluindo minério de ferro, possui atualmente uma iniciativa de consórcio de inovação aberta, de modo a reunir empresas do ramo e fornecedores, para difundir e desenvolver projetos para resolução de problemas comuns do setor mineral.

Deste modo, conforme apresentado, a indústria de mineração de ferro já possui possibilidades de incluir a circularidade técnica dos princípios da economia circular nos seus processos, necessitando de um direcionamento e alinhamento de determinantes para alavancar a difusão de inovações ambientais tecnológicas, além do desenvolvimento e evolução de tecnologias e métodos que cada vez mais mantenham o ciclo técnico no setor. A contribuição do presente trabalho foi mapear quais as principais inovações tecnológicas difundidas e utilizadas para mitigar os impactos ambientais no setor de minério de ferro, além de apresentar

um modelo de análise que destaca as principais barreiras e determinantes - baseados em elementos dos princípios de economia circular - que implicam na difusão das inovações ambientais e na circularidade da indústria de mineração de ferro, de modo a possibilitar a implementação da economia circular nesta dinâmica setorial.

Portanto, respondendo à questão norteadora da pesquisa, os resultados da pesquisa apontam que existem barreiras organizacionais, tecnológicas, de mercado e regulatórias que em alguns casos impedem a difusão da inovação ambiental tecnológica para a implementação do modelo de economia circular na indústria de mineração de ferro. Porém, estas mesmas barreiras quando direcionadas, podem servir como determinantes para gerar oportunidades e a circularidade no setor. Diante deste cenário, é possível afirmar que há um campo de investigação relacionado a difusão e adoção de inovações ambientais tecnológicas para a indústria de minério de ferro, com o propósito de contribuir com a circularidade, alinhar os determinantes e romper com as barreiras apontadas na pesquisa, reduzindo os impactos ambientais advindo da atividade mineradora.

Destaca-se como principal limitação deste estudo, a pandemia global causada pelo vírus COVID-19, que ocorreu de março de 2020 até o final na pesquisa. Em decorrência da pandemia o governo paralisou-se atividades e instituiu o isolamento social como medida para conter o contágio do vírus. Esta medida, dificultou o acesso as instalações das mineradoras, como visitas as operações e entrevistas pessoalmente. Contudo, essa limitação não impediu a continuidade do estudo junto as mineradoras e especialistas, pois realizou-se entrevistas remotamente e utilizou-se outras fontes de evidências – documentação e dados visuais - muito eficazes, que contribuíram para atingir o objetivo proposto. A inclusão no recorte de entrevistados da pesquisa, de responsáveis das mineradoras e especialistas do setor de mineração, contribuiu para aumentar a confiabilidade das informações.

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se progredir no espaço conceitual e teórico do ciclo técnico da economia circular aplicado na indústria de minério de ferro, de modo a incluir a etapa de refinamento do minério de ferro – siderurgia. Analisar os possíveis arranjos institucionais – poder público, empresa, mercado e fornecedores - que podem facilitar e influenciar a circularidade técnica no setor e na cadeia de suprimentos como um todo. Além de adentrar outras indústrias complementares ao setor de mineração, como por exemplo a indústria da construção civil que se apresenta como um grande potencial de absorção de rejeitos de minério. E entender qual o impacto ambiental, determinantes e barreiras institucionais destas indústrias em sua operação normal e com a aplicação de matéria-prima de reuso – rejeitos, de forma a entender a circularidade da cadeira produtiva do ciclo técnico resultado do minério de

ferro. Este aprofundamento de cadeias produtivas, possibilitaria uma visão mais ampla de viabilidade da economia circular em outras indústrias e como perpetuar o ciclo técnico, identificando as principais barreiras, os principais determinantes e quais os impactos ambientais deste tipo de atividade.

REFERÊNCIAS

AID, G. et al. Expanding roles for the Swedish waste management sector in inter-organizational resource management. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 124, n. March 2016, p. 85–97, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.007>. Acesso em: 01 aug. 2019.

AIRES, U. R. V. et al. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 70, n. April 2017, p. 63–70, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.026>. Acesso em: 15 fev. 2020.

AL-GHOUTI, M. A. et al. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 28, n. September 2018, p. 222–239, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.001>. Acesso em: 21 jan. 2020.

ALBORT-MORANT, G. et al. Mapping the field: A bibliometric analysis of green innovation. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 1–15, 2017.

ALSAIARI, A.; TANG, H. L. Field investigations of passive and active processes for acid mine drainage Treatment: Are anions a concern? **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 122, n. July, p. 100–106, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.035>. Acesso em: 05 fev. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019:** informe anual. Brasília: ANA, 2019.

_____; IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Water resource management and the mining industry.** Brasilia: ANA; IBRAM, 2013.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília: ANM, 2019.

ARJMAND, R.; MASSINAEI, M.; BEHNAMFARD, A. Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 31, n. June, p. 100873, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100873>. Acesso em: 13 dez. 2019.

ARMSTRONG, M. et al. Accounting for tailings dam failures in the valuation of mining projects. **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. July, p. 101461, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101461>. Acesso em: 11 jan. 2020.

_____; PETTER, R.; PETTER, C. Why have so many tailings dams failed in recent years? **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. November 2018, p. 101412, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>. Acesso em: 11 jan. 2020.

ARRANZ, N. et al. Incentives and inhibiting factors of eco-innovation in the Spanish firms. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 167–176, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.126>. Acesso em: 09 out. 2019.

AYVAZOĞLUYÜKSEL, Ö.; FILIK, Ü. B. Estimation methods of global solar radiation, cell temperature and solar power forecasting: A review and case study in Eskişehir. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 91, n. May 2017, p. 639–653, 2018.

AZARYAN, A. A. et al. Ways to Reduce Ore Losses and Dilution in Iron Ore Underground Mining in Kryvbass. **Science and innovation**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 17–24, 2018.

AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, H. A.; RUBIO, J. Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high rate dissolved air flotation. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 127, n. May, p. 114–121, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.011>. Acesso em: 27 jan. 2020.

BAI, C.; KUSI-SARPONG, S.; SARKIS, J. An implementation path for green information technology systems in the Ghanaian mining industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 164, p. 1105–1123, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.151>. Acesso em: 26 dez. 2019.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. Lisboa: Edições 70, 1977.

BASSI, F.; DIAS, J. G. The use of circular economy practices in SMEs across the EU. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 146, n. March, p. 523–533, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.019>. Acesso em: 09 out. 2019.

BASTOS, L. A. de C. et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 1–9, 2016.

BEARMAN, R. A. Step change in the context of comminution. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 43–44, p. 2–11, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.06.010>. Acesso em: 06 mar. 2020.

BENDELL, B. L. I don't Want to be Green: Prosocial Motivation Effects on Firm Environmental Innovation Rejection Decisions. **Journal of Business Ethics**, [s. l.], v. 143, n. 2, p. 277–288, 2017.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 603–614, 2017.

BOBICKI, E. R. et al. High temperature permittivity measurements of selected industrially relevant ores: Review and analysis. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 145, n. August 2019, p. 106055, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106055>. Acesso em: 03 dez. 2019.

BRASIL. Lei nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000. **Diário Oficial da União,** Brasília, seção 1, 28 dez. 2000.

BUDYKINA, T. A. Treatment of wastewater resulting from iron ore beneficiation. **Magazine of Civil Engineering**, [s. l.], v. 82, n. 6, p. 163–169, 2018.

BURRITT, R. L. et al. Diffusion of environmental management accounting for cleaner production: Evidence from some case studies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 224, p. 479–491, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.227>. Acesso em: 07 out. 2019.

CARNEIRO, A.; FOURIE, A. Assessing the impacts of uncertain future closure costs when evaluating strategies for tailings management. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 247, 2020.

CETEM/MCT. **Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

_____. **Tratamento de minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

CETEM/MCTI. **Tecnologia de rochas ornamentais:** pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

CHAN, Y. J. et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 155, n. 1–2, p. 1–18, 2009.

CHARIKINYA, E. et al. Integration of mineralogical attributes in evaluating sustainability indicators of a magnetic separator. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 107, p. 53–62, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.014>. Acesso em: 14 nov. 2019.

CHELGANI, S. C. et al. A comparative study on the effects of dry and wetgrinding on mineral flotation separation-a review. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 5004–5011, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.053>. Acesso em: 16 nov. 2019.

CHEN, X. et al. Does institutional pressure foster corporate green innovation? Evidence from China's top 100 companies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 188, p. 304–311, 2018.

CHOPARD et al. Environmental Impact of Mine Exploitation: An Early Predictive Methodology Based on Ore Mineralogy and Contaminant Speciation. **Minerals**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 397, 28.jun.2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/7/397>. Acesso em: 16 out. 2019 .

COHEN, R. R. H. Use of microbes for cost reduction of metal removal from metals and mining industry waste streams. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 12- 13 SPEC. ISS., p. 1146–1157, 2006.

COLOMBO, L. A.; PANSERA, M.; OWEN, R. The discourse of eco-innovation in the European Union: An analysis of the Eco-Innovation Action Plan and Horizon 2020. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 214, n. 2019, p. 653–665, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.150>. Acesso em: 21 aug. 2019.

COOPER, Tim. Creating an economic infrastructure for sustainable product design. **The journal of sustainable product design**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 7 - 17, Jan. 1999.

COSTANTINI, V. et al. Eco-innovation, sustainable supply chains and environmental performance in European industries. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 155, p. 141–154, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.038>. Acesso em: 09 out. 2019.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa:** métodos qualitativo, quantitativo e misto. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

_____. **Projeto de pesquisa:** métodos qualitativo, quantitativo e misto. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CUERVA, M. C.; TRIGUERO-CANO, Á.; CÓRCOLES, D. Drivers of green and non-green innovation: Empirical evidence in Low-Tech SMEs. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 68, p. 104–113, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.049>. Acesso em: 01 aug. 2019.

CUI, Z. et al. Optimization of novel composite membranes for water and mineral recovery by vacuum membrane distillation. **Desalination**, [s. l.], v. 440, n. November 2017, p. 39–47, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.040>. Acesso em: 16 out. 2019.

D'AMATO, D.; KORHONEN, J.; TOPPINEN, A. Circular, Green, and Bio Economy: How Do Companies in Land-Use Intensive Sectors Align with Sustainability Concepts? **Ecological Economics**, [s. l.], v. 158, n. November 2018, p. 116–133, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.026>. Acesso em: 02 set. 2019.

DEMAJOROVIC, J.; LOPES, J. C.; SANTIAGO, A. L. F. The Samarco dam disaster: A grave challenge to social license to operate discourse. **Resources Policy**, [s. l.], v. 61, n. January, p. 273–282, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.017>. Acesso em: 17 fev. 2020.

DEFÁVERI, K. et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 220, p. 375–385, 2019.

DOBSON, R. S.; BURGESS, J. E. Biological treatment of precious metal refinery wastewater: A review. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 519–532, 2007.

DRIUSSI, C.; JANSZ, J. Technological options for waste minimisation in the mining industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 682–688, 2006.

DURUCAN, S.; KORRE, A.; MUNOZ-MELENDEZ, G. Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 12- 13 SPEC. ISS., p. 1057–1070, 2006.

EDRAKI, M. et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 411–420, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>. Acesso em: 14 fev. 2020.

EISENHARDT, M. Building Theories from Case Study Research. **The Academy of Management Review**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 532–550, 1989.

_____; GRAEBNER, M. E. Theory building from cases: Opportunities and challenges. **Academy of Management Journal**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 25–32, 2007.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Closing the loop on single-use food packaging**. 2017c. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/closing-the-loop-on-single-use-food-packaging>. Acesso em: 09 set. 2019.

_____. **Towards the circular economy:** economic and business rationale for an accelerated transition. Isle of Wight: EMF, 2012. v. 1.

_____. **Towards the circular economy**: opportunities for the consumer goods sector. Isle of Wight: EMF, 2013. v. 3.

_____. **Towards the circular economy:** accelerating the scale-up across global supply chains. Isle of Wight: EMF, 2014. v. 1.

_____. **Towards the circular economy:** business rationale for an accelerated transition. Isle of Wight: EMF, 2015. v. 1.

_____. **Urban biocycles**. Isle of Wight: EMF, 2017a.

_____. **Uma economia circular no Brasil:** uma abordagem exploratória inicial. Isle of Wight: EMF, 2017b.

FONTES, W. C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 988–995, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027>. Acesso em: 02 jan. 2020.

FRANKS, D. M. et al. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources Policy**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 114–122, 2011.

FREITAS, V. A. A. et al. Use of iron ore tailing from tailing dam as catalyst in a fenton-like process for methylene blue oxidation in continuous flow mode. **Chemosphere**, [s. l.], v. 219, p. 328–334, Mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.052>. Acesso em: 30 dez. 2019.

GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 200, p. 412–422, 2018.

GAO, J.; FOURIE, A. Studies on thickened tailings deposition in flume tests using the computational fluid dynamics (CFD) method. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 249–262, 2019.

GARCIA, L. C. et al. Brazil's worst mining disaster: Corporations must be compelled to pay the actual environmental costs: Corporations. **Ecological Applications**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 5–9, 2017.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 04 set. 2019.

GEISSLER, B. et al. Striving toward a circular economy for phosphorus: The role of phosphate rock mining. **Minerals**, [s. l.], v. 8, n. 9, 2018.

GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 216–224, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>. Acesso em: 29 out. 2019.

_____; DOBERSTEIN, Brent. Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving'leapfrog development'. **The International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 15, n. 3, p. 231-239, 2008.

GENTE, V.; PATTANARO, G. The place of eco-innovation in the current sustainability debate. **Waste Management**, [s. l.], v. 88, n. November 2017, p. 96–101, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.026>. Acesso em: 10 set. 2019.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 114, p. 11–32, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>. Acesso em: 09 out. 2019.

GITELMAN, L. et al. Rational behavior of an enterprise in the energy market in a circular economy. **Resources**, [s. l.], v. 8, n. 2, 2019.

GOMES, R. B.; TOMI, G. D.; ASSIS, P. S. Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilatero Ferrifero Area. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 70, p. 201–206, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.019>. Acesso em: 24 jun. 2020.

GONÇALVES, I. et al. Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana , Brazil. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 141, n. April, p. 84–95, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.008>. Acesso em: 30 dez. 2019.

GRABSCH, A. F.; YAHYAEI, M.; FAWELL, P. D. Number-sensitive particle size measurements for monitoring flocculation responses to different grinding conditions. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 145, n. October 2019, p. 106088, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106088>. Acesso em: 14 nov. 2019.

GÜLCAN, E. A novel approach for sensor based sorting performance determination. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 146, n. November 2019, p. 106130, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106130>. Acesso em: 19 nov. 2020.

HACHA, R. R. et al. Electroflotation of fine hematite particles with Rhodococcus opacus as a

biocollector in a modified Partridge–Smith cell. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 126, n. July, p. 105–115, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.025>. Acesso em: 12 fev. 2020.

HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–13, 2017.

HORBACH, J. Determinants of environmental innovation-New evidence from German panel data sources. **Research Policy**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 163–173, 2008.

HU, J. et al. Ecological utilization of leather tannery waste with circular economy model. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 2–3, p. 221–228, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.018>. Acesso em: 29 out. 2019.

HUANG, X. X. et al. The relationships between regulatory and customer pressure, green organizational responses, and green innovation performance. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 3423–3433, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.106>. Acesso em: 03 mar. 2020.

HUAZHE, J. et al. Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 245, 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **As mais recentes tecnologias para o gerenciamento de riscos em minas**. 2020. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/as-mais-recentes-tecnologias-para-o-gerenciamento-de-riscos-em-minas/>. Acesso em: 20 mar. 2020.

_____. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração.** 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

IHLE, C. F.; KRACHT, W. The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 177, p. 34–51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.219>. Acesso em: 14 fev. 2020.

ILANKOON, I. M. S. K. et al. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 125, n. March, p. 206–222, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.006>. Acesso em: 25 nov. 2019.

IMMINK, H.; LOUW, R. T.; BRENT, A. C. Tracking decarbonisation in the mining sector. **Journal of Energy in Southern Africa**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 14–23, 2018.

JESUS, A. de et al. Eco-innovation pathways to a circular economy: envisioning priorities through a Delphi approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 228, p. 1494–1513, Aug. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.049>. Acesso em: 09 out. 2019.

_____; MENDONÇA, S. Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 145, p. 75–89, Mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001>. Acesso em: 02 aug. 2019.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Energy Consumption in Mining Comminution. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 48, p. 140–145, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>. Acesso em: 04 dez. 2019.

JICK, T. D. Mixing qualitative and quantitative methods: Triangulation in action. **Administrative Science Quarterly**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 602–611, 1979.

JOHNSON, N. W. Existing opportunities for increasing metallurgical and energy efficiencies in concentrators. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 118, n. January, p. 62–77, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.002>. Acesso em: 15 fev. 2020.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 135, n. November 2017, p. 190–201, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>. Acesso em: 02 aug. 2019.

KAMARUZZAMAN, S. N. et al. Solar technology and building implementation in malaysia: A national paradigm shift. **Maejo International Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 196–215, 2012.

KANDA, W. et al. A technological innovation systems approach to analyse the roles of intermediaries in eco-innovation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 227, p. 1136–1148, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.230>. Acesso em: 10 set. 2019.

KARAKAYA, E.; HIDALGO, A.; NUUR, C. Diffusion of eco-innovations: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 33, p. 392–399, 2014.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 151, p. 475–493, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>. Acesso em: 11 dez. 2019.

KIEFER, C. P. et al. Diversity of eco-innovations: A quantitative approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 166, p. 1494–1506, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.241>. Acesso em: 30 out. 2019.

_____; CARRILLO-HERMOSILLA, J.; DEL RÍO, P. Building a taxonomy of eco-innovation types in firms. A quantitative perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 145, n. May 2018, p. 339–348, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.021>. Acesso em: 07 aug. 2019.

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 228, p. 153–160, 2019.

KIRCHHERR, J. et al. Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). **Ecological Economics**, [s. l.], v. 150, n. April, p. 264–272, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>. Acesso em: 17 set. 2019.

_____; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 127, n. April, p. 221–232, 2017.

KORHONEN, J. et al. Circular economy as an essentially contested concept. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 175, p. 544–552, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>. Acesso em: 24 jul. 2019.

_____; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 143, p. 37–46, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>. Acesso em: 05 aug. 2019.

KUMAR KATTA, A.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold, and potash mining sectors. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], n. xxxx, p. 118718, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118718>. Acesso em: 26 nov. 2019.

KUZMENKO, S. et al. Optimization of position of the cyclical-and-continuous method complexes when cleaning-up the deep iron ore quarries. **Mining of Mineral Deposits**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 104–112, 30.set.2019. Disponível em: <http://mining.in.ua/2019vol13_3_12.html>. Acesso em: 24 nov. 2019.

LÈBRE, É.; CORDER, G.; GOLEV, A. The Role of the Mining Industry in a Circular Economy: A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 662–672, 2017.

LEITÃO, J.; DE BRITO, S.; CUBICO, S. Eco-innovation influencers: Unveiling the role of lean management principles adoption. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1–27, 2019.

LEVESQUE, M.; MILLAR, D.; PARASZCZAK, J. Energy and mining-The home truths. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 233–255, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.088>. Acesso em: 03 dez. 2019.

LEWANDOWSKI, M. Designing the business models for circular economy-towards the conceptual framework. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1–28, 2016.

LI, D. et al. The impact of legitimacy pressure and corporate profitability on green innovation: Evidence from China top 100. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 41–49, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.123>. Acesso em: 26 mai. 2020.

LIAO, Z. et al. What drives environmental innovation? A content analysis of listed companies in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 198, p. 1567–1573, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.156>. Acesso em: 25 jul. 2019.

LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 115, p. 36–51, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>. Acesso em: 29 out. 2019.

LIU, D. et al. Introducing the hydrate gel membrane technology for filtration of mine tailings. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 135, n. January 2018, p. 1–8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.030>. Acesso em: 29 jan. 2020.

LIU, J. et al. Durability of water-affected paste backfill material and its clean use in coal mining. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 250, n. xxxx, p. 119576, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119576>. Acesso em: 14 fev. 2020.

LIU, S.; YAN, M.-R. Corporate Sustainability and Green Innovation in an Emerging Economy—An Empirical Study in China. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 3998, 2018.

LU, H.; CHANDRAN, K.; STENSEL, D. Microbial ecology of denitrification in biological wastewater treatment. **Water Research**, [s. l.], v. 64, p. 237–254, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.042>. Acesso em: 07 fev. 2020.

MA, S. et al. A case study of a phosphorus chemical firm's application of resource efficiency and eco-efficiency in industrial metabolism under circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 87, n. 1, p. 839–849, 2015.

MAKROPOULOS, C. et al. Sewer-mining: A water reuse option supporting circular economy, public service provision and entrepreneurship. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 216, p. 285–298, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.026>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MALAKAR, S. et al. Comparative study of biofiltration process for treatment of VOCs emission from petroleum refinery wastewater—A review. **Environmental Technology and Innovation**, [s. l.], v. 8, p. 441–461, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.09.007>. Acesso em: 03 fev. 2020.

MATHEWS, J. A.; TAN, H. Progress toward a circular economy in China: The drivers (and inhibitors) of eco-industrial initiative. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 435–457, 2011.

MCLELLAN, B. C. et al. Renewable energy in the minerals industry: A review of global potential. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 32, p. 32–44, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.016>. Acesso em: 24 nov. 2019.

MILLAR, N.; MCLAUGHLIN, E.; BÖRGER, T. The Circular Economy: Swings and Roundabouts? **Ecological Economics**, [s. l.], v. 158, n. October 2018, p. 11–19, 2019.

MOODLEY, I. et al. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 126, n. November 2016, p. 207–220, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.008>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MORAGA, G. et al. Circular economy indicators: What do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 146, n. November 2018, p. 452–461, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>. Acesso em: 08 jun. 2019.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary

Exploration of the Concept and Application in a Global Context. **Journal of Business Ethics**, [s. l.], v. 140, n. 3, p. 369–380, 2017.

NAM, D.; LEE, J.; LEE, H. Business analytics adoption process: An innovation diffusion perspective. **International Journal of Information Management**, [s. l.], v. 49, n. July, p. 411–423, 2019.

NEDVED, M.; JANSZ, J. Waste water pollution control in the Australian mining industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 12- 13 SPEC. ISS., p. 1118–1120, 2006.

NGUYEN, M. T. et al. Water and energy synergy and trade-off potentials in mine water management. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 629–638, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.063>. Acesso em: 05 dez. 2019.

_____; ZIEMSKI, M.; VINK, S. Application of an exergy approach to understand energy demand of mine water management options. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 639–648, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.004>. Acesso em: 09 dez. 2019.

NIETZSCHE, Friedrich. **Além do bem e do mal:** prelúdio a uma filosofia do futuro. 1. ed. São Paulo: Editora Companhia das Letras, 2005.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 266–274, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>. Acesso em: 22 nov. 2019.

_____; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 42, p. 13–21, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.012>. Acesso em: 25 nov. 2019.

NORTHEY, S. A. et al. Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 135, p. 1098–1116, 2016.

OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD taxonomy of economic activities based on R&D intensity**. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/5jlv73sqqp8r-en>. Acesso em: 25 mar. 2020.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O sistema interligado nacional**. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 11 maio 2020.

ORMAZABAL, M. et al. Circular Economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 185, p. 157–167, 2018.

OSANLOO, M.; PARICHEH, M. In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, [s. l.], v. 00, n. 00, p. 1–28, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1565054>. Acesso em: 24 nov. 2019.

OSSA-MORENO, J. et al. The Hydro-economics of Mining. **Ecological Economics**, [s. l.], v.

145, n. October 2017, p. 368–379, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.010>. Acesso em: 16 dez. 2019.

PAJUNEN, N. et al. Drivers and barriers of effective industrial material use. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 39–46, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.008>. Acesso em: 06 mar. 2020.

PARIDA, V. et al. Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 101, n. January, p. 715–725, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.006>. Acesso em: 24 set. 2019.

PENG, W. et al. Digestate management for high-solid anaerobic digestion of organic wastes: A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 297, p. 122485, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122485>. Acesso em: 07 fev. 2020.

PESTRYAK, I. V. Modeling and analysis of physicochemical processes in recirculating water conditioning. **Journal of Mining Science**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 811–818, 2015.

PIETROBELLI, C.; MARIN, A.; OLIVARI, J. Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. **Resources Policy**, [s. l.], v. 58, n. May, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>. Acesso em: 16 nov. 2019.

PIMENTEL, B. S.; GONZALEZ, E. S.; BARBOSA, G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: Fundamentals and challenges. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 2145–2157, 2016.

PONOMAR, V. P.; DUDCHENKO, N. O.; BRIK, A. B. Synthesis of magnetite powder from the mixture consisting of siderite and hematite iron ores. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 122, n. December 2017, p. 277–284, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.018>. Acesso em: 24 nov. 2019.

PROSKURYAKOVA, L. N.; ERMOLENKO, G. V. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 143, p. 1670–1686, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.096>. Acesso em: 03 dez. 2019.

QI, C.; FOURIE, A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 144, n. September, 2019.

RAKOTONIMARO, T. V. et al. Recovery and reuse of sludge from active and passive treatment of mine drainage-impacted waters: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 73–91, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7733-7>. Acesso em: 16 dez. 2019.

RANTA, V. et al. Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 135, n. September 2017, p. 70–82, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.017>. Acesso em: 04 set. 2019.

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J. V.; WITJES, S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 135, n. February, p. 246–264, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>. Acesso em: 22 jul. 2019.

RENNINGS, K. Redefining innovation — eco-innovation research and the contribution from ecological economics. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 32, p. 319–332, 2000.

RODOVALHO, E. et al. Sequential glory hole approach as a new mining method for sustainable operations. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 4788–4796, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.025>. Acesso em: 16 nov. 2019.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 82, n. 1, p. 1–13, 2007.

ROGERS, Everett M. **Diffusion of innovations**. New York: Free, c2003.

_____. Diffusion of preventive innovations. Addictive Behaviour, 27 (1), 989-993. **Addictive Behaviours**, [s. l.], v. 27, p. 989–993, 2002. Disponível em: <https://ac-els-cdn-com.uplib.idm.oclc.org/S0306460302003003/1-s2.0-S0306460302003003-main.pdf?_tid=9cfbba7c-1aac-4494-aae4-fa1c9c1d3de2&acdnat=1546786121_a2d8f05162255f66d37ec1f270413a9b>. Acesso em: 08 out. 2019.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique J. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 15, p. 139–155, 2002.

RUNTTI, H. et al. How to tackle the stringent sulfate removal requirements in mine water treatment—A review of potential methods. **Environmental Research**, [s. l.], v. 167, n. July, p. 207–222, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.07.018>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SADEGHALVAD, B.; AZADMEHR, A.; HEZARKHANI, A. Assessment of iron ore mineral wastes for sulfate removal from groundwater wells: A case study. **RSC Advances**, [s. l.], v. 6, n. 14, p. 11719–11734, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA21843H>. Acesso em: 28 dez. 2019.

SCHIEDERIG, T.; TIETZE, F.; HERSTATT, C. Green innovation in technology and innovation management - an exploratory literature review. **R and D Management**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 180–192, 2012.

SCHOENBERGER, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. **Resources Policy**, [s. l.], v. 49, p. 119–128, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.009>. Acesso em: 15 fev. 2020.

SEHNEM, S. et al. Improving sustainable supply chains performance through operational excellence: circular economy approach. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v.

149, n. June, p. 236–248, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.021>. Acesso em: 10 set. 2019.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 120, p. 72–79, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>. Acesso em: 28 out. 2019.

SMYTH, K. et al. Seasonal variations in cold climate nutrient removal: A comparison of facultative and aerated lagoons. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 214, p. 224–231, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.098>. Acesso em: 05 fev. 2020.

STEWART, R.; NIERO, M. Circular economy in corporate sustainability strategies: A review of corporate sustainability reports in the fast-moving consumer goods sector. **Business Strategy and the Environment**, [s. l.], v. 27, n. 7, p. 1005–1022, 2018.

STICKLAND, A. D. et al. Dry stacking of wastewater treatment sludges. **Water Research**, [s. l.], v. 47, n. 10, p. 3534–3542, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.002>. Acesso em: 21 jan. 2020.

STRANG, K. D. Feasibility of a hidden renewable energy hydro power storage battery. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 13, p. 164–175, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.07.001>. Acesso em: 06 dez. 2019.

SUÁREZ-EIROA, B. et al. Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 214, p. 952–961, 2019.

SUBRAMANIAN, S.; NATARAJAN, K. A. Flocculation, filtration and selective flocculation studies on haematite ore fines using starch. **Minerals Engineering.** [s. l.], v. 4, n. 5, p. 587–598, 1991.

SUN, W.; WANG, H.; HOU, K. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 171, p. 567–579, 2018.

SURIADI, S. et al. Isolating the impact of rock properties and operational settings on minerals processing performance: A data-driven approach. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 122, n. July 2017, p. 53–66, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.025>. Acesso em: 15 nov. 2019.

TAM, E.; SOULLIERE, K.; SAWYER-BEAULIEU, S. Managing complex products to support the circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 145, n. February, p. 124–125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.030>. Acesso em: 09 out. 2019.

TAO, M. et al. Life cycle assessment on lead–zinc ore mining and beneficiation in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 237, p. 117833, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117833>. Acesso em: 03 fev. 2020.

TERRYN, I. C.; LAZAR, G. Driving forces affecting the adoption of eco-innovation: A

survey on vacuum sewer systems. **Environmental Engineering and Management Journal**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 589–598, 2016.

THOMPSON, F. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 705, p. 135914, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>. Acesso em: 19 fev. 2020.

TURA, N. et al. Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 212, p. 90–98, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.202>. Acesso em: 29 out. 2019.

ÜSTÜN, G. E. et al. Tertiary treatment of a secondary effluent by the coupling of coagulation-flocculation-disinfection for irrigation reuse. **Desalination**, [s. l.], v. 277, n. 1–3, p. 207–212, 2011.

VARGO, S. L.; AKAKA, M. A.; WIELAND, H. Rethinking the process of diffusion in innovation: A service-ecosystems and institutional perspective. **Journal of Business Research**, [s. l.], n. December 2018, 2020.

VELENTURF, A. P. M. et al. Circular economy and the matter of integrated resources. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 689, p. 963–969, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.449>. Acesso em: 28 out. 2019.

VELEVA, V.; BODKIN, G. Corporate-entrepreneur collaborations to advance a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 188, p. 20–37, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.196>. Acesso em: 09 out. 2019.

VOTTELER, R. G.; BRENT, A. C. A literature review on the potential of renewable electricity sources for mining operations in South Africa. **Journal of Energy in Southern Africa**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 1–21, 2016.

WAINAINA, S. et al. Resource Recovery and Circular Economy from Organic Solid Waste using Aerobic and Anaerobic Digestion Technologies. **Bioresource Technology**, [s. l.], p. 122778, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>. Acesso em: 07 fev. 2020.

WANG, C. et al. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 58, p. 113–131, 2014a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018>. Acesso em: 30 jan. 2020.

WANG, D. et al. Technical, economic and environmental assessment of coagulation/filtration tertiary treatment processes in full-scale wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 170, p. 1185–1194, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.231>. Acesso em: 10 fev. 2020.

WANG, S. et al. Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 122, n. January, p. 251–257, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.015>. Acesso em: 14 nov. 2019.

WANG, Z. et al. Multi-agent-based simulation on technology innovation-diffusion in China. **Papers in Regional Science**, [s. l.], v. 93, n. 2, p. 385–408, 2014b.

WARHURST, A.; BRIDGE, G. Improving environmental performance through innovation: Recent trends in the mining industry. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 907–921, 1996.

WASYLYCIA-LEIS, J.; FITZPATRICK, P.; FONSECA, A. Mining communities from a resilience perspective: Managing disturbance and vulnerability in Itabira, Brazil. **Environmental Management**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 481–495, 2014.

WEISHI, L. et al. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 204, p. 685–692, 2018.

WHITAKER, J. et al. Sources of variability in greenhouse gas and energy balances for biofuel production: A systematic review. **GCB Bioenergy**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 99–112, 2010.

WU, P. et al. Properties of cementitious composites containing active/inter mineral admixtures. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 1323–1330, 2018.

XUE, B. et al. A life cycle co-benefits assessment of wind power in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 41, n. 72, p. 338–346, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.056>. Acesso em: 05 dez. 2019.

YANG, Y. et al. Effect of primary flocculant type on a two-step flocculation process on iron ore fine tailings under alkaline environment. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 132, n. October 2018, p. 14–21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.053>. Acesso em: 14 nov. 2019.

YELLISHETTY, M. et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 52, n. 11, p. 1283–1289, 2008.

YIN, R. K. The Case Study Crisis: Some Answers. **Administrative Science Quarterly**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 58–65, 1981.

_____. **Estudo de caso:** planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

_____. **Pesquisa qualitativa do início ao fim.** Porto Alegre: Penso, 2016.

YONG, R. The circular economy in China. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 121–129, 2007.

ZUO, W. et al. Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 84, p. 64–73, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.025>. Acesso em: 24 nov. 2019.

APÊNDICE A – GUIA PARA ENTREVISTAS

Etapas da entrevista	
1	Apresentação do projeto de pesquisa e do mestrando
2	Agradecimento da disponibilidade para a entrevista e visita de campo
3	Explicar que a pesquisa possui cunho acadêmico e que servirá de base para o desenvolvimento da dissertação sobre Inovações Tecnológicas de Processo e Economia Circular
4	Explicar que as respostas das empresas serão tabuladas em conjunto não havendo possibilidade de identificação única
5	Explicar a questão sigilo da pesquisa quanto à identidade dos entrevistados
6	Explicar as etapas utilizadas na pesquisa - transcrição, aprovação e tabulação dos dados coletados
7	Detalhamento dos objetivos da entrevista
8	Início da entrevista
9	Finalização da entrevista, de forma a informar que após o processo de transcrição o documento será enviado para validação
10	Agradecimento da disponibilidade e pelas informações apresentadas

APÊNDICE B – QUESTÕES DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA - ESPECIALISTA

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI - CAMPUS SÃO PAULO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO - MESTRADO

ESPECIALISTA

NOME: _____
INSTITUIÇÃO/EMPRESA:____
FUNÇÃO: _____

ACADÊMICA: Raissa Helena Paiva Apolinario
TEMA DA DISSERTAÇÃO: ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: BARREIRAS PARA DIFUSÃO DA INOVAÇÃO AMBIENTAL

ENERGIAS ALTERNATIVAS

1. *Quais as principais fontes de energias nos processos de mineração de ferro – lavra e beneficiamento? As mineradoras utilizam fontes alternativas de energia nos processos de mineração? Se sim, quais? Se não, por quê?*

Resposta:

2. *Quais são as principais tecnologias ambientais para redução de consumo de energia no processo de **lavra**? Como está o avanço destas tecnologias na indústria de mineração de ferro no Brasil? Quais as principais dificuldades para investimentos nestas tecnologias inovadoras?*

Resposta:

3. *Quais são as principais tecnologias ambientais para redução de consumo de energia no processo de **beneficiamento**? Como está o avanço destas tecnologias na indústria de mineração de ferro no Brasil? Quais as principais dificuldades para investimentos nestas tecnologias inovadoras?*

Resposta:

4. *Todas as minas de minério de ferro da região de MG utilizam estas tecnologias de redução de consumo de energia? Se sim, quais? Se não, por quê?*

Respostas:

5. *Há exigências por parte dos principais países importadores de minério de ferro – bruto ou beneficiado - em relação a redução do consumo de energia ou uso eficiente de energia?*

Respostas:

6. *Há exigências por parte da legislação e regulamentações no Brasil em relação a redução do consumo ou uso eficiente de energia pela indústria de mineração de ferro?*

Respostas:

7. *Qual o consumo médio de energia (GJ/ton) pelas operações de mineração de ferro – lavra e beneficiamento? (Caso o especialista tenha detalhado por operações, pedir que descreva a operação e o consumo).*

Resposta:

8. *Sobre energia alternativas e redução de consumo de energia na indústria de minério de ferro – lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta

CONSUMO DE ÁGUA

1. *Quais as principais fontes de água que abastecem a mineração de ferro nos processos de lavra e beneficiamento?*

Resposta:

2. *Qual o consumo médio de água (m^3/ton) pelas operações de mineração de ferro – lavra e beneficiamento? (Caso o especialista tenha detalhado por operações, pedir que descreva a operação e o consumo).*

Resposta:

3. *Há diferença no consumo de água entre as minas de minério de ferro, principalmente da região de Minas Gerais? Se sim, por quê? Se não, por quê?*

Resposta:

4. *Há exigências por parte dos principais países importadores de minério de ferro – bruto ou beneficiado - em relação a redução de consumo ou uso eficiente de água na mina?*

Resposta:

5. *Há exigências por parte da legislação e regulamentações no Brasil em relação a redução do consumo ou uso eficiente de água pela indústria de mineração de ferro?*

Resposta:

6. *Quanto ao consumo de água nos processos de lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta:

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

1. *Há uma Estação de Tratamento de Efluentes nas minas de minérios de ferro, principalmente para efluentes dos processos de lavra e beneficiamento? Se não, como é feito o tratamento dos efluentes de mineração?*

Resposta:

2. *Na mineração de ferro, quais etapas de tratamento de efluentes são utilizadas? (ex: primária, secundária e terciária). Quais os principais métodos de tratamento para os efluentes da mina? (ex: ativo/ passivo; biológico, físico ou químico? Quais são os mais eficientes para o minério de ferro?*

Resposta:

3. *Como é feito o tratamento da água utilizada no processo de mineração de ferro –* ***lavra****? Quais tecnologias são utilizadas? Quais cuidados são tomados para não haver contaminação do solo e águas - superficiais ou subterrâneas?*

Resposta:

4. *Como é feito o tratamento da água utilizada no processamento do minério de ferro –* ***beneficiamento****? Quais tecnologias são utilizadas? Quais cuidados são tomados para não haver contaminação do solo e águas - superficiais ou subterrâneas?*

Resposta:

5. *As minas de minério de ferro brasileiras dispõem destas tecnologias? Se não, por quê? Se sim, há quanto tempo? Qual método você considera o mais eficiente?*

Resposta:

6. *Há diferença entre minas de minério de ferro que utilizam tecnologia para o tratamento de efluentes e as que não utilizam, principalmente na região de Minas Gerais? Se sim, quais? Se não, por quê?*

Resposta:

7. *Após o tratamento da água residual, qual a média de remoção de compostos que prejudicam a qualidade da água e seu consumo? (indicador: massa/volume, ex: ton/ m³) A qualidade da água tratada permite o despejo seguro no curso d'água? Se não, por quê?*

Resposta:

8. *Após o tratamento da água residual, há o reaproveitamento da água nos processos de mineração de ferro – lavra e beneficiamento, ou no próprio tratamento de efluentes? Se sim, qual o percentual de água que é reutilizado? E qual o percentual que é lançado nos cursos d'agua?*

Resposta:

9. *Existem tecnologias que quando aplicadas ao processo de beneficiamento de minério de ferro possibilitam a diminuição da quantidade de rejeitos a serem tratados? Se sim, quais? Estas tecnologias são utilizadas na mineração no Brasil?*

Resposta:

10. *Existem tecnologias que quando aplicadas ao processo de tratamento de efluentes de minério de ferro, possibilitam a diminuição da quantidade de rejeitos a serem tratados? Se sim, quais? Estas tecnologias são utilizadas na mineração no Brasil?*

Resposta:

11. *Existe exigências relacionadas a geração, tratamento e disposição de efluentes da mina de minério de ferro, advindos do campo regulatório ou de mercado (exigência de indústrias e países importadores de minério de ferro)?*

Resposta:

12. *Sobre a estação de tratamento de efluentes, ou qualquer outra forma de tratamento de efluentes advindos dos processos de lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta:

RESÍDUOS DA MINERAÇÃO – LAVRA E BENEFICAMENTO

1. *Quais as tecnologias e métodos utilizados para supressão das emissões de poeira nos processos de mineração de ferro – lavra e beneficiamento? A mineração de ferro do Brasil, utiliza estas tecnologias?*

Resposta:

2. *Como é feito o tratamento e armazenamento da pilha de estéril de minério de ferro? Quais tecnologias e medidas são utilizadas para evitar contaminação de solo e água da disposição da pilha de estéril? Há um aproveitamento deste rejeito como coproduto de outro processo industrial?*

Resposta:

3. *Como é feito o tratamento e armazenamento dos rejeitos do beneficiamento de minério de ferro? Quais tecnologias e medidas são utilizadas para evitar o impacto ambiental da disposição dos rejeitos? Há um aproveitamento deste rejeito como coproduto de outro processo industrial?*

Resposta:

4. *As mineradoras ainda dispõem de barragens para armazenamento de rejeitos? Quais tecnologias e medidas para conter as barragens e seus riscos ambientais? Há outras tecnologias para substituir as barragens?*

Resposta:

5. *Há diferença entre os resíduos – rejeitos e pilha de estéril - de minério de ferro entre diferentes minas? Se sim, por quê? Se não, por quê?*

Resposta:

6. *A indústria de mineração de ferro segue as legislações referentes ao tratamento e destinação dos rejeitos? Há dificuldade de atendimentos da legislação entre diferentes minas de minério de ferro?*

Resposta:

7. *Há alguma outra pressão relacionada aos resíduos – rejeitos e pilha de estéril- de minério de ferro, que as mineradoras estão sujeitas a? (Ex: exigência internacional de países importadores ou alguma indústria que compra esta matéria prima, entre outros)*

Resposta:

8. *Quais são os principais problemas ambientais de resíduos – rejeitos e pilha de estéril - associados a indústria de minério de ferro na sua perspectiva? Por quê? Como você acha que pode ser resolvido estes desafios advindos dos rejeitos da mineração de ferro?*

Resposta:

9. *Sobre os resíduos gerados pela indústria de minério de ferro - lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta:

APÊNDICE C – QUESTÕES DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA - MINERADORA

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI - CAMPUS SÃO PAULO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO - MESTRADO

MINERADORA - ____

NOME: ___
INDÚSTRIA: ____
UNIDADE (MINA): ___
FUNÇÃO: ___

ACADÊMICA: Raissa Helena Paiva Apolinario
TEMA DA DISSERTAÇÃO: ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: BARREIRAS PARA DIFUSÃO DA INOVAÇÃO AMBIENTAL

ENERGIAS ALTERNATIVAS

1. *Quais as principais fontes de energias da mina, nos processos de mineração de ferro – lavra e beneficiamento? A mina utiliza fontes alternativas de energia nos processos de mineração? Se sim, quais? Se não, por quê?*

Resposta:

2. *A mina utiliza alguma tecnologia ambiental para redução de consumo ou uso mais eficiente de energia – relacionado ao processo de lavra e beneficiamento? Se sim, quais? Se não, por quê? Quais as principais dificuldades para investimentos nestas tecnologias inovadoras?*

Resposta:

3. *Todas as minas de minério de ferro da empresa, utilizam estas tecnologias? Se não, por quê?*

Respostas:

4. *Há exigências por parte dos principais países importadores de minério de ferro – bruto ou beneficiado - em relação a redução do consumo de energia ou uso eficiente de energia?*

Respostas:

5. *Há exigências por parte da legislação e regulamentações brasileiras em relação a redução do consumo ou uso eficiente de energia que a mina está sujeita a?*

Respostas:

6. *Qual o indicador de consumo de energia nas operações da mina – lavra e beneficiamento - em (GJ/ ton)? (Caso exista o detalhamento por operações, pedir que descreva a operação e o consumo)*

Operação	Consumo energético (GJ/ ton)
Processo de Mineração (Lavra) | Perfuração | Desmonte | Abastecimento | Transporte	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Britagem e Peneiramento	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Moagem e classificação	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Concentração	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Separação Sólido-líquido	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Empilhamento e Transporte	***Resposta:***
Outros (quais?):	***Resposta:***

7. *Sobre energias alternativas e redução de consumo de energia na indústria de minério de ferro – lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta

CONSUMO DE ÁGUA

1. *Quais as principais fontes de água que abastecem a mina nos processos de lavra e beneficiamento?*

Resposta:

2. *Qual o consumo médio de água (m³/ton) mensalmente pelas operações de mineração nas minas?*

(Favor pedir que descreva o período deste indicador, ex: mês, ano, etc.)
(Caso exista o detalhamento por operações, pedir que descreva a operação e o consumo)

Operação	Consumo médio (m³/ton)
Processo de Mineração (Lavra) | Perfuração | Desmonte | Abastecimento | Transporte	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Britagem e Peneiramento	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Moagem e classificação	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Concentração	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Separação Sólido-líquido	***Resposta:***
Processamento do Minério (Beneficiamento) | Empilhamento e Transporte	***Resposta:***
Outros (quais?):	***Resposta:***

3. *Há diferença no consumo de água entre minas de minério de ferro, principalmente na região de Minas Gerais? Se sim, por quê? Se não, por quê?*

Resposta:

4. *Há exigências por parte dos principais países importadores de minério de ferro – bruto ou beneficiado - em relação a redução de consumo ou uso eficiente de água na mina?*

Resposta:

5. *Há exigências por parte da legislação e regulamentações brasileiras em relação a redução do consumo ou uso eficiente de água que a mina está sujeita a?*

Respostas:

6. *Quanto ao consumo de água nos processos de lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta:

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

1. *Há uma Estação de Tratamento de Efluentes nas plantas de processamento de minério da mina? Se não, como é feito o tratamento da água residual?*

Resposta:

2. *Na mina, quais etapas de tratamento de efluentes são utilizadas? (ex: primária, secundária e terciária) Quais os principais métodos de tratamento? (ex: ativo/passivo; biológico, físico ou químico) Quais são os mais eficientes para o grau de minério de ferro da mina?*

Resposta:

3. *Como é feito o tratamento de efluentes da mina advindos do processo de mineração – **lavra**? Quais tecnologias são utilizadas? Quais cuidados são tomados para não haver contaminação do solo e águas - superficiais ou subterrâneas?*

Resposta:

4. *Como é feito o tratamento de efluentes da mina advindos do processo de mineração – **beneficiamento**? Quais tecnologias são utilizadas? Quais cuidados são tomados para não haver contaminação do solo e águas - superficiais ou subterrâneas?*

Resposta:

5. *Há diferença entre minas de minério de ferro, da empresa, que utilizam tecnologia para o tratamento de efluentes e as que não utilizam? Se sim, quais? Se não, por quê?*

Resposta:

6. *Após o tratamento da água residual, qual a média de remoção de compostos que prejudicam a qualidade da água e seu consumo? (indicador: massa/volume, ex: ton/ m³) A qualidade da água tratada permite o despejo seguro no curso d'água? Se não, por quê?*

Resposta:

7. *Após o tratamento da água residual, há o reaproveitamento da água nos processos de mineração – lavra e beneficiamento, ou até mesmo no processo de tratamento de efluentes? Se sim, qual o percentual de água que é reutilizado? E qual o percentual que é lançado nos cursos d'agua?*

Resposta:

8. *Existem tecnologias que quando aplicadas ao processo de beneficiamento de minério de ferro possibilitam a diminuição da quantidade de rejeitos a serem tratados. Estas tecnologias são utilizadas na mina?*

Resposta:

9. *Existem tecnologias que quando aplicadas ao processo de tratamento de efluentes de minério de ferro, possibilitam a diminuição da quantidade de rejeitos a serem tratados. Estas tecnologias são utilizadas na mina?*

Resposta:

10. *Existe exigências relacionadas a geração, tratamento e disposição de efluentes da mina, advindos do campo regulatório ou de mercado (exigência de indústrias e países importadores de minério de ferro)?*

Resposta:

11. *Sobre a estação de tratamento de efluentes, ou qualquer outra forma de tratamento de efluentes advindos dos processos de lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar?*

Resposta:

RESÍDUOS DA MINERAÇÃO – LAVRA E BENEFICAMENTO

1. *Há a utilização de métodos e tecnologias para a supressão das emissões de poeiras gerados nos processos de lavra e beneficiamento de minério de ferro? Se sim, quais?*

Resposta:

2. *Como é feito o tratamento e armazenamento da* ***pilha de estéril*** *de minério de ferro da mina? Quais tecnologias e medidas são utilizadas para evitar contaminação de solo e água da disposição da pilha de estéril? Há um aproveitamento deste rejeito como coproduto de outro processo industrial?*

Resposta:

3. *Como é feito o tratamento e armazenamento dos* ***rejeitos (advindos do beneficiamento) de minério de ferro*** *da mina? Quais tecnologias e medidas são utilizadas para evitar o impacto ambiental da disposição dos rejeitos? Há um aproveitamento deste rejeito como coproduto de outro processo industrial?*

Resposta:

4. *A mina dispõe de barragens para armazenamento de resíduos? Quais tecnologias e medidas para conter as barragens e seus riscos ambientais são aplicados pela empresa?*

Resposta:

5. *Há diferença entre os resíduos – rejeitos e pilha de estéril - de minério de ferro entre diferentes minas, principalmente da região de Minas Gerais? Se sim, por quê? Se não, por quê?*

Resposta:

6. *A mina segue as legislações referentes ao tratamento e destinação dos resíduos e água residual? Há dificuldade de atendimentos da legislação entre diferentes minas de minério de ferro?*

Resposta:

7. *Há alguma outra pressão relaciona aos resíduos – rejeitos e pilha de estéril- que a mina está sujeita a? (Ex: exigência internacional de países importadores, entre outros)*

Resposta:

8. Sobre os resíduos gerados pela indústria de minério de ferro - lavra e beneficiamento, há outros aspectos que você gostaria de destacar? ***Resposta:***

APÊNDICE D – FORMULÁRIO DE CONSENTIMENTO

FORMULÁRIO DE CONSENTIMENTO

Tema da pesquisa: ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO: BARREIRAS PARA DIFUSÃO DA INOVAÇÃO AMBIENTAL

Pesquisadores:

Professor Orientador:
Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza
Professora do Programa de Pós-Graduação em Administração – PPGA
Centro Universitário da FEI
Rua Tamandaré, 688 – Liberdade
01525-000 – São Paulo – SP
Telefone (11) 99990-7997.
E-mail: mtereza@fei.edu.br

Aluna:
Raissa Helena Paiva Apolinario
Aluna de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Administração – PPGA
Centro Universitário da FEI
Telefone (13) 99733-4888
E-mail: raissah.paiva@hotmail.com

Informações:

A duração da entrevista será em torno de uma hora a depender da sua disponibilidade.

A entrevista será gravada com a utilização de um gravador digital.

Apenas as pessoas envolvidas na pesquisa terão acesso aos dados gravados.

As gravações das entrevistas serão mantidas em local seguro.

Se a transcrição dos dados for efetuada por outra pessoa que não os membros da equipe de pesquisa, esta pessoa deverá assinar um termo de confidencialidade.

Os dados desta pesquisa somente serão utilizados com autorização prévia da empresa.

Os dados serão tabulados em conjunto de forma a não permitir a identificação isolada da empresa

CONSENTIMENTO A ASSINAR

Participação na entrevista

Após receber informações sobre o estudo, eu aceito, de livre e espontânea vontade, participar da(s) entrevista(s) de coleta de dados e autorizo a utilização dos dados aqui coletados para o

desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e científicos, sem a divulgação dos nomes dos entrevistados e da empresa.

Local:	Data: ___/___/_____
Empresa:	
Pessoa(s) entrevistada(s) Nome: _____ _____	 Assinatura: _____ _____
Entrevistador(es) Nome: _____ _____	 Assinatura: _____ _____