



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DO SETOR EXTRATIVO DE
MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL
NO PERÍODO DE 2011 A 2020**

VITÓRIA-ES
2023

YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DO SETOR EXTRATIVO DE
MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL
NO PERÍODO DE 2011 A 2020**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Profa. Dra. Carla Cesar
Martins Cunha

VITÓRIA-ES
2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S237d Santos, Yolacir Carlos de Souza, 1981-
Desempenho Energético do setor extrativo de minério de ferro no Brasil no período de 2011 a 2020 / Yolacir Carlos de Souza Santos. - 2023.
113 f. : il.

Orientadora: Carla Cesar Martins Cunha.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia - Consumo. 2. Ferro - Minas e mineração. I. Cunha, Carla Cesar Martins. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628


YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DO SETOR EXTRATIVO DE
MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL
NO PERÍODO DE 2011 A 2020**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração em Sustentabilidade, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa em Gestão Sustentável e Energia.

Aprovada em 13 de junho de 2023.


COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 CARLA CESAR MARTINS CUNHA
Data: 13/06/2023 15:02:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Carla Cesar Martins Cunha
Orientadora – PPGES/CT/UFES

Documento assinado digitalmente
 EDNILSON SILVA FELIPE
Data: 19/06/2023 08:50:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Examinador Interno – PPGES/CT/UFES

Documento assinado digitalmente
 GIORGIO FRANCESCO CESARE DE TOMI
Data: 15/06/2023 11:19:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ph.D. Giorgio Francesco Cesare de Tomi
Examinador Externo – PPGEMin/EP/USP

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde e sabedoria para seguir sempre em frente. Obrigado por ser a minha força e o meu guia em todos os momentos.

À minha orientadora Dra. Carla Cesar Martins Cunha pela paciência, pela disponibilidade e pelos conselhos sempre assertivos, e aos professores D.Sc. Ednilson Silva Felipe e Ph.D. Giorgio Francesco Cesare de Tomi que, no âmbito do Exame de Qualificação, agregaram muito ao presente trabalho.

Aos colegas da Agência Nacional de Mineração, nas pessoas do engenheiro de minas João Antônio Vasconcelos e da geóloga Karina Andrade Medeiros, pela ajuda quanto à coleta de dados necessários ao presente trabalho.

À minha amada esposa Cinara e à minha filha Luísa pela paciência e o companheirismo, e aos colegas do PPGES, Roger e Maria Paula.

RESUMO

A atividade de mineração constitui-se em um importante setor industrial brasileiro e, como tantos outros, necessita de elevados consumos energéticos para suas operações. Contudo, a divulgação das informações deste setor, no campo da energia, é realizada de forma agregada ao da pelotização, prejudicando a análise do setor mineral de forma desagregada. Neste sentido, o presente trabalho, que pode ser caracterizado de natureza aplicada, em seus objetivos, como pesquisa descritiva e tendo como procedimento a análise documental, teve como propósito a análise do desempenho energético do setor de mineração de ferro no período de 2011 a 2020. Pela inexistência da divulgação de dados desagregados, utilizou-se das informações primárias da Agência Nacional de Mineração obtidas do setor regulado, por intermédio da declaração dos Relatórios Anuais de Lavra. Assim, e a partir do processo de coleta e tratamento dos dados individuais de cada complexo minerador, no que se refere à utilização do diesel e energia elétrica, foi possível analisar o consumo energético do setor de mineração de ferro, bem como realizar a sua estimativa de forma desagregada, entre os setores de lavra e beneficiamento, concluindo-se que, no período abordado no estudo, houve o aumento do consumo energético (51%) e a identificação de que a maior parte do gasto energético deriva da utilização de óleo diesel. A partir do uso de indicadores de desempenho energético consolidados no setor mineral, verificou-se, ao longo do período do estudo, uma tendência de aumento da quantidade de energia necessária para produção do minério de ferro (33% na lavra, 39% no beneficiamento e 41% no total), explicada pela diminuição de teores e pelo aumento da relação estéril-minério e da distância média de transporte, que faz com que sejam necessários maiores consumos energéticos na lavra e no beneficiamento. Ademais, e com base nas informações do consumo energético, foram realizadas as estimativas das emissões de gases de efeito estufa do setor no horizonte reportado, verificando-se um aumento de 62% no período, justificado pelos mesmos fatores já destacados.

Palavras-chave: mineração de ferro; consumo de energia; gases de efeito estufa; indicadores de desempenho energético.

ABSTRACT

The mining activity constitutes an important industrial sector in Brazil and, like many others, requires high energy consumption for its operations. However, the disclosure of information in this sector, regarding energy, is aggregated with that of pelletizing, which impairs the analysis of the mineral sector in a disaggregated manner. In this sense, the present study, which can be characterized as applied in nature and, in its objectives, defined as descriptive research; and in its procedure, as documentary, aimed to analyze the energy performance of the iron mining sector from 2011 to 2020. Due to the lack of disclosure of disaggregated data, primary information from the National Mining Agency obtained from the regulated sector was used, through the declaration of Annual Mining Reports. Thus, from the process of collecting and processing the individual data of each mining complex, regarding the use of diesel and electric energy, it was possible to analyze the energy consumption of the iron mining sector, as well as to estimate it in a disaggregated manner between the mining and beneficiation sectors, concluding that, in the period covered in the study, there was an increase in energy consumption (51%) and the identification that the majority of the energy expenditure derives from the use of diesel oil. By using consolidated energy performance indicators in the mineral sector, it was verified, over the study period, a tendency of increased energy required for iron ore production (33% in mining, 39% in beneficiation, and 41% in total), explained by the decrease in grades and the increase in waste-ore ratio and average transport distance, which necessitates higher energy consumption in mining and beneficiation. In addition, based on the energy consumption information, estimates of greenhouse gas emissions from the sector were made for the reported period, resulting in a 62% increase, justified by the same factors already mentioned.

Keywords: iron ore mining; energy consumption; greenhouse gases; energy performance indicator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero.....	25
Figura 2 – Utilização dos produtos de minério de ferro na siderurgia	26
Figura 3 – Distribuição do consumo energético entre as principais operações do beneficiamento de minério de ferro	38
Figura 4 – Teores médio da produção bruta mina (ROM) no Brasil nas últimas duas décadas	45
Figura 5 – Consumo específico médio de eletricidade no beneficiamento de minério de ferro nos principais países produtores (kWh/t beneficiada).....	46
Figura 6 – Tela “Matriz Energética”	57
Figura 7 – Tela dos insumos utilizados na mineração	58
Figura 8 – Relação entre as unidades de beneficiamento e as minas no RalWeb	59
Figura 9 – Distribuição dos empreendimentos mineradores de extração de ferro entre as unidades federativas do Brasil.....	67
Figura 10 – Dados da produção mineral (ROM e produção beneficiada dos complexos mineradores que tiveram seus dados coletados junto à ANM), em milhões de toneladas por ano (Mtpa)	68
Figura 11 – Consumo energético do setor “mineração e pelotização”, da mineração (forma desagregada) e da mineração de ferro, em PJ.....	72
Figura 12 – Consumo energético da mineração de ferro por fonte, em PJ.....	73
Figura 13 – Percentual do consumo de energia de diesel em relação ao consumo energético total do Brasil, Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul	74
Figura 14 – Volume de diesel consumido na mineração de ferro (RAL) e no setor mineração e pelotização (BEN).....	75
Figura 15 – Consumo de energia elétrica do setor “mineração e pelotização”, das estimativas do setor de mineração e da mineração de ferro	76
Figura 16 – Participação do consumo de energia elétrica própria em relação ao total	76
Figura 17 – Geração de energia elétrica própria por fonte (%).....	77
Figura 18 – Percentual do consumo energético nas fases de lavra e beneficiamento	78
Figura 19 – Percentual do consumo energético na lavra em relação ao consumo energético total do Brasil, Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul	79
Figura 20 – Consumo específico da etapa de lavra em kWh/t e l/t e quantidade de ROM ...	80
Figura 21 – Consumo específico de diesel por porte do complexo minerador	82

Figura 22 – Consumo específico da etapa de beneficiamento em kWh/t e quantidade beneficiada.....	84
Figura 23 – Consumo específico da etapa de beneficiamento em kWh/t por unidade federativa	85
Figura 24 – Gráfico <i>boxplot</i> do indicador $C_{e_{beneficiamento}}$ por processo de beneficiamento	86
Figura 25 – Consumo específico total em kWh/t e quantidade beneficiada.....	87
Figura 26 – Dispersão entre o consumo específico total e o teor de ferro do ROM	88
Figura 27 – Estimativas de emissões GEE do setor de mineração de ferro, em tCO _{2e}	89
Figura 28 – Estimativas de emissões de GEE por escopo	89
Figura 29 – Estimativas de fatores de emissões de CO _{2e} por tonelada produzida e beneficiada	90
Figura 30 – Estimativas de emissões de GEE em função do teor médio das jazidas	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fases de um empreendimento minerador	19
Quadro 2 – <i>Work Index</i> (WI) de diferentes tipologias de minério de ferro no QF	43
Quadro 3 – Resumo dos dados e métodos de coleta utilizados para o desenvolvimento do projeto	58
Quadro 4 – Fatores de emissões empregados para as estimativas de GEE no setor de minério de ferro	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento que estiveram em operação em relação à quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento que apresentaram as informações de consumo de diesel e energia elétrica..	69
Tabela 2 – Quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento em que foi possível o cálculo dos indicadores C_{elavra} , $C_{beneficiamento}$ e C_{total}	70
Tabela 3 – Caracterização dos complexos mineradores quanto ao seu porte.....	71
Tabela 4 – Resultados do teste de <i>Kruskal-Wallis</i>	82
Tabela 5 – Testes de comparação de <i>Dwass-Steel-Critchlow-Fligner</i>	83
Tabela 6 – Resultado do teste de comparação de pares de <i>Mann-Whitney</i>	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
BAT	<i>Best Available Technologies</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CFEM	Compensação Financeira por Exploração de Recursos Minerais
DMT	Distância Média de Transporte
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DOE	<i>Department of Energy, USA</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
HPGR	<i>High Pressure Grinding Rolls</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IPCC	<i>In-Pit Crushing e Conveying</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
QF	Quadrilátero Ferrífero
RAL	Relatório Anual de Lavra
REM	Relação Estéril-minério
ROM	<i>Run of Mine</i>
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
WI	<i>Work Index</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

kWh	Quilowatt-hora
t	Tonelada
GWh	Gigawatt-hora
Ce_{diesel}	Consumo específico de diesel por tonelada movimentada de ROM
Ce_{lavra}	Consumo energético específico por tonelada movimentada de ROM
$Ce_{beneficiamento}$	Consumo energético específico por tonelada produzida no beneficiamento
Ce_{total}	Consumo energético específico total por tonelada produzida no beneficiamento
dc	Quantidade de óleo diesel
me	Consumo de energia elétrica declarada consumida
pb	Produção beneficiada
CO_2e	Emissões de GEE em termos de dióxido de carbono equivalente
PJ	Petajoule
MJ	Megajoule
$Mtpa$	Milhões de toneladas por ano
U	<i>U de Mann-Whitney</i>
df	<i>Degree of freedom</i>
W	<i>W de Wilcoxon</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Mineração: Principais Conceitos, Métodos e Operações Unitárias	19
2.2	Aspectos Técnicos e Econômicos da Mineração de Ferro	23
2.3	Mineração e Desenvolvimento Sustentável	27
2.4	Mineração e Energia no Contexto das Operações Mineiras	32
2.4.1	Perfuração e Desmonte.....	32
2.4.2	Carregamento e Transporte.....	33
2.4.3	Beneficiamento.....	38
2.5	Fatores Influenciadores do Consumo Energético na Mineração de Ferro	42
2.5.1	Tipologia do Minério.....	43
2.5.2	Teor.....	44
2.5.3	Relação Estéril-minério.....	45
2.5.4	Rotas de Processo.....	45
2.6	Principais Estudos Vinculados a Energia e Mineração de Ferro	46
2.7	Indicadores de Desempenho Energético	50
2.8	Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)	52
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	55
3.1	Revisão Bibliográfica	55
3.2	Coleta de Dados	56
3.3	Análise dos Dados	60
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS	67
4.1	Caracterização Geral dos Dados Coletados	67
4.2	Consumo Energético do Setor de Mineração de Ferro	71
4.3	Indicadores de Desempenho Energético na Mineração de Ferro	79
4.3.1	Desempenho Energético na Lavra.....	80
4.3.2	Desempenho Energético no Beneficiamento.....	83
4.3.3	Desempenho Energético Total (Lavra e Beneficiamento).....	87
4.4	Estimativas de Emissões de GEE	88

5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	ANEXO A – AUTORIZAÇÃO PARA USO DOS DADOS DO RAL	112

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, a temática da energia tem alcançado papel preponderante para que a indústria mineral avance ao encontro da sustentabilidade de suas atividades. Este tema pode ser dividido, no contexto mineral, em duas vertentes distintas, seja na necessidade do setor em implementar ações para maior efficientização energética dos seus processos, objetivando a diminuição de custos e de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, na importância do setor, como principal fornecedor dos bens minerais necessários às economias de baixo carbono (PALAMURE, 2016; SRIVASTAVA; KUMAR, 2022).

O setor mineral consolida-se como o segundo maior consumidor de energia, sendo responsável pela utilização de 4 a 7% de toda a energia produzida no mundo. Neste contexto, a utilização deste importante insumo ocorre em todas as operações unitárias e em todas as fases dos empreendimentos mineradores. As fontes de energia utilizadas no setor, de forma geral, são eletricidade, energia térmica (calor ou resfriamento) e combustíveis líquidos, principalmente os de origem fósseis (AWUAH-OFFEI, 2016; HOLMBERG *et al.*, 2017; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021). Por sua vez, e a nível de Brasil, dados do Balanço Energético Nacional (BEN) apontam que o setor de mineração e pelletização, de forma agregada, foi responsável, no ano de 2021, pelo consumo energético de 2,29 milhões de toneladas de petróleo equivalente (tep), correspondendo, no período, ao percentual de 2,70% de toda a indústria brasileira (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Nesta esteira, verificam-se, desde o ano de 2012, iniciativas do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) no sentido de priorização de ações de gestão do uso de energia, seja no aspecto econômico com foco na redução de custos operacionais, bem como na dimensão ambiental com a diminuição da pegada de carbono do setor. Esta mesma organização patronal, na construção de políticas públicas para a indústria mineral, elencou, em relação à questão energética, diversas oportunidades para o setor, como, por exemplo, a busca do desenvolvimento de base tecnológica com a adoção/substituição de fontes de energia de origem fóssil por energias renováveis, com destaque para formas alternativas de geração e armazenamento de energia (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2020).

Neste sentido, e ao analisar as informações do BEN e do Atlas de Eficiência Energética, ambos de elaboração anual pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), verifica-se que, na divulgação dos dados relativos ao setor mineral, estes encontram-se apresentados de forma agregada, sob a denominação de “mineração e pelotização”. Esta forma de divulgação traz prejuízo à própria EPE e aos interessados no estudo do tema, impedindo-os do entendimento dos setores de forma desagregada, como, por exemplo, quando da análise de desempenho energético por meio de indicadores específicos que correlacionem o consumo da energia e dados de produção, como os verificados na indústria da siderurgia, cimento, papel e celulose, dentre outros, que são observados em Empresa de Pesquisa Energética (2019).

Por outro lado, a Agência Nacional de Mineração (ANM), autarquia especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) e gestora do patrimônio mineral brasileiro, por meio do Relatório Anual de Lavra (RAL), solicita anualmente ao setor regulado diversos dados relacionados às atividades de produção mineral, dentre estes, questões vinculadas ao consumo dos principais energéticos, tais como óleo diesel, energia elétrica e explosivos e outros. Contudo, em face destes dados serem ainda considerados “secundários” em detrimento de outros itens vinculados à produção mineral, estes são relegados a um segundo plano. Esta situação faz com que haja a perda de oportunidade da transformação deste conjunto de dados em informações importantes para o setor, como, por exemplo, através da criação de indicadores de desempenho energético, que possam, de alguma forma, nortear as formulações de políticas públicas e/ou estudos setoriais. É salutar destacar que esta possibilidade foi aventada no estudo realizado por Jonusan (2017).

Dentro do contexto mineral brasileiro, a extração de minério de ferro desponta como a principal atividade extrativa, tendo sido responsável, no ano de 2022, em termos de valor da produção mineral, por uma receita de R\$ 153,5 bilhões, valor este que corresponde ao percentual de 61,4% de todos os minerais produzidos pelo país (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2023). Neste mesmo ano, o minério de ferro foi, em termos de valor FOB (do inglês *free on board*), a terceira *commodity* exportada pelo Brasil, ficando atrás tão somente da soja e do petróleo, e sendo responsável, no período, pelo percentual de 7,70% das exportações brasileiras em termos monetários (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2023).

Ainda neste prisma, verifica-se uma tendência da diminuição dos teores nas principais jazidas minerais existentes no mundo, ocasionando a necessidade de aumento da quantidade de material a ser extraído, carregado, transportado e processado e, por conseguinte, o incremento do consumo energético de todas as fontes (IGOGO *et al.*, 2021). Tal situação faz com que as empresas busquem a otimização dos seus processos produtivos, com o desenvolvimento de novas tecnologias e rotas de processos, objetivando uma melhor eficiência energética. Neste contexto, floresce a pergunta norteadora do trabalho em apreço: considerando a tendência natural da diminuição dos teores das principais jazidas de minério de ferro no Brasil, e o advento de novas tecnologias que propiciam melhorias operacionais, houve, ao longo da última década, melhoria do desempenho energético no setor?

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar, a partir da análise dos dados apresentados pelo setor regulado à ANM, o comportamento dos principais indicadores de desempenho energético da mineração de ferro na última década (período de 2011 e 2020), em relação às etapas de extração (lavra), beneficiamento e do consumo de todo o processo produtivo. Para o alcance do objetivo geral, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o consumo energético do setor de extração de minério de ferro no período compreendido entre os anos de 2011 e 2020;
- b) examinar, tendo em vista o consumo energético, as estimativas de emissões de GEE da mineração de ferro, considerando os escopos 1 e 2, no período compreendido entre os anos de 2011 e 2020; e
- c) avaliar, a partir da aplicação de indicadores de desempenho energético, o comportamento do consumo energético em relação às principais variáveis da atividade de mineração, tais como teores médios das minas, processamento mineral e porte da mina.

Deste modo, esta dissertação está estruturada em cinco seções distintas, sendo a primeira, a Introdução em tela. A seção, intitulada Revisão Bibliográfica, aborda os principais conceitos da atividade de mineração, com a descrição dos aspectos técnicos, econômicos e históricos do setor extrativo de minério de ferro no Brasil, bem como aspectos vinculados ao desenvolvimento sustentável da atividade, e como estes se vinculam com a temática objeto do trabalho. Ainda na referida seção, são detalhadas as principais operações unitárias e as variáveis

que mais influenciam no consumo energético, além de estudos relacionados à questão da energia e das emissões de GEE dentro do contexto mineral brasileiro e mundial. Na terceira seção é descrito o caminho metodológico percorrido para a aquisição dos dados necessários à pesquisa, bem como o tratamento destes, objetivando a análise do setor à luz do consumo e dos indicadores de desempenho energético utilizados. A quarta seção traz os principais resultados e análises que permitem o entendimento do setor a partir da interpretação do consumo e dos indicadores de desempenho energético em relação às principais características da mineração de ferro brasileira. Por fim, a quinta e derradeira seção, apresenta as principais conclusões do trabalho apontando a necessidade de estudos futuros que possam ajudar no entendimento da influência de outros fatores não abordados na presente dissertação.

Por fim e não menos importante, convém destacar, que por limitações de dados, a análise do setor restringiu-se às etapas de lavra e beneficiamento, não sendo abordado o transporte e as operações de sinterização e pelotização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração: Principais Conceitos, Métodos e Operações Unitárias

Mineração pode ser definida como um termo genérico que abrange os processos, atividades e indústrias cujo objetivo refere-se à extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais existentes em superfície ou subsuperfície (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002). Por sua vez, mineral é um sólido homogêneo, natural, com composição química definida e um arranjo atômico altamente ordenado e, geralmente, formado por processos inorgânicos (KLEIN; HURLBUT, 1999). Por seu turno, rocha é um agregado de minerais e, havendo nesta um ou mais minerais de interesse econômico, tem-se a denominação de minério. Os minerais de importância econômica têm a denominação de minerais-minérios e, os sem importância do ponto de vista econômico, são descritos como mineral de ganga (LUZ; LINS, 2018).

O ciclo de vida de um empreendimento minerador, segundo Hartman e Mutmansky (2002), envolve cinco fases distintas: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e recuperação ambiental, cujas principais características podem ser verificadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Fases de um empreendimento minerador

FASE	ATIVIDADES	DURAÇÃO
Prospecção	Procura de minerais-minérios utilizando-se de técnicas preliminares (pesquisas bibliográficas, métodos geofísicos, geoquímicos, técnicas de sensoriamento remoto e etc.) e estudos complementares (amostragem de solo, aberturas de picadas, estudos de geologia local e regional e etc.)	1 a 3 anos
Exploração	Utilização de métodos objetivando a determinação do tamanho e valor de um determinado depósito mineral, oportunidade em que serão utilizadas técnicas como sondagens, abertura de poços e trincheiras, e a realização de ensaio laboratoriais para a determinação de teores e definições de rotas de processo	2 a 5 anos
Desenvolvimento	Trabalhos relacionados à exposição do corpo mineral a ser explorado, bem como de abertura de estradas e outras obras de infraestrutura indispensáveis a futura mina	2 a 5 anos
Lavra	Realização das técnicas de extração do minério e de processamento mineral, objetivando a retirada do bem mineral e a sua adequação granulométrica e de teor, aos limites exigidos pelo mercado consumidor	10 a 30 anos
Pós-lavra	Operações necessárias ao fechamento da mina, recomposição ambiental e proposições de usos futuros da área anteriormente explorada	1 a 10 anos

Fonte: Hartman e Mutmansky (2002).

Nota: Adaptado pelo autor.

De uma forma geral, os minérios podem ser explotados a seco ou via úmida, por metodologias de lavra a céu aberto, subterrânea ou mista. No método a céu aberto, as operações unitárias são realizadas a partir da superfície, tendo como principais metodologias a lavra por bancadas, as pedreiras e a lavra por tiras e, via úmido, a lavra hidráulica, a lavra de plácetes, a lavra química e a extração por poços (CURI, 2017). No método de mineração subterrânea, as operações de lavra ocorrem em subsuperfície, podendo ser subdivididas em realces auto-suportantes, alargamentos suportados e alargamentos abatidos (SILVA, 2006). Por fim, o método misto contempla a característica das duas metodologias, isto é, a céu aberto e subterrânea.

As operações unitárias de uma exploração a céu aberto podem ser subdivididas em dois processos distintos: a extração mineral que envolve as atividades de lavra propriamente dita e o processamento mineral. Na extração mineral (lavra), podem ser citadas as atividades de perfuração de rochas, desmonte (mecânico ou por explosivos), escavação, carregamento e transporte. No processamento mineral (beneficiamento), ocorrem as operações unitárias de cominuição (britagem e moagem), classificação, concentração e operações sólido-líquido, dentre outras (RACIA, 2016; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021).

Na etapa da extração mineral (lavra) são gerados dois produtos distintos, a saber, o *run of mine* (ROM), que corresponde ao resultado da aplicação dos ciclos de operações, sendo também definido como o minério “tal-qual”, bruto e recuperado da jazida *in situ* e que poderá ser posteriormente beneficiado; e o estéril, que corresponde à porção do material abaixo do teor de corte¹ (*cut off grade*) e/ou proveniente das etapas de decapeamento da jazida, que será disposto em pilhas de estéreis (CURI, 2017). A relação entre a quantidade de estéril necessária para a retirada de uma determinada quantidade de minério é denominada relação estéril-minério (REM). Insta também ressaltar que a definição do teor de corte é função direta da tecnologia e de aspectos econômicos, de tal sorte que algumas empresas fazem o estoque de um determinado material, abaixo do teor de corte, denominando-o de “minério futuro”.

Após as atividades de decapeamento da jazida mineral, faz-se necessária a etapa de perfuração, que consiste na abertura de furos na rocha *in situ* para seu posterior desmonte. Os equipamentos utilizados nesta operação unitária têm como fontes principais de energia os combustíveis fósseis

¹ Teor limite de minerais ou de elementos químicos úteis de um minério abaixo do qual a exploração mineral torna-se antieconômica.

(principalmente o óleo diesel) e a energia elétrica (MIRANDA *et al.*, 2016). O desmonte por explosivos, por sua vez, consiste na fraturação das rochas através da energia química disponível nos agentes explosivos, e tem como objetivo a diminuição da granulometria para as etapas posteriores de carregamento, transporte e beneficiamento (NORGATE; HAQUE, 2010).

As operações de carregamento e transporte constituem-se nos maiores custos operacionais de uma atividade de mineração a céu aberto. Basicamente, referem-se ao carregamento e transporte do estéril que será encaminhado às pilhas de estéreis, do minério marginal para as pilhas de “minério futuro” e do minério bruto (ROM) que será direcionado à britagem primária (RAMANI, 2012). As atividades de carregamento são realizadas por carregadeiras móveis (que utilizam óleo diesel), escavadeiras (*shovels*) e *draglines* (que empregam óleo diesel e eletricidade), e as atividades de transporte, por meio de caminhões convencionais ou fora-de-estradas (*off-road*), movidos a óleo diesel, sendo que, em algumas minas, por intermédio de transportadores de correia movidos a energia elétrica (NORGATE; HAQUE, 2010).

O beneficiamento de minério pode ser definido como o conjunto de operações básicas realizadas em um minério no estado bruto (ROM), objetivando a sua adequação (granulométrica, teor e etc.) para sua futura comercialização (ARAÚJO, 2007). As principais operações unitárias utilizadas nesta etapa são cominuição (britagem e moagem), classificação e peneiramento, concentração (gravimétrica, magnética, flotação e etc.), desaguamento (produto e rejeito), secagem do concentrado e disposição de rejeitos (LUZ; LINS, 2018).

Já a cominuição pode ser definida como o processo de fragmentação de matérias primas, realizada de forma controlada, e que se inicia a partir do desmonte de rochas, continuando nas etapas de britagem e moagem. No contexto do processamento mineral, é responsável pela maior parcela de consumo energético e tem como principais mecanismos de quebra das espécies minerais a compressão, o impacto, o atrito e a abrasão (SAMPAIO; DELBONI JÚNIOR, 2018). Ademais, esta etapa, segundo Pinto (2016), tem como objetivos:

- a) a liberação do mineral de interesse para posterior etapa de concentração;
- b) adequação granulométrica; e
- c) manuseio e transporte de minério.

A etapa de classificação e peneiramento, por sua vez, tem como finalidade a separação de um determinado material em duas ou mais frações granulométricas distintas, sendo esta realizada

por intermédio de peneiras, quando em função do tamanho geométrico das partículas; ou por meio da classificação, quando realizada através da aplicação do conceito físico da velocidade diferenciada em um meio fluido, por equipamentos como hidrociclones, classificador espiral, dentre outros (CORREIA; COUTO, 2018).

A concentração de minérios, por seu turno, é condicionada à coexistência de três condições fundamentais, sendo estas: a liberação física de fases (minerais) constituintes de um mineral-minério, a existência de uma propriedade diferenciadora e as condições de separabilidade dinâmica. A primeira decorre da necessidade de que as espécies minerais de interesse estejam separadas fisicamente dos minerais de ganga, o que é obtido por meio das operações unitárias anteriores à concentração, especificamente a cominuição. A propriedade diferenciadora refere-se a uma característica natural (susceptibilidade magnética, elétrica e densidade, dentre outros) ou induzida (físico-química de superfície) de uma espécie mineral, que permitirá a sua separação física de um ou mais minerais. Por fim, a separabilidade dinâmica está relacionada aos equipamentos empregados em um método e na possibilidade da existência, em um determinado processo/operação unitária, de dois ou mais fluxos distintos (ARAÚJO, 2007). Os principais métodos de concentração utilizados na mineração de ferro são:

- a) Gravíticos ou gravimétricos: utilizam como propriedade diferenciadora a densidade, podendo ser citados como equipamentos o jig, a mesa oscilatória, as espirais concentradoras, a calha concentradora, a separação em meio denso e os hidrociclones (LINS, 2018);
- b) Separação magnética e eletrostática: a primeira baseia-se na susceptibilidade magnética, tendo como equipamentos principais, o separador magnético de alta intensidade (WHIMS) e o separador magnético de tambor (WDRE), e a segunda, na condutividade elétrica, que está relacionada à susceptibilidade de uma espécie mineral em adquirir cargas elétricas, podendo ser citados os separadores eletrodinâmicos e os de placas condutoras (SAMPAIO *et al.*, 2018);
- c) Flotação: baseia-se na propriedade físico-química de superfície, especificamente, na capacidade de uma determinada espécie mineral de ser umectada (hidrofilicidade), ou pela não afinidade à água (hidrofobicidade), podendo esta característica ser natural ou induzida por meio de reagentes. Via de regra, a flotação é realizada por intermédio de máquinas de flotação convencionais ou por colunas de flotação (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

Ademais, insta destacar que as atividades de beneficiamento de minério de ferro são realizadas, de forma geral, a úmido, sendo assim necessária a utilização de bombeamento de água para o transporte de minério em forma de polpa. Contudo, em face dos grandes acidentes ocorridos em barragens de rejeito nos últimos anos, algumas empresas vêm optando pelo beneficiamento de minério em sua umidade natural (POSSA; NASCIMENTO; FRANÇA, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2020). Imperioso se faz destacar que existem barreiras tecnológicas que impedem que toda a tipologia de minério venha a ter seu beneficiamento em umidade natural, apesar da existência de alguns estudos, como, por exemplo, da utilização de concentração magnética a seco em minérios do QF, consoante ao trabalho de Amorim, Martins e Nunes (2022).

Por fim, as atividades de separação sólido-líquido (desaguamento) envolvem as operações de espessamento e filtragem, sendo atualmente utilizadas tanto para o produto (concentrado) quanto para o rejeito. O espessamento baseia-se no princípio da sedimentação gravimétrica das partículas, auxiliada por flocculantes. Já a filtragem consiste na separação de sólidos contidos em uma suspensão aquosa através de um meio filtrante (GUIMARÃES, 2011). Os resíduos resultantes do processo de beneficiamento, denominados rejeitos, são dispostos, de forma geral, em barragens de rejeitos (SOARES; BOSCOV, 2018). Estas obras de engenharia, nos últimos anos, foram responsáveis por dois grandes acidentes ocorridos em Mariana e Brumadinho, no estado de Minas Gerais. Contudo, e em decorrência dos acidentes, além de iniciativas do aproveitamento econômico do rejeito, as empresas têm buscado novas formas tecnológicas de disposição, como, por exemplo, empilhamento a seco, empilhamento e transporte do material em pasta e codisposição em cavas exauridas (STELA; DUARTE; PEREIRA, 2020).

2.2 Aspectos Técnicos e Econômicos da Mineração de Ferro

A mineração de ferro, desde o início do século XX, representa a mais importante atividade mineral do país, tendo sido fundamental para o desenvolvimento de outras atividades ao entorno de suas minas, e em toda a cadeia produtiva, como, por exemplo, no desenvolvimento de ferrovias e indústrias de pelletização (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009). Nas duas últimas décadas, a mineração de ferro foi responsável pela arrecadação de 29 bilhões de reais,

referente à Compensação Financeira por Exploração de Recursos Minerais (CFEM²), que corresponde a 73,1% de toda a CFEM recolhida no país no período (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023b). Dados da *U.S. Geological Survey* (USGS) apontam que o Brasil foi, no ano de 2021, responsável pela segunda maior produção mundial, com um volume aproximado de 400 milhões de toneladas, ante às 900 milhões de toneladas da Austrália (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022).

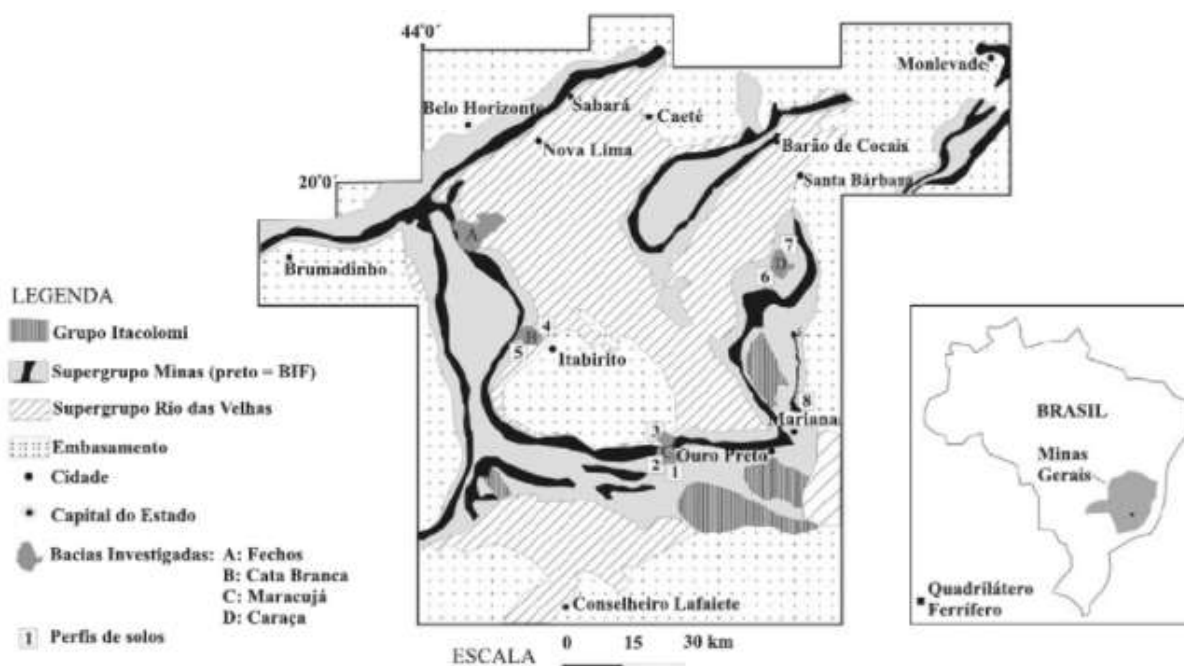
No ano de 2022, os estados de Minas Gerais e Pará foram responsáveis por 97,86% da produção bruta de minério de ferro no país. Em termos de produção da *comodity*, o estado de Minas Gerais foi o maior produtor, tanto em ROM quanto em produto beneficiada. Neste mesmo ano, 82 minas estiveram em operação, todas explotadas pelo método a céu aberto, com percentual de 90,76% da produção realizada pelas empresas Vale S.A., Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A., CSN Mineração, Samarco Mineração e Mineração Usiminas S.A. (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023d).

Em relação às reservas minerais, o Brasil possui uma estimativa de 34 bilhões de toneladas, segunda maior reserva mundial, com teor médio de 45,7% de ferro, correspondendo a 18,8% das reservas mundiais do metal. Em termos percentuais, 81,6% das reservas encontram-se inseridas no estado de Minas Gerais, 10,6% no estado do Pará e 2,7% no estado do Mato Grosso do Sul, no denominado maciço do Urucum, e o restante, distribuídas entre outros estados, como São Paulo, Bahia e Ceará (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022).

Os principais minerais portadores de ferro são a hematita, goethita, magnetita, limonita e siderita. Diferentes tipologias de minério de ferro são encontradas no Brasil, que podem ser divididos em dois grupos distintos: os minérios hematíticos (com teores acima de 60% de ferro) localizados principalmente nas províncias de Carajás, estado do Pará, e em menor quantidade no Quadrilátero Ferrífero (QF), estado de Minas Gerais (Figura 1); e os minérios itabiríticos (teores abaixo de 50% de ferro), predominantes no QF (CARVALHO, 2012; SEGURA-SALAZAR; SANTOS; TAVARES, 2021).

² A CFEM é disciplinada pela Lei 13.540/2007, sendo o *royalty* da atividade de mineração distribuído entre municípios (afetados), estados e união.

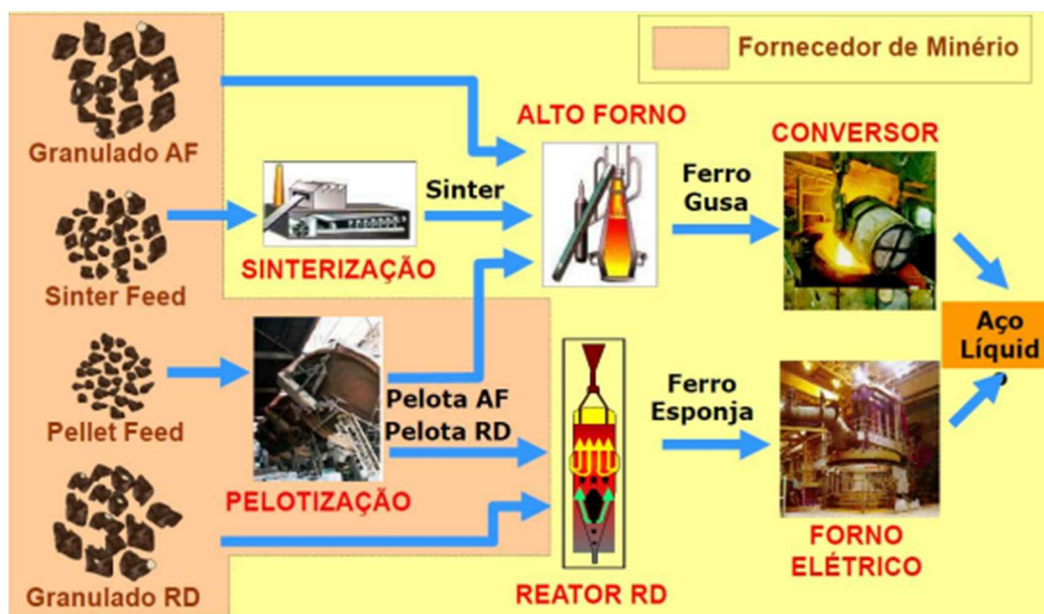
Figura 1 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Varajão e outros (2009).

Os minérios hematíticos são produtos de processos metamórficos da rocha itabirito que, localmente, solubilizaram e promoveram a remoção do quartzo, propiciando a geração de corpos de hematitas “puras”. Por outro lado, os minérios itabiríticos podem ser divididos em duas tipologias distintas: os itabiritos com maior grau de intemperismo e que possuem uma menor união de suas partículas, sendo denominados de itabiritos friáveis, e os itabiritos compactos, que não sofreram processos intempéricos (CARVALHO, 2012; TURRER *et al.*, 2013). Os produtos do minério de ferro são avaliados pelo seu teor e pela sua granulometria. Em relação a esta última classificação, que de certa forma é função do teor, verifica-se que os principais produtos do minério de ferro são granulado (*lump ore*) com granulometria entre 31,7 mm e 6,3 mm; *sinter feed*, com granulometria entre 0,15 mm e 6,3 mm; e, por fim, o *pellet feed*, com partículas menores que 0,15 mm, sendo que os dois últimos, quando usados em alto fornos, necessariamente precisarão de processos de aglomeração, denominados sinterização e pelotização (CARVALHO, 2012). Na Figura 2, têm-se a representação da granulometria dos principais produtos e a sua forma de uso nos processos produtivos à jusante (pirometalurgia).

Figura 2 – Utilização dos produtos de minério de ferro na siderurgia



Fonte: Mourão (2008).

A economicidade de uma mineração de ferro está diretamente vinculada à quantidade de granulados gerados, e a tendência atual observada, principalmente no QF, é de um afinamento dos produtos com a geração de uma maior participação de *sinter feed* e *pellet feed* (MOURÃO, 2008; TURRET *et al.*, 2013; VASCONCELOS; JESUS; SANTOS, 2021). Cabe destacar que, até a década de 1960, a produção de minério de ferro restringia-se às hematitas de alto teor de ferro ($> 60\%$), e apenas a partir da década de 1970 e 1980, tendo como precursor o projeto da Samarco S.A., em Mariana-MG, é que se iniciaram os projetos objetivando o aproveitamento de minérios itabiríticos com baixo teor de ferro (CARVALHO, 2012).

Aprofundando o tema, é importante destacar que a definição da melhor rota de processo, e mesmo dos produtos de uma determinada mina, está diretamente vinculada à tipologia do minério existente na jazida. Assim, o aproveitamento de minérios com baixo teor de ferro ($< 45\%$) implica na obrigatoriedade da moagem de todo o material extraído, uma vez que será necessária a liberação do mineral portador de ferro para posterior etapa de concentração mineral realizada através de concentração magnética, gravimétrica e/ou flotação, e que terá como produto o *pellet feed*. No contexto do QF, a lavra de itabiritos compactos tem sido uma tendência e, por consequência, a necessidade de processos de moagem, o que se traduz em rotas de processos mais complexas e com alto custo operacional, principalmente vinculados à aquisição e ao uso de energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009;

CARVALHO; PEREIRA; NOGUEIRA, 2019; SEGURA-SALAZAR; SANTOS; TAVARES, 2021). Gomes, Tomi e Assis (2015) asseveram, no contexto da sustentabilidade das atividades de mineração de ferro, na necessidade do desenvolvimento de novas rotas de processos que busquem a minimização do teor de corte das minas de ferro, principalmente, em relação à lavra de itabiritos, fazendo com que haja a maximização das reservas provadas e prováveis do metal.

Por outro lado, as tipologias de minério de ferro do depósito de Carajás, predominantemente hematíticas, possuem abundância de materiais friáveis e com uma textura mais fina, o que se traduz na geração de grande quantidade de finos durante os processos de carregamento e transporte. Em função destas características, o beneficiamento deste minério restringe-se, quase que exclusivamente, às operações de cominuição (britagem) e classificação, por conseguinte, menos energointensivas (CARVALHO, 2012; MORAES; RIBEIRO, 2018; VASCONCELOS, 2020).

Em um aspecto amplo, o processamento de minério de ferro envolve as etapas de cominuição através do processo de britagem e, a depender da tipologia do minério, pelo processo de moagem, classificação (peneiras, hidrociclones e classificador espiral) e concentração, principalmente por meio de jigagem, concentração magnética, espirais concentradoras, concentração magnética e flotação (ARAÚJO *et al.*, 2002; MARÉ; BEVEN; CRISAFIO, 2015; MATIOLO *et al.*, 2020).

2.3 Mineração e Desenvolvimento Sustentável

Nos dias atuais, é inegável a necessidade, por parte da sociedade, do uso de recursos naturais, principalmente os de origem mineral. Estes possuem uma vasta gama de utilizações, indo desde insumos empregado na agricultura até na constituição de elementos tecnológicos necessários à transição para economias de baixo carbono. Contudo, para obtenção deste recurso natural, é necessária a realização da atividade de mineração, que tem como premissa básica a extração de um recurso finito e não renovável. Diante deste impasse, a proposta do desenvolvimento sustentável deste importante setor deve estar assentada no compromisso para com a atual e as futuras gerações. Para que haja o atendimento deste duplo acordo, a atividade econômica deverá ter como resultado uma mineração que promova a ampliação do nível de bem-estar socioeconômico e minimização dos impactos ambientais para as gerações atuais e que, ao

mesmo tempo, proporcione às próximas gerações riquezas alternativas para compensação dos recursos minerais exauridos (ENRIQUÉZ; DRUMOND, 2007).

No senso comum, *a priori*, existe uma incompatibilidade ao associar a atividade de mineração ao conceito de sustentabilidade, principalmente, utilizando os conceitos dos autores advindos do pensamento da sustentabilidade forte, que tem como premissa a insubstituibilidade do capital natural. De certa forma, as operações de uma mina têm uma vida útil finita, definida em função das reservas minerais existentes. Mas, por outro lado, pode ser encarada como uma oportunidade para o desenvolvimento econômico de uma determinada região, principalmente após a exaustão das reservas minerais (ENRIQUÉZ; DRUMOND, 2007; PIMENTEL; GONZALES; BARBOSA, 2016). Dentro do contexto mineral, Mudd (2021) destaca as principais tendências deste setor, a saber:

- a) aumento das reservas minerais em função de novos conhecimentos e adição de novos depósitos minerais;
- b) necessidade de incremento das escalas de produção em resposta às demandas locais/internacionais;
- c) declínio dos teores dos principais minerais metálicos;
- d) ampliação da geração de estéreis/rejeitos;
- e) acréscimo das demandas de insumos, como água, energia e produtos químicos, e incremento do volume de emissão dos gases de efeitos estufas (GEE) e água contaminada; e
- f) ocorrência de grandes desastres e crescimento dos impactos ambientais, como, por exemplo, a ruptura das barragens de Mariana e Brumadinho.

Por outro lado, a atividade de mineração exercerá um papel fundamental ao encontro das economias de baixo carbono, uma vez que o setor será o responsável pelo fornecimento de minerais, tais como lítio, níquel, cobalto, manganês e grafita, a serem utilizados principalmente para performance, longevidade e densidade energética das baterias, além de minerais do grupo das terras raras, essenciais para a fabricação de elementos de turbinas eólicas e motores de veículos elétricos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022). Projeções apontam para um crescimento da ordem 500% na necessidade de grafita, lítio e cobalto, de 100% em relação ao níquel e de, aproximadamente, 30% de manganês, quando comparados ao ano de 2018 (HUND *et al.*, 2020). Contudo, é inegável que o aumento da demanda dos minerais necessários

à transição energética terá como resposta a elevação de impactos ambientais e sociais, assuntos estes que deverão ser priorizados pelo setor mineral e órgãos governamentais e de controle (MARIN; GOYA, 2021; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Alves, Ferreira e Araújo (2021), ao analisarem os desafios e caminhos a serem trilhadas pela mineração brasileira na busca da sustentabilidade, observaram, a partir da realização de entrevistas estruturadas com representantes da academia, setor produtivo e reguladores (ambiental e minerário), o reconhecimento do setor mineral quanto à importância da sustentabilidade, conquanto, exista uma lacuna em relação aos conceitos principais que permeiam o tema, principalmente com a relegação dos aspectos sociais e econômicos em detrimento da ótica ambiental. Outro ponto analisado pelos autores diz respeito à existência de assimetria na aceção dos conceitos e práticas de sustentabilidade das grandes minerações em relação às médias e pequenas empresas do setor. Isto pode ser explicado, em parte, por questões vinculadas a culturas corporativas, falta de envolvimento para/com as comunidades, hiatos legislativos, atuação falha por parte do Estado (fiscalização e controle) e falta de competência por parte dos gestores (ALVES; FERREIRA; ARAÚJO, 2016).

Por sua vez, Asr e outros (2019) destacam que a adoção de práticas de desenvolvimento sustentável nas operações mineiras propicia a redução de custos trabalhistas, operacionais e de garantias securitárias, e a melhoria das condições de saúde e segurança do trabalho e da relação com os principais investidores, principalmente, no tocante a práticas ESG, acrônimo inglês, de ambiental, social e governança. O aspecto ambiental, no contexto da sustentabilidade na indústria mineral, pode ser subdividido em dois grupos distintos, a saber, um relacionado aos materiais consumidos na mineração (*inputs*), como, por exemplo, a depleção dos recursos minerais, utilização de água, energia e solo; e outro referente às saídas (*outputs*) da atividade, tais como estéreis, rejeitos, contaminação do solo e da água e poluição, dentre outros (AZNAR-SANCHÉZ *et al.*, 2019).

Por seu turno, Gorman e Dzomback (2018) identificaram a existência de duas abordagens distintas de sustentabilidade que vêm sendo implementadas na indústria mineral, sendo uma focada na melhoria das operações unitárias, e outra baseada na avaliação do ciclo de vida (ACV) dos minerais. A primeira objetiva, de forma prioritária, a adoção de práticas voltadas para as operações unitárias, buscando melhoria nos aspectos ambientais e sociais, garantindo a

manutenção da saúde e segurança dos colaboradores e interesses das comunidades afetadas pela atividade. Por outro lado, o foco na ACV mineral, embora com o mesmo objetivo do anterior, traz uma visão mais holística do setor, colocando como questão central o bem mineral extraído, trazendo à baila preocupações quanto às razões sustentáveis de extração com foco na maximização da recuperação de um determinado bem mineral em seus vários processos extrativos.

Dentro deste contexto, em 2017, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) elaborou o documento intitulado Atlas: Mapeando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Mineração, tendo como foco principal o incentivo para que as empresas de mineração incorporem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em seus negócios e operações (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2017). Da análise do referido atlas, Janikoska e Kulczycka (2021) identificaram, como forma de priorização, a influência do setor mineral em relação aos ODS em três categorias de impacto distintas: muito direta, moderadamente indireta e indireta, e seu impacto sobre cada um dos ODS de maneira individualizada (positiva ou negativa). Na visão destes autores, o setor mineral alcança de forma muito direta e com consequências negativas os ODS números 6 (água potável e saneamento) e 15 (vida sobre a terra), e de forma positiva, os ODS números 7 (energia acessível e limpa), 8 (trabalho digno e crescimento econômico) e 9 (indústria, inovação e infraestrutura).

Omotehinse e Tomi (2019) realizaram a análise do impacto do setor mineral em relação aos ODS, a partir da fase do empreendimento minerador. Na fase pré-mineração (desenvolvimento), onde são realizadas as atividades de desmatamento, realocação das comunidades e construções de edificações, observou-se uma forte influência nos ODS números 1 (erradicação da pobreza), 2 (fome zero), 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e 15 (vida terrestre). Na fase de lavra propriamente dita, têm-se o impacto relacionado aos ODS números 6 e 14 (vida na água). Por fim, a fase pós-mineração atinge fortemente o ODS número 14. Ainda nesta temática, Monteiro, Silva e Moita Neto (2019) verificaram, no contexto da mineração de rochas britadas no estado da Paraíba, por meio da utilização de ferramentas sistemáticas de pesquisas bibliográficas, que as atividades de mineração interferem em todos os 17 ODS, principalmente os ODS de números 1, 2 e 8.

Ainda sob a ótica dos ODS, a questão energética no setor mineral está intrinsicamente relacionada aos ODS de números 7, 12 (consumo e produção responsável) e 13 (ação contra a mudança global do clima). Para o alcance do ODS número 7, as empresas terão que priorizar a implementação de ações de melhoria da eficiência energética nos processos e a incorporação de energias renováveis. Em relação ao ODS número 12, serão necessárias ações que tenham como objetivo a minimização do uso de energia a partir da efficientização dos processos. Por fim, no ODS número 13, deverá haver a redução das emissões de GEE, que depende obrigatoriamente de ações de inovação de processos produtivos.

Por outro lado, Levesque, Milar e Paraszczak (2014) identificaram algumas barreiras para implementação de ações de eficiência energética no setor mineral que, dentre outras, envolvem as seguintes situações:

- a) *payback* dos projetos inferiores a 6 anos;
- b) o foco da indústria mineral, de forma geral, está na produção e encontra dificuldades na abordagem conservacionista; e
- c) minas próximas ao fim das suas atividades, em face da exaustão das reservas minerais, não teriam tempo suficiente para recuperação dos investimentos.

Por seu turno, Awuah-Offei (2018) destaca que a questão da eficiência energética no setor mineral, nos últimos anos, alcançou novas preocupações e motivações. Se antes estava assentada tão somente em aspectos econômicos, atualmente, fatores relacionados à mudança do clima e à pegada do carbono dos produtos tornaram-se protagonistas. De forma geral, o aumento da demanda por recursos minerais e a diminuição dos teores das principais jazidas do mundo fazem com que haja a tendência do aumento do consumo energético das atividades de mineração (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013; ATENG, 2020; IGOGO *et. al.*, 2021; MUDD, 2021). Por outro lado, a atividade de mineração, em face das pressões para redução de custo e dos impactos ambientais de suas atividades, vem ao longo do tempo inovando em seus processos produtivos, como, por exemplo, por meio do uso de equipamentos de mineração autônomos, tecnologias robóticas vinculadas às tarefas relacionadas às principais operações unitárias, utilização de centro de operações remotas, uso de inteligência artificial, digitalização dos processos, maior eletrificação, abordagem *mine to mil*, *machine learning*, melhorias de processos de cominuição e etc. (NAPIER–NUN, 2015; HOMES; LU; LU, 2022). Nesta esteira, é relevante destacar que muitas destas inovações contribuem para processos mais

eficientes, principalmente no que se refere ao consumo energético, conforme pode ser verificado em Katta, Davis e Kumar (2020b), Soofastaei e Fouladgar (2021), Brasil Mineral (2021) e Vianna (2021), dentre outros.

Ainda, em relação ao tema mineração e energia, merece destaque o trabalho de Perlin e outros (2018), que buscou identificar a existência de correlação entre a prática da gestão da energia e do desempenho da sustentabilidade no setor mineral brasileiro, constatando, na oportunidade, pela existência de uma associação positiva entre as variáveis estudadas. Cabe destacar, porém, que uma das limitações do estudo se refere à falta de representatividade da amostra, uma vez que as empresas participantes da pesquisa atuavam majoritariamente na extração de agregados para construção civil e carvão mineral, o que acabou por excluir as grandes empresas do setor, principalmente as de extração das *commodities* minerais.

2.4 Mineração e Energia no Contexto das Operações Mineiras

No contexto mineral, a temática da energia é intrínseca às suas operações unitárias. Assim, e considerando a importância deste assunto, encontra-se descrito a seguir, a análise das principais atividades mineiras sob o prisma deste importante insumo.

2.4.1 Perfuração e Desmonte

Os equipamentos de perfuração utilizados na mineração têm como principais insumos energéticos a eletricidade e o óleo diesel. Em termos de indicadores de desempenho energético, a etapa de perfuração consome aproximadamente 0,5 kWh/t (HOLMBERG *et al.*, 2017; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021). Ao comparar o consumo das perfuratrizes elétricas em relação às perfuratrizes movidas a óleo diesel, Miranda e outros (2016) verificaram, no contexto de uma mineração de ferro do QF, que as primeiras apresentaram um consumo energético trinta vezes menores que a sua concorrente, em uma condição de quase equivalência operacional, uma vez que, na questão de disponibilidade física, as perfuratrizes com combustíveis fósseis apresentaram números ligeiramente superiores.

No que concerne ao desmonte de rocha por explosivos, Roy (2021) assevera que a detonação de um agente explosivo é responsável por uma geração de grande quantidade de energia.

Contudo, parte desta, ao invés de ocasionar a quebra das rochas (trabalho útil), é revertida em luz, calor, ondas sonoras e de choque, que ocasionam impactos negativos em desfavor das comunidades próximas às atividades de extração mineral. Por sua vez, Sanchidrián, Segarra e López (2017) destacam que a energia química do explosivo, após o processo de detonação, é decomposta em energia de fragmentação, sísmica, cinética e outras formas não medidas. Entretanto, apenas o percentual de 7% a 25% deste montante é convertido em energia útil para quebra da rocha.

Analisando a operação unitária como um todo (perfuração e desmonte), observa-se que esta foi responsável pelo percentual de 7% de toda a energia utilizada na atividade de mineração nos Estados Unidos (US DEPARTMENT ENERGY, 2007). Tomando como base apenas as atividades desenvolvidas na mina, foram identificados, no âmbito da mineração a céu aberto canadense, consumos energéticos da ordem de 13% nesta operação unitária (NATURAL RESOURCES CANADA, 2005). Ademais, é imperioso destacar a existência de uma relação direta entre a característica da rocha a ser desmontada (dureza, estado de tensões e composição mineralógica, dentre outros) e o consumo energético necessário nas etapas de perfuração e desmonte (LEVESQUE, 2015).

Não menos importante, convém destacar a abordagem *mine to mill* que vem sendo cada vez mais implementada nos empreendimentos mineradores a nível mundial. Seu principal objetivo é o aumento da eficiência energética dos processos de cominuição, a partir da otimização do desmonte de rochas, especificamente na busca da criação de microfissuras no material, quando da detonação, facilitando sobremaneira a diminuição da granulometria nas etapas posteriores (britagem e moagem), e tornando-os menos energointensivos (NAPIER–MUNN, 2015; PARK; KIM, 2020). Acerca deste assunto, Carlos e Koppe (2016) verificaram, ao estudar uma mineração de ferro do QF, a existência de uma relação direta entre o aumento da razão de carga de explosivos e a redução do consumo específico de eletricidade na etapa de moagem.

2.4.2 Carregamento e Transporte

O setor de carregamento e transporte, segundo estudos conduzidos por Haque e Norgate (2015) e Palamure (2016), constitui-se como a operação unitária no âmbito da mineração de ferro com maior consumo energético. Haque e Norgate (2015) verificaram, no contexto da mineração da Austrália, um consumo energético de 92,1 MJ/t transportada (25,55 kWh/t), correspondendo a

76,87% do total da atividade. Por seu turno, Palamure (2016) observou, neste mesmo país, consumo energético de até 47,18 kWh/t transportada em empresas de pequeno porte, correspondendo a 75% do total; e, em empresas de médio porte, consumo energético de 25,9 kWh/t, correspondendo a 58,8% do total. Não obstante aos fatos destacados, Palácios (2011), ao realizar simulações em uma mina de ferro hipotética, estimou para a etapa em apreço consumos da ordem de 53,66 MJ/t transportada (14,96 kWh/t), correspondendo a 38% do montante total.

Em termos de insumos energéticos, a etapa de carregamento e transporte utiliza-se de eletricidade para alimentação de escavadeiras elétricas, correias transportadoras, sistemas de britagem móvel, denominados *in-pit crushing and conveying* (IPCC), e de combustíveis fósseis, majoritariamente óleo diesel, principal insumo de carregadeiras, escavadeiras e caminhões mecânicos e diesel-elétricos (CARLOS, 2017). Segundo estimativas de Jonusan (2017), a etapa de lavra seria responsável pelo consumo de 9,2% da eletricidade de uma empresa de mineração, conquanto nesta operação unitária haja o predomínio de combustíveis fósseis, fazendo com que a etapa de carregamento e transporte seja responsável por aproximadamente 50% dos gases de efeito estufa (GEE) emitidos no contexto da mineração de ferro e bauxita australiana (NORGATE; HAQUE, 2010).

Por seu turno, Soofastaei e outros (2018) asseveram que aproximadamente 40% de toda energia utilizada em minas a céu aberto seja proveniente do consumo de óleo diesel, estando grande parte desta associada às operações de transporte de material, realizados de forma preponderante por caminhões. Neste sentido, Vasconcelos (2020) observou que o percentual de 70,13% da energia utilizada no complexo de Carajás é oriunda do óleo diesel, em sentido oposto ao verificado no QF, onde este insumo correspondeu, no contexto do estudo, a 44,88% do total consumido. Em uma mina, os caminhões são os principais equipamentos responsáveis pelo transporte e movimentação do ROM, para a britagem primária, e do estéril, para sua disposição em pilhas de estéreis ou “minérios futuros”. O consumo de combustível destes equipamentos é dependente de diversas variáveis, como a soma do peso do equipamento e de sua carga, a velocidade de transporte, a resistência total ao movimento do equipamento (dependente da inclinação das estradas), a força de tração, a rotação do motor, a velocidade do veículo, os parâmetros da mina (topografia, distância do transporte, modelo), o tipo do caminhão (convencional ou *off-road*), o material a ser transportado, o fator de carregamento, o ciclo de

trabalho, a produtividade, os fatores vinculados à manutenção e etc. (PERALTA; SASMITO; KUNRAL, 2016; SOOFASTAEI *et al.*, 2018; SAHOO; BANDYOPADHYAY; BANERJEE, 2018).

Além das condições operacionais e características dos equipamentos, insta destacar o papel dos operadores na busca da eficiência energética das operações de carregamento e transporte, uma vez que eles impactam de forma direta em parâmetros fundamentais dos equipamentos, tais como carga dos caminhões, velocidade dos equipamentos, mudanças de velocidades e etc. (AWUAH-OFFEI, 2016). Sob esta ótica, Sales e outros (2020) verificaram o potencial da redução do consumo de óleo diesel em caminhões, a partir da utilização de simuladores no treinamento de operadores com foco na correção das principais falhas operacionais correlacionadas a este insumo. Por outro lado, desponta como uma alternativa em grandes minerações o uso do transporte autônomo, onde os operadores dos caminhões e equipamentos de carregamento são substituídos por sensores, sendo as rotas do transporte do ROM e estéreis definidas por sistema de despacho de mineração, ficando a atuação humana restrita ao controle de forma remota, com intervenções pontuais (KEENAN; KEMP; OWEN, 2019). Dados de uma mina no QF da Vale S.A. apontam uma redução da ordem de 5% de economia de combustível com a implementação do sistema autônomo (BRASIL MINERAL, 2021).

É inegável, do ponto de vista da eficiência energética, que um sistema de transporte deve buscar a otimização da distância média de transportes (DMT), do gradiente das vias de transporte, do ciclo das operações e da velocidade de transporte, sendo as duas primeiras dependentes do planejamento da mina e das condições do solo e topografia, enquanto as outras variáveis são ditas como operacionais (SAHOO; BANDYOPADHYAY; BANERJEE, 2018). Neste sentido, existem duas formas distintas de se fazer a alocação dos caminhões em uma determinada mina, a saber, a estática, pela qual são definidos pontos fixos para carregamento e descarga dos caminhões, e a dinâmica, em que a rota dos caminhões é realizada por meio de algoritmos que buscam a otimização das operações, reduzindo os tempos de filas, a distância de transporte e demais atrasos operacionais (ALMEIDA; NEVES; FIGUEIREDO, 2018). Neste sentido, Patterson, Kozan e Hyland (2017) observaram, em uma mineração a céu aberto, que, a partir da utilização de técnicas de programação linear aplicadas aos equipamentos de carregamento (estático) e caminhões (dinâmicos), é possível, segundo simulações, o aumento da eficiência energética na operação da ordem de 17,6%. Por sua vez, Felsch Júnior e outros (2020)

examinaram, em uma mineração de ferro no QF, economia anual de 608.110 litros de óleo diesel/ano com a implementação do sistema de alocação dinâmica, ensejando na redução da emissão de 1.630 toneladas de CO₂e. Ademais, verifica-se cada vez mais a utilização de inteligência artificial para predizer as variáveis que mais impactam no consumo energético dos equipamentos de transporte e, por conseguinte, propiciar melhores condições operacionais para uma maior eficiência da operação unitária (SOOFASTAEI, 2021).

Não obstante ao todo anteriormente explanado, é importante destacar que, no contexto da mineração a céu aberto, existe uma tendência, ao passar do tempo, que as minas se tornem mais profundas e com uma maior distância em seu sentido longitudinal, fazendo com que haja o incremento da DMT, o que aduz na redução da produtividade dos caminhões, o que ocasionará, em uma primeira instância, na necessidade de maior número de equipamentos, elevando o consumo energético e emissões dos GEE. Por exemplo, uma redução da DMT em 500 metros pode resultar na diminuição do consumo energético da ordem de 31% (PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021).

Neste sentido, tem-se tornado uma prática do setor mineral, em alguns casos, a substituição total ou parcial de caminhões por correias transportadoras, principalmente no que se refere ao transporte de ROM (NORGATE; HAQUE, 2013; RIBEIRO; SOUSA; LUZ, 2018; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021). Na metodologia *in-pit crushing and conveying* (IPCC), pode conter apenas o transporte de material, quando a tipologia for mais friável, ou por sistemas de britagens (fixas, semi-móveis ou móveis), quando o material possuir uma tipologia mais compacta e que necessite da etapa de desmonte e britagem primária (RIBEIRO, 2013). Em termos de consumo energético, Ferreira e Leite (2015), no contexto de uma empresa de mineração de ferro do QF, verificaram a necessidade de 0,21 litros de óleo diesel (equipamentos móveis) e 1,13 kWh em energia elétrica (correias transportadoras) para produção de 1 tonelada de minério. Katta, Davis e Kumar (2020a) destacam que, em termos energéticos, o transporte por correias pode ser três vezes menor que o método tradicional. No contexto nacional, podem ser citados os trabalhos de Ribeiro, Sousa e Luz (2016) e Almeida, Neves e Figueiredo (2018), que avaliaram a implementação do IPCC no âmbito de minas do QF. Embora no primeiro estudo a solução apresentou-se viável do ponto de vista ambiental e econômico, no segundo, por questões inerentes àquela operação, o resultado mostrou-se mais oneroso quando comparado às operações convencionais de transporte.

Os custos com a aquisição de óleo diesel em uma mina a céu aberto podem representar o percentual de até 22% dos custos totais, alcançando valores unitários da ordem de US\$ 0,40 por tonelada transportada (FERNANDES *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021). Em termos de indicadores de desempenho energético, Curi e outros (2014) observaram, ao analisar rotas de caminhões fora de estrada, consumo horário de óleo diesel da ordem de 150 litros por equipamento, com um consumo específico de 0,40 litros/t transportada. Por sua vez, Vasconcelos, Jesus e Santos (2021), em relação ao consumo específico por tonelada (ROM) transportada, verificaram, no contexto das atividades de mineração de ferro, um aumento de 146% deste indicador no período compreendido entre 2010 e 2018, explicado, *a priori*, por questões vinculadas ao incremento da DMT das minas.

Ainda nesta esteira, Rodovalho, Lima e Tomi (2016) propuseram, em um estudo de caso realizado na mineração de ferro no QF, com a utilização de ferramenta estatística de regressão linear múltipla, uma equação para estimar o consumo de óleo diesel. Esta possuía como variáveis independentes o volume de tráfego, o material da pavimentação das vias, a tipologia do material empregado na manutenção das vias e a precipitação na área da mineração, ou seja, variáveis operacionais e relacionadas ao planejamento da lavra, consoante ao verificado em Sahoo, Bandyopadhyay e Banerjee (2018). Ao comparar o consumo de óleo diesel entre caminhões fora de estrada mecânicos e diesel-elétricos, Pereira (2019) aferiu que os últimos são mais eficientes, muito provavelmente em função destes possuírem um sistema de retardo dinâmico que absorve parte da energia gerada pelo movimento do equipamento, para então ser aplicada no funcionamento do motor Diesel. Por seu turno, Curi e outros (2014), na mina de Casa de Pedra situada no QF, verificaram que, para o transporte de material em subida, os caminhões diesel-elétricos apresentavam consumos menores de combustíveis em relação aos caminhões mecânicos, situação que se invertia quando o transporte de material ocorria em descida.

Por fim, o então Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Telecomunicações (MCTI) sugeriu, no ano de 2017, a adoção, por parte de empresas, de ações para o aumento da eficiência energética do setor de transporte de minério, sendo estas, a melhoria da gestão de carga útil dos caminhões, o treinamento de operadores, a utilização de caminhões com maior capacidade, o planejamento de manutenções e a implementação de sistemas de transporte por correias (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES,

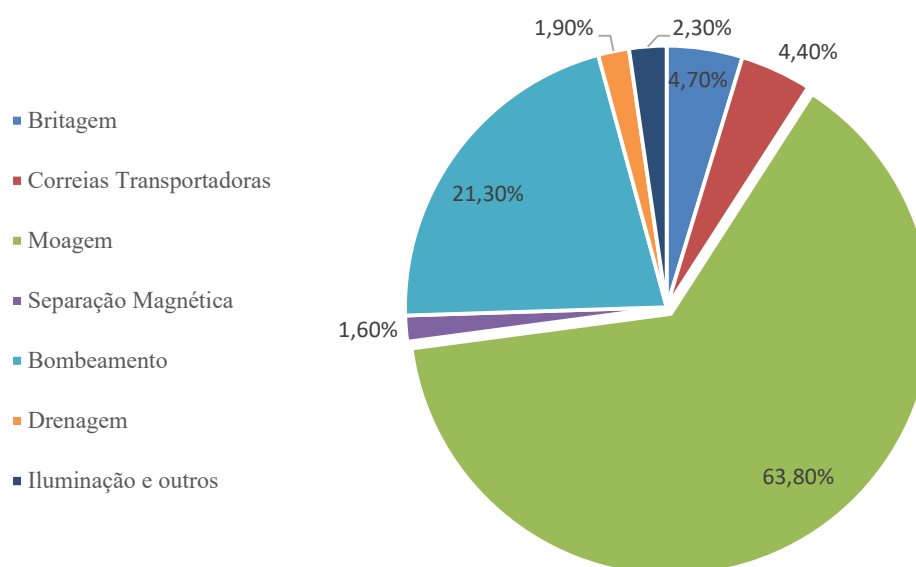
2017). Desponta ainda como alternativa, a prática da pré-concentração realizada na mina, propiciando uma maior seletividade ao material que será direcionado para o beneficiamento, ocasionando, assim, a diminuição da quantidade de material a ser transportado para a planta de beneficiamento (DUFFY *et al.*, 2013).

2.4.3 Beneficiamento

No beneficiamento, o principal insumo energético é a eletricidade, utilizada sobretudo em motores elétricos que fazem o acionamento de correias transportadoras, peneiras vibratórias, bombas de polpa, moinhos, britadores, máquinas de flotação e etc. (CARLOS, 2017; VASCONCELOS, 2020; ALLEN, 2021). Segundo Jonusan (2017), o percentual de 88,8% da energia elétrica consumida em uma mineração é utilizado no beneficiamento de minério, de tal sorte que o restante se distribui entre a infraestrutura da mina (perfuratrizes elétricas e bombeamentos), operações de mina (escavadeiras elétricas e iluminação da área) e apoio industrial, com os percentuais de 6,0%, 3,2% e 2,0%, respectivamente.

Na Figura 3, observa-se a distribuição do consumo energético entre as operações unitárias de beneficiamento de ferro, extraída de Karmazin, Bikbov e Bikbov (2002), onde pode ser verificado que o maior consumo se refere à etapa de moagem.

Figura 3 – Distribuição do consumo energético entre as principais operações do beneficiamento de minério de ferro



Fonte: Karmazin, Bikbov e Bikbov (2002).

Nota: Adaptado pelo autor.

Estima-se que cerca de 2% de toda a energia consumida no mundo ocorra na operação de cominuição, que envolve as etapas de britagem e moagem, o que faz com que este processo desponte como uma das atividades mais energointensivas da mineração, responsável pelo percentual de até 53% do total da energia consumida na mineração (NAPIER-NUNN, 2015; KLEIN; WANG; NADOLSKI, 2018). O estudo denominado *Mining Energy Consumption 2021* verificou que o consumo energético da cominuição, no ano de 2021, foi da ordem de 43% do total de toda a energia utilizada na mineração de ferro (ALLEN, 2021). Por seu turno, Soofastaei e outros (2018) destacaram que, no ano de 2013, os maiores consumos energéticos na mineração da Austrália foram derivados das atividades de cominuição (40,5%), seguidos pela etapa de carregamento e transporte de material (20,6%) e ventilação (10,1%), esta última relativa exclusivamente às atividades de mineração subterrânea.

É salutar destacar a existência de uma relação crescente entre o consumo energético por unidade de massa em relação à diminuição do tamanho do produto gerado pela cominuição. O consumo de energia na etapa de desmonte de rochas é de aproximadamente 1 kWh/t, na etapa de britagem de 4 kWh/t e, por fim, nos circuitos de moagem, de até 35 kWh/t (SAMPAIO; DELBONI JÚNIOR, 2018; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021). Dentro deste contexto, é importante destacar a existência da Lei de Bond, pela qual é possível estimar a energia requerida para a etapa de moagem de uma determinada espécie mineral (kWh/t) por meio do *work index* (WI), obtido por intermédio de testes laboratoriais padronizados, o qual leva em consideração a granulometria da alimentação e do produto desejado (SAMPAIO; DELBONI JÚNIOR, 2018).

Acerca da questão do consumo energético na etapa de cominuição, Napier-Nunn (2015) destaca que, às vezes, o problema não é tratado com a devida importância, muito pela falta de interesse das empresas, principalmente em situações nas quais há uma verticalização das operações, o que faz com que, em termos percentuais, o consumo energético desta etapa não seja a grande “vilã” daquele determinado empreendimento. Por outro lado, este mesmo autor assevera que este tipo de abordagem é “miope”, uma vez que é necessário o entendimento que todas as operações são interligadas.

Sobre a operação de britagem de minério de ferro, Haque e Norgate (2015) sustentam que seu consumo específico seria da ordem de 1,9 kWh/t, valor este, próximo ao encontrado por Jeswiet

e Szekeres (2016) que, em seu estudo, observaram a quantia de 1,5 kWh/t. Por sua vez, Katta, Davis e Kumar (2020a) verificaram o consumo de 1,27 kWh/t a 5,55 kWh/t, a depender da tipologia e da rota de minério.

A moagem, por seu turno, é sem sombra de dúvida a maior consumidora de energia elétrica no processo de beneficiamento, podendo alcançar o percentual de 64% do total energético (HAQUE; NORGATE, 2015; JESWIET; SZEKERES, 2016; JONUSAN, 2017; KATTA; DAVIS; KUMMAR, 2020a). Em termos de indicadores de consumo energético, Palácios (2011) destaca quantias da ordem de 19,35 kWh/t, enquanto Katta, Davis e Kumar (2020a) valores de 29,3 kWh/t.

Ao estudar a etapa de moagem, Carlos (2017) observou a existência de diversas variáveis que podem impactar o consumo de energia elétrica na moagem, estando estas divididas em três grupos principais, sendo estes, característica do minério (dureza, WI), variáveis operacionais (temperatura, umidade, instrumentação e controle de processo) e características dos equipamentos (vida útil e condição de manutenção). Insta destacar que estudos apontam que apenas 1% da energia utilizada na moagem tem como fim a diminuição da granulometria do material, sendo o restante desta transformada em calor, ruído e movimento (HOLMBERG *et al.*, 2017; PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021).

Neste contexto, floresce como uma das soluções para a melhoria energética da etapa de cominuição a implementação de rotas de processos com o equipamento denominado prensas de rolos de alta pressão (HPGR, do inglês *high pressure grinding rolls*), que se distingue dos britadores convencionais e dos moinhos por apresentar uma melhor eficiência energética e alta capacidade de moagem (NAPIER-NUNN, 2015; LUZ; ALMEIDA; BRAGA, 2018). Esta tecnologia tem sido utilizada no Brasil no Projeto Minas-Rio da Anglo América, em substituição às britagens terciárias e quaternárias, e no processo de pré-pelotização (remoagem do *pellet feed*) nas usinas da Vale S.A. e Samarco S.A. instaladas no estado do Espírito Santo (CAMPOS, 2018). Em relação ao Projeto Minas-Rio, Castro e outros (2019), por meio da realização de testes laboratoriais, observaram que o HPGR proporciona uma economia no consumo energético de 23% na moagem primária, o que pode ser explicado pela criação de micro trincas durante o processo de prensagem. Por seu turno, Segura-Salazar e Tavares (2015) concluíram, utilizando-se de testes laboratoriais e simulações com amostras de minérios

provenientes do QF, que os circuitos de cominuição com o HPGR eram mais eficientes energeticamente, quando comparados às rotas de processos convencionais.

No âmbito da etapa de remoagem do *pellet feed*, particularmente no processo de pelotização, Vianna (2021) analisou, em escala piloto, sob o viés técnico, econômico e ambiental, a viabilidade da substituição da rota tradicional à úmido, composta por moinho de bolas, classificação em circuito fechado e espessamento, pela utilização do HPGR, através de múltiplas prensagens. Os resultados obtidos demonstraram a redução de custos operacionais, benefícios ambientais com a diminuição de insumos como água, óleo lubrificante e graxa mineral, e a obtenção de uma melhor eficiência energética do processo de cominuição. Por outro lado, houve uma perda na qualidade metalúrgica, que deverá ser melhor entendida, por meio de estudos posteriores.

Jankovic e Valery (2013) perceberam que o aumento da eficiência operacional da etapa de classificação acarretou, de forma considerável, a melhoria da eficiência energética dos circuitos de moinhos de bola, com potencial de redução de 15 a 25% do consumo energético do equipamento. Nesta mesma linha, Napier-Numm (2015) assevera que a solução, para uma melhor eficiência da etapa de cominuição, pode ser obtida com a implementação, dentre outras, das seguintes ações:

- a) melhorias na etapa de classificação, principalmente em relação aos produtos dos hidrociclones;
- b) adoção da abordagem *mine to mill*;
- c) implementação de novas tecnologias de cominuição com adoção maciça de ferramentas de modelagem de processos; e
- d) visão holística de toda a cadeia de beneficiamento de minérios.

Dentro deste mesmo pensamento, Silva e outros (2015), por meio da modificação do circuito de moagem secundária de uma mina de ferro no QF, obtiveram redução do consumo energético em 9,3%, corroborando com os autores anteriormente mencionados.

Outra etapa energointensiva dentro do contexto do beneficiamento refere-se à operação de bombeamento (polpa e água), que corresponde a até 21% do consumo de energia elétrica de uma planta de beneficiamento (BIKBOV *et al.*, 2004). Gava (2016), utilizando-se de

simulações computacionais, observou que os parâmetros que mais influenciam no desempenho energético (em termos de kWh/m³) da etapa de bombeamento foram: o comprimento da tubulação, o diâmetro do duto e a concentração de sólidos, o que também foi percebido por Macía e outros (2019).

Em relação ao consumo energético da etapa de concentração, verifica-se a inexistência de trabalhos específicos, que pode ser em parte explicada pelo baixo consumo desta etapa quando comparada às atividades de cominuição (PALÁCIOS, 2011). Em relação a indicadores de consumo energético, observaram-se valores de 1,38 kWh/t para concentração por espirais, 2,22 kWh/t em separadores magnéticos e 8,78 kWh/t em processos gravimétricos/flotação (KATTA; DAVIS; KUMAR, 2020a).

Para Klein, Wang e Nadolski (2018), a busca pela melhoria da eficiência energética nas operações de beneficiamento deverá ser focada em três áreas chaves:

- a) implementação de sistemas de gestão energética, como a ISO 50.001, por exemplo, com o aprimoramento nos níveis de gestão e operacional;
- b) otimização dos circuitos de cominuição com a utilização de ferramentas de simulação, bem como a adoção de técnicas avançadas de instrumentação e controle de processos, permitindo que a planta absorva flutuações de processos e tipologias diferentes de minérios; e
- c) medições das principais variáveis e adoção de *benchmark* em eficiência energética como norteadores de modificações no processo.

2.5 Fatores Influenciadores do Consumo Energético na Mineração de Ferro

Além da aplicação das melhores técnicas disponíveis (BAT, do inglês *best available technologies*), a disponibilidade de equipamentos apropriados e a otimização de suas localizações (por exemplo, a distância entre as frentes de lavra e a britagem primária) podem influenciar sobremaneira o aumento da eficiência energética das operações unitárias. Por outro lado, propriedades inerentes do minério, da atividade de mineração propriamente dita (REM, DMT, teor) e de rotas de processos exercem papel preponderante no consumo energético das operações (PALÁCIOS, 2011). Diante do exposto, destaca-se a seguir as principais

características das variáveis elencadas e a forma como elas influenciam no consumo energético das operações unitárias para a produção de minério de ferro.

2.5.1 Tipologia do Minério

Palácios (2011) assevera que as características físicas dos minérios, tais como dureza, tamanho de grãos, susceptibilidade magnética e friabilidade, influenciam sobremaneira a eficiência energética de uma determinada operação. Dito isto, o WI surge como uma das principais características que interfere diretamente no consumo energético de uma determinada tipologia. Este corresponde, de forma numérica, à estimativa de energia total consumida, em kWh por tonelada curta (st, do inglês *short tonne*), necessária para a redução de um determinado minério, desde um tamanho teoricamente infinito até uma granulometria em 80% do material seja passante em uma peneira de 0,106 mm. Em outras palavras, o WI pode ser definido como a resistência de um determinado minério à etapa de moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível a avaliação da energia, em termos de kWh/t, para moagem do minério a uma determinada granulometria necessária às etapas subsequentes do processamento de minério (BARBATO; SAMPAIO, 2007). Neste sentido, verificam-se na literatura alguns estudos publicados no Brasil que buscaram o conhecimento do WI das diferentes tipologias de minério de ferro, especificamente no contexto do QF, conforme pode ser verificado no Quadro 2.

Quadro 2 – *Work Index* (WI) de diferentes tipologias de minério de ferro no QF

WI	LOCAL/TIPOLOGIA	FONTE
8,08 a 14 kWh/st	Itabiritos compactos da Serra Azul	Vasconcelos, Brandão e Nogueira (2013); Bontempo e outros (2013)
3,9 a 4,9 kWh/st	Itabiritos friáveis e compactos da Serra do Sapo	Turner e outros (2014)
7,09 kWh/st	Itabiritos de Sapecado	Neves e outros (2019)
8,00 a 15,80 kWh/st	Itabiritos da Mina de Alegria	Freitas (2014)
4 a 6 kWh/t	Hematitas e itabiritos friáveis, Mina de Conceição,	Jesus (2017)
10 a 16 kWh/t	Hematitas e itabiritos compactos, Mina de Conceição	Jesus (2017)

Fonte: Elaborado pelo autor.

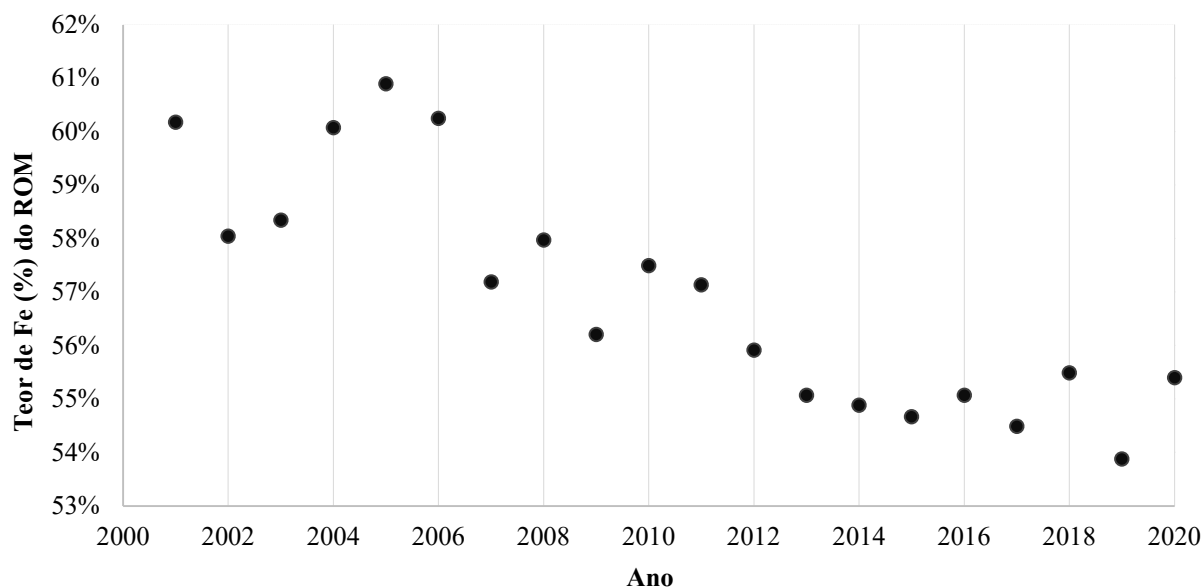
2.5.2 Teor

É salutar destacar a existência de uma tendência mundial da diminuição dos teores globais do minério de ferro que, aliada à diminuição de granulometria do material *in natura*, faz com que seja necessário o aumento da quantidade de material a ser extraído, carregado, transportado e processado, e, por conseguinte, maior consumo energético, muitas das vezes associado ao aumento das emissões dos GEE (HAQUE; NORGATE, 2015; IGOGO *et al.*, 2021). Pondo luz a esta questão, Palácios (2012) e Gan e Griffin (2018) observaram que pequenas diminuições de teores podem ocasionar um aumento de forma exponencial das emissões de GEE.

Palamure (2016) e Vasconcelos (2020) também estudaram a influência da variável teor em relação a indicadores de desempenho energético na mineração de ferro, concluindo na existência de uma forte correlação negativa, de tal sorte que a diminuição dos teores ocasionava um aumento dos indicadores de consumo específico. Ainda nesta linha, merece destaque o trabalho de Vilaça e outros (2022) que, ao analisarem a questão da geração de resíduos e utilização de insumos na mineração de ferro no QF, observaram, no intervalo de 2010 a 2018, aumento de 90% no consumo de energia elétrica necessária para o beneficiamento de minérios de ferro, resultado este influenciado sobremaneira pela diminuição dos teores globais das minas.

Em relação aos teores globais das jazidas de minério de ferro no Brasil, verifica-se, a partir da leitura do Figura 4, que no ano de 2005 os teores médios das jazidas brasileiras eram da ordem de 60,90%, enquanto no ano de 2020 foi de 55,40%, representando, em termos percentuais, uma diminuição da ordem de 8,96%.

Figura 4 – Teores médio da produção bruta mina (ROM) no Brasil nas últimas duas décadas



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023c).

Nota: Elaborado pelo autor.

2.5.3 Relação Estéril-minério

De forma geral, a diminuição dos teores globais, o aprofundamento das minas, a redução no volume das reservas minerais provadas e prováveis e até mesmo a melhoria dos processos de beneficiamento resultam em uma tendência natural do aumento da REM, fazendo com que haja o incremento da quantidade de estéril movimentado, e, por conseguinte, do consumo de óleo diesel e das emissões de GEE (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013; VASCONCELOS; JESUS; SANTOS, 2021). Neste sentido, verifica-se, a partir da análise do trabalho de Palamure (2016), que a variável REM foi a que mais impactou no consumo energético no contexto das minerações australianas que compuseram o seu estudo.

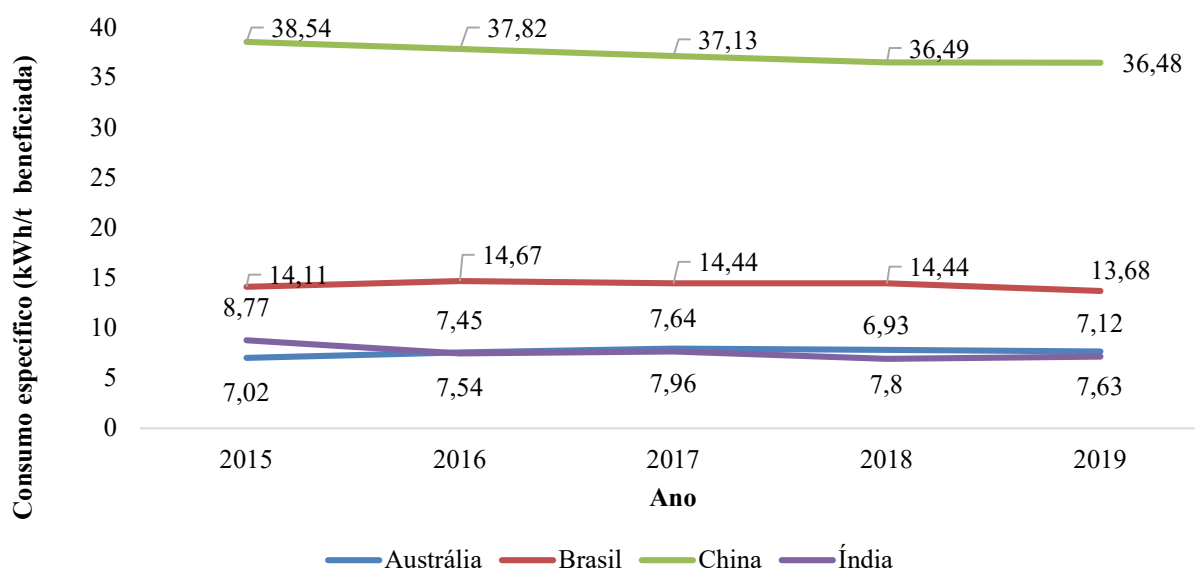
2.5.4 Rotas de Processo

Não obstante ao aumento da quantidade de material a ser processado, a diminuição de teores e a modificação nas tipologias de minérios lavrados demandam processos de beneficiamento mais energointensivos, principalmente em relação à etapa de cominuição, uma vez que se faz necessária a liberação das espécies minerais para uma posterior etapa de concentração (HAQUE; NORGATE, 2015). Neste sentido, e no contexto brasileiro, especificamente no QF, o aproveitamento de itabiritos de forma geral, principalmente os com WI maiores, ensejará, muito provavelmente, na necessidade de várias etapas de cominuição e, por conseguinte, em

um maior consumo energético (PINTO; DELBONI JÚNIOR, 2016). Esta situação foi analisada por Vasconcelos, Jesus e Santos (2021), que observaram um aumento no indicador de consumo energético (kWh/t) do beneficiamento de minério de ferro na região do QF da ordem de 76,29% (de 10,8 kWh/t para 17,76 kWh/t) no período compreendido entre 2010 e 2018, muito em função da situação anteriormente explanada.

Neste contexto, extrai-se, a partir da leitura da Figura 5, indicadores de consumo de energia elétrica específicos para a etapa de beneficiamento de minério de ferro no Brasil, Austrália, Índia e China no período compreendido entre 2014 e 2020. Pode-se observar que o Brasil possui o segundo maior indicador, ficando atrás da China, onde os teores médios da jazida são da ordem de 28,67% (WU *et al.*, 2016)

Figura 5 – Consumo específico médio de eletricidade no beneficiamento de minério de ferro nos principais países produtores (kWh/t beneficiada)



Fonte: CRU (2017 *apud* Garcia, 2021).

Nota: Adaptado pelo autor.

2.6 Principais Estudos Vinculados a Energia e Mineração de Ferro

Da leitura do trabalho de Levesque, Millar e Paraszczac (2014), assevera-se que a preocupação do setor mineral com a questão energética remonta à década de 1970, quando as empresas começaram a implementação de simples ações, como a priorização da diminuição do

desperdício de ar comprimido e estudos vinculados ao aproveitamento de energia térmica em seus processos. Com o melhor entendimento da questão energética, as proposições de ações foram se aperfeiçoando, e a preocupação para com o tema logrou êxito a partir da elaboração de estudos setoriais em alguns países. Neste sentido, podem ser destacadas iniciativas dos governos dos Estados Unidos e do Canadá ao realizarem estudos no setor mineral. Os Estados Unidos, por meio do *US Department of Energy*, publicaram, no ano de 2002, o documento denominado *Energy and Environmental Profile of the US Mining Industry*, onde, em um dos seus capítulos, foi apresentada a estimativa de consumo energético da mineração de ferro. Neste estudo, foi identificado, em termos de indicadores de consumo energético, que seriam necessários 82.600 BTU (24,20 kWh) na lavra e 11.800 BTU (3,45 kWh) na etapa de beneficiamento para a produção de 1 tonelada de minério (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2002). Este mesmo departamento, no ano de 2007, publicou o *US Mining Industry Energy Bandwidth Study* que, além do consumo energético da mineração americana de forma agregada (setores de mineração de carvão, metais e minerais industriais), trouxe a previsão da redução de consumo considerando a adoção das práticas das melhores tecnologias disponíveis por parte das empresas do setor. Neste estudo, foi estimado que a indústria de mineração de metálicos poderia economizar 338 trilhões de BTU/ano com a simples adoção das BAT em seus processos produtivos (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2007).

O Canadá, por sua vez, por meio do *Natural Resources Canada*, divulgou, no ano de 2005, o documento intitulado *Benchmarking the Energy Consumption of Canadian Open-Pit Mines*, que trouxe os principais indicadores de consumo energético de minas a céu aberto, representadas pelas minerações de ouro, ferro e *oil sands*. Neste trabalho, foi possível observar que o consumo energético das minas, de forma agregada, variou de 7,0 a 42,47 kWh/t ROM e, no beneficiamento, de 13,11 a 35,70 kWh/t de minério processado (NATURAL RESOURCES CANADA, 2005).

Por sua vez, Allen (2021) analisou o consumo energético do setor mineral mundial sob a ótica das principais *commodities* (ouro, cobre, níquel, lítio e ferro), verificando, em níveis de intensidade do consumo energético, a seguinte ordem (do maior para o menor): cobre, ouro, minério de ferro magnetítico, níquel, minério de ferro hematítico e lítio. No que diz respeito à mineração de ferro, o autor identificou que, na extração de hematitas, o percentual de 90% do total do consumo energético era decorrente das atividades de lavra e o restante, no

beneficiamento de minério, ocasionando em um consumo específico de 0,15 GJ/t produzida (41,66 kWh/t). Por outro lado, nos minérios magnéticos, a partição energética se deu da seguinte forma: 41% nas atividades de lavra, 43% na cominuição e 16% em outros processos, representando um consumo específico na etapa de beneficiamento da ordem 0,30 GJ/t produzida (83,33 kWh/t), capitaneado principalmente pelas atividades de cominuição (moagem).

Especificamente no que se refere à análise energética do setor mineral de ferro, Norgate e Haque (2015) realizaram, por meio de informações obtidas na literatura e junto às companhias mineradoras australianas, a ACV relativa à extração de hematitas/goethitas. Contabilizando as etapas de transporte ferroviário e as operações portuárias, restou verificado que, para a produção de 1 tonelada de produto beneficiado, eram necessários 152,7 MJ (42,41 kWh). Deste total, o maior consumo era proveniente das atividades de carregamento e transporte na mina, respondendo por 60,3% do total. Insta ainda destacar que não havia, entre as empresas estudadas, operações vinculadas a moagem e concentração de minérios.

Por seu turno, Palamure (2016), neste mesmo país, realizou um estudo energético focado essencialmente no aspecto da eficiência energética e nas estimativas de emissões de GEE da mineração de ferro. Dos principais resultados da pesquisa, destacam-se:

- a) as empresas de grande porte (produção acima de 50 milhões de toneladas anuais-Mtpa) apresentaram consumos energéticos inferiores às empresas de médio (25 a 50 Mtpa) e pequeno (< 25 Mtpa) portes, o que pode ser explicado pelo efeito escala;
- b) os valores de consumo energético variaram de 10 a 65 kWh/t beneficiada;
- c) avaliação da influência de quatro variáveis (teor, REM, DMT e escala de produção) no consumo energético das minas, sendo verificado, por intermédio de uma análise de regressão multivariada, que a REM foi a variável que mais impactava no consumo energético;
- d) avaliação dos consumos energéticos das principais operações unitárias das empresas de médio e pequeno portes, sendo observado que os maiores consumos estavam relacionados às etapas de carregamento e de transporte na lavra.

No contexto nacional, Ferreira e Leite (2015) realizaram, por meio da mesma ferramenta utilizada por Norgate e Haque (2015), a análise do processo produtivo da empresa Samarco

S.A., instalada no QF. Na oportunidade, observaram, em relação aos indicadores energéticos da mina, que era necessário o consumo de 0,25 litros de óleo diesel em equipamentos de carregamento e transporte convencionais para o transporte de 1 tonelada de material (2,41 kWh/t) e 1,13 kWh/t em termos de energia elétrica, para a atividade de transporte de minério via transportadores de correia, método IPCC. Em relação ao beneficiamento do minério, restou comprovado a necessidade de 98,6 kWh em energia elétrica para produção de 1 tonelada de concentrado de minério de ferro. Cabe aqui destacar que, no contexto da empresa estudada, o produto é composto por 100% de *pellet feed*, o que significa a necessidade de múltiplas etapas de cominuição (moagem).

Jonusan (2017), utilizando o modelo *Energy and Power Evaluation Program* (ENPEP), realizou o estudo do planejamento energético do setor de mineração de ferro no estado de Minas Gerais considerando o horizonte 2014/2035, onde foram definidos dois cenários de produção máxima, sendo estes vinculados aos anos de 2023 e 2030. Estimou-se ainda que as melhores práticas de eficiência energética seriam alcançadas no ano de 2025. Cabe aqui destacar que o autor, em suas conclusões, observou o fato do então Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), antecessor da atual ANM, possuir informações relativas ao consumo de energia elétrica e óleo diesel, e não as disponibilizar à sociedade em função da falta de capacidade técnica e *déficit* de servidores.

Ao analisar a influência do desmonte de rochas em relação ao consumo energético do processo de moagem, Carlos (2017) verificou, no contexto do QF, consumo específico de energia elétrica da ordem de 37 kWh por tonelada produzida, e que este tinha um viés de alta, mesmo com a diminuição da produção, o que, *a priori*, pode significar ineficiência energética no processo produtivo e/ou características inerentes do minério beneficiado (tipologia). Fernandes e outros (2018), ao estudarem o consumo de óleo diesel em uma mina de ferro do norte do país, observaram, no ano de 2015, consumo específico da ordem de 0,31 litros/t transportada, valor este equivalente, em termos energéticos, a 11,05 kWh/t. Ademais, no período observado (2008 a 2015), deparou-se com aumento neste indicador da ordem de 40%, ocasionando, por conseguinte, no incremento dos custos operacionais.

Ainda nesta esteira, Vasconcelos (2020) realizou, a partir de dados obtidos junto à ANM, o comparativo do consumo energético de uma empresa mineradora que possui atividades de

mineração tanto no QF quanto no Complexo de Carajás. Dentre as principais verificações/conclusões apontadas em seu trabalho, destacam-se:

- a) o trabalho verificou o consumo energético das atividades de mineração no período de 2010 a 2019, analisando o consumo de explosivos, óleo diesel e energia elétrica;
- b) do ponto de vista energético, as atividades em Carajás têm como principal insumo energético o óleo diesel, enquanto no QF têm maior dependência da energia elétrica;
- c) no QF, o consumo específico de energia elétrica por tonelada beneficiada foi muito superior ao verificado no Complexo de Carajás, o que pode ser explicado pela tipologia do minério;
- d) observou-se um aumento no consumo específico de energia elétrica no QF, em sentido oposto ao encontrado em Carajás;
- e) em termos de indicadores de consumo de óleo diesel por tonelada de ROM transportada, não foram verificadas grandes diferenças entre os dois complexos mineradores.

2.7 Indicadores de Desempenho Energético

Eficiência energética pode ser definida como “a relação entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem-produzido ou serviço realizado” (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2010, p. 4). Por seu turno, a *International Energy Agency* (IEA) destaca que eficiência energética é “usar menos energia para fornecer o mesmo serviço” (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014, p. 17, tradução nossa). Para Salazar (2019), a definição de eficiência energética estaria relacionada à produção de um determinado produto e/ou serviço pela menor quantidade de energia possível ou, ainda, a produção de uma maior quantidade de produto ou serviço com a mesma quantidade de energia esperada. Por fim, a ABNT NBR ISO 50001:2018 entende eficiência energética como sendo a razão, ou outra relação quantitativa, entre uma saída de desempenho e uma entrada de energia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

Por sua vez, Almeida (2019) destaca que os indicadores de energia se constituem em uma ferramenta importante para análise das interações existentes entre as atividades econômicas e humanas, o consumo de energia e as emissões de GEE. A mensuração da eficiência energética pode ser realizada por meio de diversas formas, sejam estas, função de equipamentos,

processos, tecnologias ou serviços. Contudo, de uma forma geral, os indicadores de eficiência energética são apresentados como a razão entre o consumo energético e dados de uma determinada atividade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014; SALAZAR, 2019).

Ainda neste assunto, Tavares e Monteiro (2014) asseveram que indicadores de eficiência energética têm papel fundamental no processo de tomada de decisões, auxiliando na definição de direcionamento de mudança de consumo energético, no estabelecimento de políticas de eficiência energética e na avaliação de metas para políticas ambientais voltadas à redução de GEE, dentre outros. Souza (2013) destaca que intensidade energética e eficiência energética são dois conhecidos indicadores utilizados para a determinação da relação de causalidade entre consumo de energia e desenvolvimento, sendo frequentemente medidos em termos de indicadores termodinâmicos, físicos e econômicos. Já Salazar (2021) define consumo específico de energia como a razão entre o consumo de energia de forma agregada e a produção física de um determinado segmento, e a intensidade energética como o inverso da eficiência energética, sendo utilizada como o principal indicador para mensurar a eficiência no Brasil.

Não obstante ao anteriormente elencado, insta destacar que os níveis de atividade, estrutura do setor e eficiência energética são determinantes no consumo energético de processos industriais, de tal sorte que as modificações de padrões da utilização da energia não estão exclusivamente relacionadas à eficiência energética (TAVARES; MONTEIRO, 2013; SALAZAR, 2021). Neste contexto, o efeito estrutura estaria associado à relação entre setores energointensivos e suas participações no produto industrial, e o efeito atividade indicaria a variação do consumo da energia na indústria decorrente das oscilações de produção (SALAZAR, 2021).

Em relação ao estudo proposto neste trabalho, verifica-se que os principais indicadores para medição de desempenho energético empregados para avaliação da mineração relacionam o consumo energético com a movimentação de materiais provenientes da lavra (MJ/t, kWh/t e etc.) e, no beneficiamento, à quantidade produzida e/ou alimentada na planta. Sob esta questão, a *Natural Resources Canada* realizou a conversão dos principais insumos energéticos de uso na mineração em unidade energética quilowatt-hora, e propôs a criação de dois indicadores de consumo específico, um relacionando a quantidade de energia utilizada na mina à quantidade de ROM, e outro referente à quantidade de energia consumida no beneficiamento em relação à quantidade de material beneficiado (NATURAL RESOURCES CANADA, 2005). Por sua vez,

o *US Department of Energy* propôs indicadores que relacionavam o consumo energético do setor mineral, em *british thermal unit* (BTU), ao produto beneficiado (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2007). Norgate e Haque (2010), por seu turno, lançaram mão da mesma metodologia do *US Department of Energy* (2007). Katta, Davis e Kumar (2020a) com a mesma metodologia proposta por Natural Resources Canada (2005), calcularam indicadores, diferenciando-se da primeira, na unidade energética utilizada, a saber, megajoule. Palamure (2016) utilizou como indicador, a razão entre a quantidade de energia, em quilowatt-hora, e a quantidade de material beneficiado.

No contexto nacional, Ferreira e Leite (2015) aplicaram o indicador que levava em consideração o consumo da energia total em relação ao produto beneficiado. Vasconcelos, Jesus e Santos (2020) recorreram a indicadores que correlacionavam a quantidade de energia, em quilowatt-hora, em relação ao ROM (lavra) e ao produto beneficiado. Ademais, Curi e outros (2014) e Fernandes e outros (2017) empregaram como indicadores energéticos tão somente o consumo de diesel (em unidades volumétricas) em relação à quantidade total de material transportado na mina.

2.8 Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O *IPCC Guidelines*, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, utiliza, para contabilização das estimativas de emissões de GEE, para fins metodológicos, os setores de energia, processos industriais e usos de produtos (IPPU, do inglês *Industrial Processes and Product Use*), agropecuária, uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF, do inglês *Land Use, Land-Use Change and Forestry*) e resíduos. Por sua vez, as emissões de GEE do setor de energia, considera a produção, transformação, transporte e consumo de energia, estando estas divididas em dois subsetores: emissões por queima de combustíveis e emissões fugitivas (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2022).

Para a realização da contabilização das emissões de GEE em inventários organizacionais, utiliza-se, de forma geral, duas abordagens. A primeira está relacionada ao limite organizacional, que considera a participação de capital ou os controles operacionais/financeiros. A segunda tem como referência o limite operacional, no qual foram

estabelecidos três escopos, sendo o escopo 1 vinculado às emissões diretas geradas a partir de fontes pertencentes ou controladas por uma determinada organização; e os escopos 2 e 3 denotam as emissões indiretas, quando estas são decorrentes de fontes pertencentes ou controlados por outras empresas. Neste sentido, o escopo 2 restringe-se às emissões de GEE por uso de energia elétrica (aquisição), e o restante é arrolada ao escopo 3 (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2014).

No contexto da indústria mineral, em particular o setor de mineração de ferro, Liu e outros (2021) verificaram que 50% das emissões de GEE são decorrentes das atividades de carregamento e transporte, valor este idêntico ao verificado por Norgate e Haque (2010). Palamure (2017) verificou que esta mesma etapa era responsável por 64% dos GEE emitidos, e que esta proporção variava de acordo com o porte das minas. Em empresas de pequeno porte, o percentual era de 75%, e, nas empresas de médio porte, o percentual de 50%. *A priori*, tal situação deriva da extensiva utilização de combustíveis fósseis como principal insumo energético desta operação unitária (SOOFASTAEI *et al.*, 2018). Outro fator que merece atenção na questão das emissões de GEE na mineração diz respeito às emissões fugitivas de gás metano da atividade extrativa de carvão mineral, que pode representar valores de até 78% da totalidade das emissões do setor mineral (DELEVINGNE, 2020).

Azadi e outros (2020) destacam a existência de quatro caminhos a serem trilhados para a implementação de ações mitigatórias das mudanças climáticas devido à mineração, sendo estes: redução das emissões fugitiva, eficiência na conversão dos recursos minerais, eficiência energética e soluções biológicas. Ainda nesta linha, e objetivando a estimativas de GEE no setor de mineração de ferro, Palácios (2012) propôs uma equação exponencial com o objetivo da previsão das emissões de GEE da mineração de ferro, em termos de kgCO_2/t , a partir do teor de ferro das jazidas.

Analisando as estimativas de emissões de GEE na mineração de ferro brasileira, o IBRAM chegou às seguintes conclusões (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2014):

- a) estimativas de emissões de GEE em 2011 da ordem de 1,5 milhões de tCO_2e ;
- b) aumento de 7,4% na estimativa das emissões de GEE no período compreendido entre 2008 e 2011;

- c) excetuado o setor de pelotização, a mineração de ferro foi a que mais contribuiu para as emissões de GEE no ano de 2011, tendo sido responsável por 30,3% do setor mineral;
- d) a maior parte das emissões são provenientes do escopo 1, especificamente emissões por combustão, alcançando percentuais da ordem de 86,33%.

Dento deste contexto, e considerando dados do antigo DNPM e do inventário de emissões de GEE do IBRAM, o MME, utilizando o índice de emissão de 3,09 kgCO₂e/t_{ROM} para o minério de ferro, estimou emissões da ordem de 3,1 milhões de toneladas de CO₂e para o ano de 2020 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013). Em relação às emissões por tonelada beneficiada produzida, chegou-se ao valor de 21,3 kgCO₂e/t (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, 2017). O MME, por sua vez, descreve oito fatores que interferem diretamente nas emissões de GEE, a saber (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013):

- a) tipologia de minério;
- b) teor de minério;
- c) REM;
- d) distância média de transporte;
- e) recuperação mássica do beneficiamento;
- f) eficiência energética;
- g) conhecimento das reservas minerais; e
- h) produtividade do processo.

Por fim, e não menos importante, o então Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTI), através da desagregação parcial dos dados de consumo energético divulgados no BEN, realizou a estimativa do abatimento das emissões de GEE em três cenários distintos: o cenário de referência, o de baixo carbono e o de baixo carbono com inovações. Como resultado, verificou-se o potencial de abatimento de GEE em 2050 de até 17%, adotando-se ações de baixo carbono com inovações em processos produtivos (MINERAÇÃO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES, 2017).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa realizada no presente trabalho, segundo a classificação de Prodanov e Freitas (2013), pode ser considerada de natureza aplicada e, em seus objetivos, definida como pesquisa descritiva. Gil (2017) assevera que as pesquisas descritivas têm como objetivo a descrição das características de um fenômeno ou população e, a partir de então, busca-se o estabelecimento de correlações entre variáveis.

Quanto aos procedimentos a pesquisa pode ser tipificada como documental. Todavia, a pesquisa bibliográfica exploratória foi de fundamental importância para a construção das bases teóricas que nortearam o entendimento mais aprofundado do tema da energia no contexto do setor mineral. A este respeito, cabe destacar que a pesquisa documental se difere da pesquisa bibliográfica. Enquanto a primeira preza pela consulta de fontes primárias, a segunda utiliza-se da contribuição de diversos autores sobre um determinado assunto (GIL, 2017).

A abordagem deste trabalho, segundo classificação de Prodanov e Freitas (2013), pode ser caracterizada como quantitativa, uma vez que as análises das informações foram realizadas a partir de dados quantificáveis. Ainda sobre o delineamento da pesquisa, insta destacar que o escopo do estudo relacionado à mineração de ferro ficou restrito às etapas de extração (lavra) e beneficiamento de minério, não fazendo parte, por questões relacionadas à falta de dados, a análise das etapas de transporte de minério (mineroduto ou transporte ferroviário) e processos de aglomeração de finos (sinterização e pelletização).

3.1 Revisão Bibliográfica

O processo de revisão bibliográfica foi realizado de forma sistemática a partir da utilização da plataforma Capes e do *Google Scholar*. Por meio da primeira, foram pesquisadas as principais bases do conhecimento do portal, como, por exemplo, o *Web of Science*, o *Scopus* e o *Scielo*, dentre outras. De forma geral, as pesquisas utilizaram alguns descritores chaves, tais como: *energy efficiency*, *mining industry energy consumption*, *iron ore mining*, *energy comminution* e *ghg iron ore*, dentre outros, que propiciaram acesso a diversos artigos publicados nos principais periódicos sobre o tema do presente trabalho. Por sua vez, a pesquisa realizada na plataforma do *Google Scholar*, além de artigos publicados em periódicos, trouxe como

resultado trabalhos de conclusão de cursos de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado das principais universidades do mundo, que também abordaram, mesmo que de forma indireta, o assunto descrito no presente trabalho.

O resultado da revisão bibliográfica possibilitou a construção da base teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Além da identificação das principais operações unitárias de uma mineração de ferro, foi possível verificar como estas se correlacionavam com a temática energética. Ademais, tornou-se factível a identificação dos indicadores de desempenho energético utilizados em países produtores da *commodity*, propiciando assim uma base para construção e a possibilidade da comparação com os resultados obtidos no presente trabalho.

3.2 Coleta de Dados

A fonte primária do presente trabalho constituiu-se dos dados declarados pelas empresas mineradoras do setor extrativo de ferro do Brasil à ANM, por intermédio do Relatório Anual de Lavra (RAL). A este respeito, é salutar informar que o RAL se trata de uma obrigatoriedade legal prevista no inciso XVI do art. 47 do Decreto Lei nº 227, de 28/02/1967 (Código de Mineração), e seu correspondente inciso XVII, art. 34 do Decreto 9.406, de 12/06/2018 (Regulamento do Código de Mineração). O objetivo principal do RAL é ser a fonte primária das informações relativas à produção mineral brasileira, que são utilizadas na elaboração dos estudos oficiais do setor mineral brasileiro. Como exemplos, podem ser citados o Anuário Mineral Brasileiro, os Sumários Minerais Brasileiros e os Informes Minerais, dentre outros documentos de caráter institucional da ANM. Além de ser fonte para a construção dos referidos documentos, a análise das informações obtidas por meio do RAL permite à ANM nortear as suas ações de política regulatória do setor mineral, bem como subsidiar as atividades de fiscalização e auditoria do recolhimento da CFEM.

Além da produção mineral, é solicitado às empresas mineradoras a declaração de informações relacionadas ao empreendimento mineral, como, por exemplo: caracterização legal e operacional das atividades, número de trabalhadores do empreendimento, número de acidentes durante o ano, descrição dos principais equipamentos de mina/beneficiamento, investimentos, estoques, REM, caracterização da quantidade e forma de disposição de rejeitos, consumo dos principais insumos energéticos e água e etc.

Apesar do RAL possuir dados de consumo de diversos insumos energéticos utilizados na mineração, tal como querosene, gasolina e explosivos, dentre outros, a coleta dos dados do presente trabalho teve como foco o consumo de eletricidade e de óleo diesel, uma vez que:

- a) a eletricidade e o óleo diesel são aos principais insumos energéticos utilizados na extração e beneficiamento de minério de ferro (INSTITUTO BRASILEIRO DA MINERAÇÃO, 2014; MIRANDA *et al.*, 2016; CARLOS, 2017; AZADI *et al.*, 2020; VASCONCELOS; JESUS; SANTOS., 2021);
- b) os explosivos e a gasolina, importantes fontes energéticas na mineração, foram, segundo Vasconcelos, Jesus e Santos (2021), foram responsáveis por menos de 1% de toda a energia consumida por uma empresa de mineração em suas atividades de lavra no QF no período de 2010 a 2019;
- c) por vezes, o setor regulado deixa de declarar no RAL o consumo de outras fontes energéticas, como, por exemplo, gasolina e explosivos, dentre outros.

Por ter um foco essencialmente voltado à produção mineral, os dados relativos aos insumos energéticos anteriormente destacados não estavam disponíveis de forma estruturada nos bancos de dados próprios da ANM. Por consequência, a coleta das informações necessárias a elaboração do trabalho foi realizada de forma manual a partir do próprio aplicativo RalWeb³. Cabe destacar que este último é estruturado sob a forma de telas, ficando a parte do consumo de energia elétrica inserida na tela denominada “Matriz Energética”, e o consumo de óleo diesel, na tela “Insumos”, conforme pode ser verificado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Tela “Matriz Energética”

	Ano-Base
Balanco de Energia - Consumo kWh/ano	2016
A partir de geração própria	13.687.440,00
A partir da aquisição de terceiros	2.331.674,00
Total:	16.019.114,00

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

³ Aplicativo desenvolvido para que o setor regulado apresente junto à ANM as informações relativas à produção mineral.

Figura 7 – Tela dos insumos utilizados na mineração

Cabo de Aço (m)	308,00
Cabo Elétrico (m)	2.237,00
Diesel (litro)	14.466.073,00
Espoleta Elétrica de Retardo (uni)	3.783,00
Espoleta Não Elétrica de Retardo (uni)	9.117,00
Explosivos (kg)	98.347,00
Explosivos Encartuchados (kg)	41.663,00
Gasolina (litro)	99.661,00
Iniciador (uni)	3.616,00
Manta de correia transportadora (m)	7.314,00
Pneus (uni)	35,00
Tirante (uni)	260,00
Roletes para correia transportadora (uni)	2.465,00
Dentes p/ escavadeira / pá carreadeira	66,00

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Por outro lado, os dados relativos à produção bruta da mina (ROM), ao teor de ferro do ROM, à alimentação das usinas de beneficiamento, à produção beneficiada por tipos de produto (*sinter feed*, *pellet feed* e granulado), ao município e ao nome da mina encontravam-se apresentados de forma estruturada, sendo possível a sua obtenção a partir da utilização de planilhas dinâmicas disponibilizadas internamente pela ANM. Deste modo, para um melhor entendimento do processo de coleta, destaca-se no Quadro 3 os dados do RAL que foram utilizados no presente trabalho, a sua localização dentro da estrutura do aplicativo e sua forma de coleta.

Quadro 3 – Resumo dos dados e métodos de coleta utilizados para o desenvolvimento do projeto

FASE	TELA	DADOS	COLETA
Lavra	Dados Básicos da Mina	Nome da mina e localização	Automatizada
		Início das operações	Manual
		Relação estéril–minério	Manual
	Movimentação da Produção Bruta	Produção (t) e Teor (%)	Automatizada
	Pilhas de Rejeitos/Estéril	Geração de estéril (t)	Manual
Beneficiamento	Dados Básicos da Usina	Operações unitárias	Manual
	Alimentação e Balanço de Massa da Usina	Alimentação (t)	Automatizada
		Mina origem da alimentação	Manual
Movimentação da Produção Beneficiada	Produção beneficiada por produtos (t)	Automatizada	
Lavra e Beneficiamento	Insumos	Óleo diesel (litros)	Manual
	Matriz Energética (energia elétrica)	Consumo (kWh) e origem da matriz energética	Manual

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Cabe destacar que a apresentação do RAL é realizada através do número de inscrição no Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas (CNPJ) junto à Receita Federal (matriz ou filial). Por outro lado, a declaração dos dados é feita por minas e unidades de beneficiamento. Assim, se uma determinada empresa possuir mais de uma mina ou unidade de beneficiamento, ela fará a apresentação dos dados das minas/unidades de beneficiamento de forma individualizada, mas dentro de um único RAL. Insta informar que uma unidade de beneficiamento pode estar relacionada a uma ou mais minas, estando a vinculação condicionada à sua alimentação de minérios em um determinado ano-base, conforme se verifica na Figura 8.

Figura 8 – Relação entre as unidades de beneficiamento e as minas no RalWeb

Usina Destino	Origem
Usina Cauê	Minas de Itabira
Usina Conceição I	Minas de Itabira
Usina Conceição II	Minas de Itabira
Água Limpa	Água Limpa
Água Limpa	Água Limpa
Água Limpa	Água Limpa

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Especificamente sobre o assunto explanado, é salutar destacar que, em função dos dados de uma determinada mina poderem compreender a alimentação de mais de uma usina de beneficiamento, e/ou a declaração dos insumos energéticos (óleo diesel e energia elétrica) estarem vinculadas a mais de uma mina e/ou unidade de beneficiamento, a coleta foi realizada, em alguns casos, de forma agregada, denominada, no presente trabalho, de complexo minerador. Contudo, e para fins de padronização, independentemente de os dados serem agregados ou não, convencionou-se adotar o termo complexo minerador para todos os indivíduos da pesquisa.

Apesar da ANM possuir dados deste o ano de 2001, o período de 2011 a 2020 foi definido em função da existência dos dados estarem minimamente semiestruturados, uma vez que, apenas em 2011, do ano-base de 2010, o aplicativo do RAL foi organizado para disponibilização via *web*. Anteriormente, o processo era similar às declarações anuais de imposto de renda realizadas pela Receita Federal, onde, para cada ano, existia uma versão do aplicativo que era “baixado” pelo setor regulado. Não obstante ao destacado, a análise de uma década é bastante representativa, e mesmo tendo havido a pandemia do COVID-19 a partir de março de 2020, a produção de minério de ferro não restou tão prejudicada como outros setores da economia (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023c).

Cabe ainda destacar que foram coletados tão somente dados de minas/complexos mineradores que apresentaram produção bruta (ROM) igual ou superior a 1.000 toneladas em um determinado ano-base. Por outro lado, e em face da existência de sigilo empresarial, as minas/complexos mineradores foram identificadas no presente trabalho por indicadores alfanuméricos. No tocante a este assunto, ressalta-se que para fins do presente trabalho, houve a autorização, por parte da então Gerência de Economia Mineral da Superintendência de Regulação e Governança Regulatória da ANM, por intermédio do processo SEI nº 48076.000350/2021–51⁴, para uso dos dados do RAL para fins acadêmicos (ANEXO A), condicionada ao cumprimento da legislação vigente que versa sobre o sigilo de informações, principalmente no que refere à divulgação de forma individualizada que permita a identificação dos nomes das minas/complexos mineradores, de empresas e de informações da produção mineral de forma desagregada.

3.3 Análise dos Dados

Os dados obtidos na etapa de coleta foram organizados por meio de planilhas eletrônicas, tendo como parâmetro agregador o atributo mina/complexo minerador. Assim, as “linhas” foram relacionadas a um determinado ano-base, o que facilitou a realização dos cálculos dos indicadores de consumos energéticos específicos.

⁴ O acesso ao processo pode ser realizado através do endereço https://sei.anm.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_processo_pesquisar.php?acao_externa=protocolo_pesquisar&acao_origem_externa=protocolo_pesquisar&id_orgao_acesso_externo=0

Inicialmente, com os dados de consumo de óleo diesel (litros) e de energia elétrica (kWh), foi possível determinar o consumo energético total do setor mineral de ferro, para cada ano-base, em unidades energéticas que, no presente trabalho, foram gigawatt-hora (GWh) e petajoule (PJ). Neste ponto, é importante destacar que, para a transformação do consumo de óleo diesel de unidade volumétrica para unidade de energia foi utilizado o fator de conversão descrito pela EPE, no qual 1 litro de óleo diesel equivale, em termos energéticos, a 9,86 kWh ou 35,50 gigajoule (GJ) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). De posse destas informações, foram realizadas as seguintes análises:

- a) averiguação do consumo energético de forma anual e sua evolução ao longo do período do estudo;
- b) em termos da eletricidade, verificação da relação percentual entre energia própria e adquirida de terceiros, bem como seu comportamento no período estudado;
- c) estimativas, em termos percentuais, da energia consumida pelo setor de mineração de ferro em relação ao setor agregado “mineração e pelletização” divulgado pela EPE no BEN, ou mesmo em relação à estimativa desagregada do setor de mineração, obtida a partir do BEN; e
- d) desagregação do consumo energético da mineração de ferro, entre as etapas de lavra e beneficiamento, considerando as premissas destacadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2017) e por Jonusan (2017), de que todo o consumo de óleo diesel ocorre na extração (lavra) e o uso da eletricidade compartilhado entre as etapas de lavra, beneficiamento e outras operações, nos percentuais de 9,2%, 88,8% e 2,0%, respectivamente.

Cabe ainda destacar que, em algumas ocasiões, os dados declarados pelas empresas apresentaram algum tipo de “erro material”, muitas das vezes derivados da falha na conversão de unidades, situação em que os dados primários foram corrigidos com a multiplicação por 10. Esta correção só foi realizada quando verificado que, de fato, o erro foi ocasionado quando de transformações de unidades convencionadas pela ANM, a saber, diesel em litros, e energia elétrica em kWh. A análise mencionada restou elaborada a partir da comparação dos dados de um determinado ano com aqueles de anos anteriores e posteriores, bem como a partir dos valores dos indicadores de desempenho energético.

Além da obtenção do consumo energético do setor mineral brasileiro, foi possível, a partir dos dados coletados, e com base na literatura, a determinação de indicadores de desempenho energéticos, referentes a cada complexo minerador i no ano-base j , definidos da seguinte forma:

- a) Consumo de diesel por tonelada ROM movimentada (Ce_{diesel}), em l/t_{ROM} : foram considerados os volumes produzidos na lavra (em toneladas), a saber, a produção bruta (ROM) e a quantidade de óleo diesel consumido (dc), em litros, definido pela equação (1).

$$Ce_{ij(diesel)} = \frac{dc}{ROM} \quad (1)$$

- b) Consumo energético específico por tonelada ROM movimentada (Ce_{lavra}), em kWh/t_{ROM} : utilizou-se os volumes produzidos na lavra (em toneladas), a saber, a produção bruta (ROM), a quantidade de óleo diesel consumido (dc), em litros, e o consumo de energia elétrica declarado na matriz energética (me), em kWh, definido pela equação (2).

$$Ce_{ij(lavra)} = \frac{(dc \times 9,86) + (0,092 \times me)}{(ROM)} \quad (2)$$

- c) Consumo energético específico por tonelada de minério produzida no beneficiamento ($Ce_{beneficiamento}$), em $kWh/t_{(produzida)}$: levou em consideração as informações do consumo de energia elétrica declarada na matriz energética (me), em kWh, e o somatório dos produtos beneficiados (pb), em toneladas, conforme equação (3).

$$Ce_{ij(beneficiamento)} = \frac{0,888 \times me}{pb} \quad (3)$$

- d) Consumo energético específico total para a produção de 1 tonelada beneficiada (Ce_{total}), em $kWh/t_{(produzida)}$: utilizou-se, em termos energéticos, o óleo diesel consumido (dc) e a energia elétrica declarada na matriz energética (me), bem como

a quantidade de material produzido no beneficiamento (pb), nos termos da equação (4).

$$Ce_{ij(total)} = \frac{(dc \times 9,86) + me}{pb} \quad (4)$$

As constantes 0,092 e 0,888, utilizadas como fator multiplicativo no valor da energia elétrica declarada, referem-se à partição da eletricidade entre as etapas de lavra e beneficiamento, conforme Jonusan (2017); e o fator 9,86, como dito anteriormente, para conversão do diesel de unidade volumétrica para unidade de energia, em kWh.

No caso da desconsideração ou não apresentação dos dados de um determinado complexo minerador i , no ano-base j , o procedimento adotado foi:

- a) na falta da declaração ou desconsideração dos dados do consumo de óleo diesel, os indicadores Ce_{lavra} , Ce_{diesel} e Ce_{total} não foram calculados, oportunidade em que houve o cálculo do $Ce_{beneficiamento}$;
- b) na inexistência ou não utilização dos dados da matriz energética, os indicadores $Ce_{beneficiamento}$ e Ce_{total} deixaram de ser calculados, e os indicadores Ce_{lavra} e Ce_{diesel} foram calculados a partir das informações do consumo de óleo diesel;
- c) em situações em que não houve o beneficiamento de minérios, foi calculado tão somente os indicadores Ce_{lavra} e Ce_{diesel} .

Salienta-se que, em função de valores discrepantes dos indicadores em determinados anos em comparação aos anos anteriores, causados por motivos diversos, ou mesmo conhecidos (início/reinício das atividades de lavra de um determinado complexo, ou situações decorrentes de acidentes, como ocorridas nos anos de 2015 e 2019), fizeram com que estes fossem desconsiderados. Por outro lado, os valores relativos ao consumo energético foram mantidos no trabalho.

Destacados os fatos supramencionados, foi possível ainda a elaboração dos indicadores Ce_{diesel} , Ce_{lavra} , $Ce_{beneficiamento}$ e Ce_{total} para o setor mineral, em um determinado ano base (j), calculados a partir da ponderação dos indicadores individuais por complexo minerador com os volumes transportados (ROM) ou produção beneficiada, definidos segundo as equações (5) a (8).

$$C_{e_j \text{ diesel}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{e_{ij} \text{ diesel}} \times ROM_{ij}}{\sum ROM_j} \quad (5)$$

$$C_{e_j \text{ lavra}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{e_{ij} \text{ lavra}} \times (ROM)_{IJ}}{\sum (ROM)_j} \quad (6)$$

$$C_{e_j \text{ beneficiamento}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{e_{ij} \text{ beneficiamento}} \times pb_{ij}}{\sum pb_j} \quad (7)$$

$$C_{e_j \text{ total}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{e_{ij} \text{ total}} \times pb_{ij}}{\sum pb_j} \quad (8)$$

A partir dos cálculos anteriormente destacados, foi possível avaliar a evolução dos indicadores de desempenho energético no período do estudo. Além disto, e considerando outras informações obtidas na fase de coleta, fez-se a avaliação das seguintes situações:

- a) comportamento do indicador $C_{e_{beneficiamento}}$ em função da rota de processo (existência de moagem);
- b) comportamento do indicador $C_{e_{diesel}}$ em função do porte do empreendimento; e
- c) comportamento do indicador $C_{e_{total}}$ em função dos teores de ferro das jazidas.

Ademais, a definição do porte do complexo mineirador foi determinada a partir da sua produção ROM em um ano-base específico, utilizando-se a definição da ANM de que:

- a) grande: acima de 1.000.000 toneladas;
- b) média: acima de 100.000 e até 1.000.000 toneladas; e
- c) pequena: abaixo de 100.000 toneladas (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023d).

Para fins de comparação com as informações obtidas a partir dos dados da ANM, realizou-se a desagregação dos insumos energéticos, obtidos por meio do BEN, entre os setores mineração e pelotização, a partir da adoção das seguintes premissas:

- a) os insumos energéticos diesel e biodiesel foram alocados para o setor de mineração, especificamente para a fase de lavra, consoante ao verificado em Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2017);

- b) a energia elétrica foi alocada na lavra, beneficiamento e outros usos (mineração) e no setor de pelotização. Para o cálculo do percentual pertinente ao setor de mineração, foi utilizada a média aritmética de todos os estudos do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), a saber, 78,93% (LUZ; LINS, 2010, 2018). Em consequência, foi destinado o percentual de 21,07% para o setor de pelotização. Ademais, do percentual da energia elétrica da mineração, houve a sua divisão entre lavra, beneficiamento e outros, seguindo a premissa desenvolvida por Jonusan (2017);
- c) o restante dos insumos energéticos destacados no BEN, a saber, eletricidade (parte), óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene, carvão vegetal e coque de petróleo foram direcionados para o setor de pelotização (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, 2017).

Por fim, as análises estatísticas descritivas, testes de normalidade, elaboração de gráficos *boxplot* e análises de inferências estatísticas foram realizadas com a utilização do *software* gratuito JAMOVI.

Não obstante aos fatos anteriormente explanados, foi possível estimar as emissões de GEE da mineração de ferro relacionadas ao consumo de energia, e sua evolução ao longo do período de estudo, bem como a divisão destas nos escopos 1 e 2. Para os cálculos das estimativas de GEE foi utilizada a abordagem *bottom-up*, que leva em consideração o consumo energético de cada setor e das características dos combustíveis utilizados (MFUMU, 2021). Os fatores de emissões considerados para os cálculos do escopo 1 e escopo 2 encontram-se destacados no Quadro 4.

Quadro 4 – Fatores de emissões empregados para as estimativas de GEE no setor de minério de ferro

ESCOPO	FONTE ENERGÉTICA	FATORES DE EMISSÃO	FONTE
Escopo 1	Energia elétrica (geração própria)	16 gCO ₂ e/kWh (eólica) 86 gCO ₂ e/kWh (hidrelétrica)	Miranda (2012)
	Óleo Diesel	2,64 kgCO ₂ e/litro	Intergovernmental Panel on Climate Change (2006)
Escopo 2	Energia elétrica (aquisição de terceiros)	2011 (29,2*); 2012 (63,4); 2013 (96); 2014 (135,5); 2015 (124,4); 2016 (81,7); 2017 (92,7); 2018 (74); 2019 (75) e 2020 (61,7) *Todos os dados em gCO ₂ e/kWh	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo dos indicadores de emissões de CO₂e, por tonelada ROM e por tonelada beneficiada, foram realizados a partir das equações destacadas em (9) e (10).

$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ e por tonelada ROM} = \frac{\sum \text{estimativas de GEE (tCO}_2\text{e)}}{\sum \text{produção bruta (ROM) (toneladas)}} \quad (9)$$

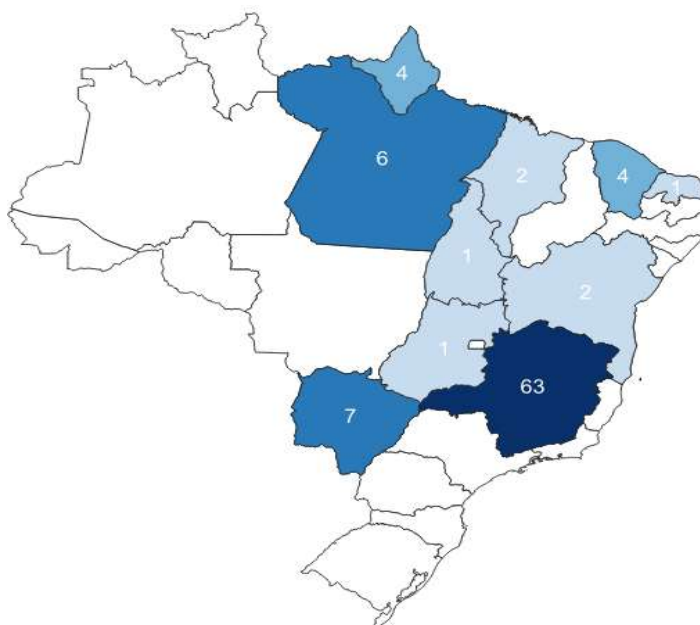
$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ e por tonelada beneficiada} = \frac{\sum \text{estimativas de GEE (tCO}_2\text{e)}}{\sum \text{produção beneficiada (toneladas)}} \quad (10)$$

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 Caracterização Geral dos Dados Coletados

A partir da autorização da ANM, foi possível, através do processo de coleta de dados, obter informações de 91 (noventa e um) complexos mineradores diferentes que tiveram produção mineral acima de 1.000 toneladas/ano em pelo menos um dos anos no horizonte temporal estabelecido na presente pesquisa. Cabe aqui destacar, conforme informado na seção referente aos procedimentos metodológicos, que houve, em alguns casos, a agregação de algumas minas em complexos mineradores, facilitando sobremaneira a análise dos dados, principalmente para fins da definição dos indicadores de desempenho energético. Desta feita, conforme destacado na Figura 9, os complexos mineradores se distribuem em 10 unidades federativas distintas, com a grande maioria destes inseridos nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, responsáveis pela maior parte da produção brasileira de minério de ferro (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023c). Ainda nesta linha, informa-se que o complexo minerador instalado no estado de São Paulo não foi considerado neste trabalho, mesmo tendo produção de minério de ferro, uma vez que este é derivada do processo de beneficiamento do fosfato.

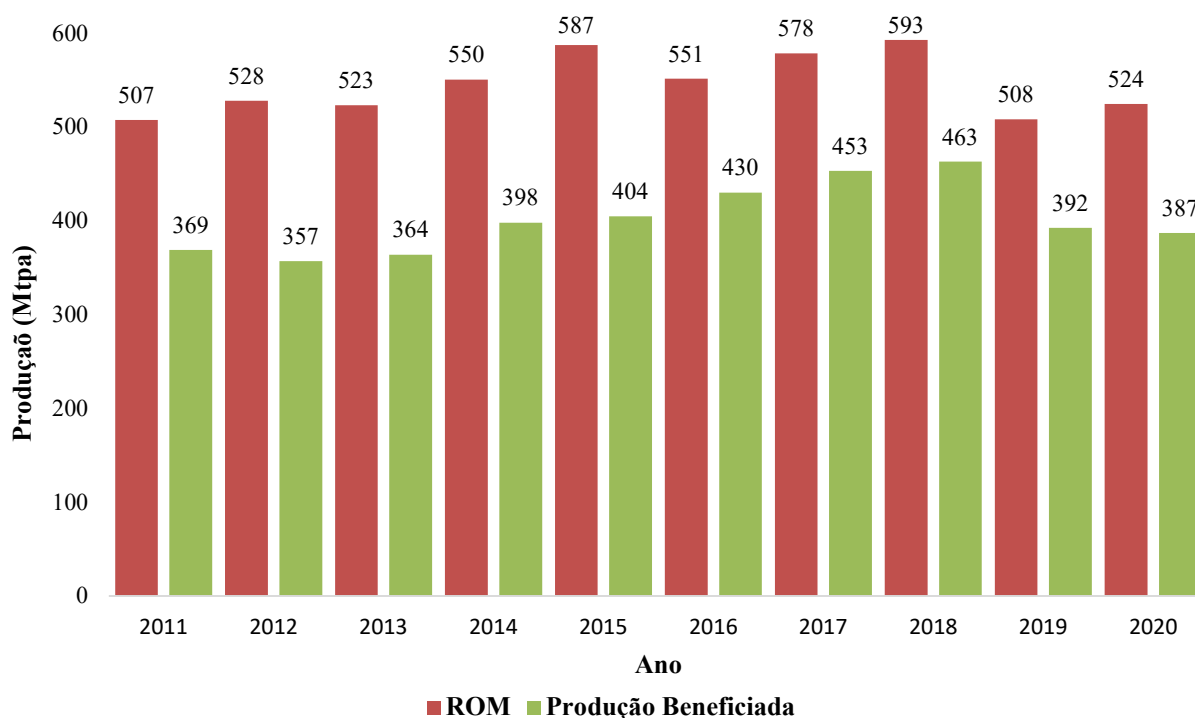
Figura 9 – Distribuição dos empreendimentos mineradores de extração de ferro entre as unidades federativas do Brasil



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).
Nota: Elaborado pelo autor.

Em relação às produções minerais dos complexos mineradores em que foram realizadas as coletas dos dados, verifica-se que, em comparação às informações constantes no Anuário Mineral Brasileiro, eles representam, no período de estudo, o percentual de 99,32% do ROM produzido e 96,61% do produto beneficiado. Assim, e para melhor entendimento da questão, encontra-se destacado na Figura 10 a produção mineral (ROM e produção beneficiada) dos empreendimentos mineradores onde houve a coleta dos dados. A partir da análise dos mesmos, é possível observar uma redução na produção ROM e beneficiada, a partir do ano de 2018, provavelmente afetada pelo rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho e pela pandemia da COVID-2019 iniciada no ano de 2020.

Figura 10 – Dados da produção mineral (ROM e produção beneficiada dos complexos mineradores que tiveram seus dados coletados junto à ANM), em milhões de toneladas por ano (Mtpa)



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Cabe destacar, conforme indicado na seção de procedimentos metodológicos, que em algumas situações as empresas do setor mineral deixaram de declarar à ANM as informações da quantidade de diesel ou de energia elétrica utilizada em suas atividades de lavra em um determinado complexo mineradores em um dos anos da pesquisa. Neste contexto, encontra-se

destacado na Tabela 1 a quantidade dos complexos mineradores operacionalizados em cada um dos anos do estudo, bem como a quantidade dos que declararam a informação do consumo de diesel e da energia elétrica. Consta, ainda, o percentual do ROM relacionado às empresas que informaram a quantidade de diesel utilizada, bem como o percentual do total beneficiado das empresas que declararam a energia elétrica no RAL, sempre em relação ao total. Assim, e da leitura dos dados apresentados, verifica-se que, em todos os anos do presente estudo, as unidades mineiras que apresentaram a informação dos principais insumos energéticos na mineração de ferro foram responsáveis por percentuais acima de 78%, no caso da declaração de diesel em determinado ano, e acima de 99%, no que refere à declaração de energia elétrica quanto à produção beneficiada, garantindo à presente pesquisa uma adequada representatividade do setor.

Tabela 1 – Quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento que estiveram em operação em relação à quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento que apresentaram as informações de consumo de diesel e energia elétrica

Ano	Complexos mineradores em operação	Complexos que declararam óleo diesel (% ROM)	Unidades de beneficiamento em operação	Unidades de beneficiamento que declararam energia elétrica (% de produção beneficiada)
2011	54	47 (90,19%)	45	45 (100%)
2012	56	44 (78,52%)	45	43 (99,59%)
2013	55	49 (83,99%)	46	46 (100%)
2014	62	52 (93,27%)	51	48 (99,96%)
2015	53	50 (99,74%)	43	42 (99,97%)
2016	49	43 (91,06%)	44	42 (99,93%)
2017	50	44 (90,01%)	44	43 (99,93%)
2018	54	51 (96,72%)	47	46 (99,97%)
2019	58	54 (98,70%)	50	50 (100%)
2020	61	54 (98,22%)	49	49 (100%)

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Não obstante aos fatos já elencados, apresenta-se na Tabela 2 a quantidade de complexos mineradores sobre os quais foi possível determinar os consumos específicos $C_{e_{lavra}}$, $C_{e_{beneficiamento}}$ e $C_{e_{total}}$, bem como a participação destes em relação ao total ROM e da produção beneficiada. Dos dados referenciados, observa-se, de forma geral, valores acima de 90%,

exceção apenas dos anos de 2012 e 2013, onde complexos mineradores com grande produção deixaram de informar o consumo de diesel e, por conseguinte, inviabilizaram o cálculo do Ce_{lavra} e do Ce_{total} . Em relação ao $Ce_{beneficiamento}$, verifica-se que os complexos, em que foi possível o cálculo do indicador, respondem por mais de 99% do produto beneficiado. No que tange ao cálculo do Ce_{total} em relação à produção beneficiada, apenas nos anos de 2011, 2012 e 2013, os valores ficaram abaixo de 90%, muito em virtude da não declaração do consumo do óleo diesel por importantes complexos mineradores neste período. Cabe ainda destacar que, onde houve o cálculo do Ce_{lavra} , contabilizou-se o Ce_{diesel} e vice-versa.

Tabela 2 – Quantidade de complexos mineradores e unidades de beneficiamento em que foi possível o cálculo dos indicadores Ce_{lavra} , $Ce_{beneficiamento}$ e Ce_{total}

Ano	Complexos mineradores que foram calculados o Ce_{lavra} (kWh/t) (% ROM)	Usinas de beneficiamento que foram calculados o $Ce_{beneficiamento}$ (kWh/t) (% total beneficiada)	Complexos mineradores que foram calculados o Ce_{total} (kWh/t) (% total beneficiada)
2011	46 (90,18%)	42 (99,94%)	40 (89,29%)
2012	44 (78,51%)	42 (99,50%)	37 (82,76%)
2013	48 (83,96%)	43 (99,97%)	39 (85,29%)
2014	51 (93,26%)	45 (99,76%)	42 (93,74%)
2015	49 (99,73%)	41 (99,97%)	42 (99,97%)
2016	40 (90,91%)	37 (99,80%)	37 (92,26%)
2017	43 (89,91%)	43 (99,92%)	39 (93,49%)
2018	50 (96,72%)	45 (99,97%)	40 (98,26%)
2019	52 (98,55%)	47 (99,92%)	44 (98,22%)
2020	54 (98,22%)	48 (99,89%)	43 (98,63%)

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Da Tabela 3 extrai-se a caracterização dos complexos mineradores representados nesta pesquisa, quanto a seu porte, em um determinado ano-base. Conforme pode ser observado, a grande maioria das minas de ferro foram classificadas, segundo a metodologia utilizada no presente trabalho, em grandes.

Tabela 3 – Caracterização dos complexos mineradores quanto ao seu porte

Ano	Pequenas	Médias	Grandes
2011	6	19	29
2012	5	18	33
2013	5	17	33
2014	11	15	36
2015	8	15	30
2016	9	15	25
2017	4	17	29
2018	11	12	31
2019	10	17	31
2020	8	19	34

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

4.2 Consumo Energético do Setor de Mineração de Ferro

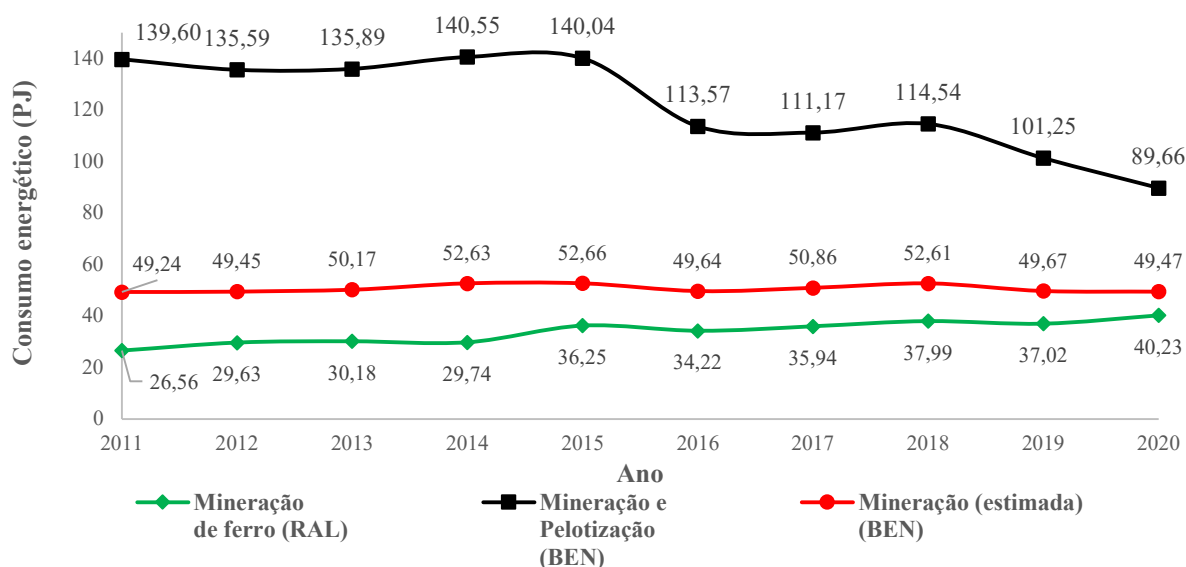
Analisando as informações dos insumos energéticos utilizados na mineração de ferro (diesel e eletricidade), em petajoule (PJ), ter-se-ia a situação verificada na Figura 11, onde encontra-se representado o consumo energético anual no período compreendido entre 2011 e 2020. Ainda nesta mesma figura, têm-se os dados referentes ao setor “mineração e pelotização” divulgados pela EPE no BEN, de forma agregada, e a estimativa desagregada, nas condições informadas na seção de procedimentos metodológicos, e que leva em consideração, segundo a nota metodológica do EPE, as cadeias de produção minerais de minério de ferro, bauxita, manganês, cobre, calcário, pedras britadas e fosfato (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

De forma geral, percebe-se um viés de aumento do consumo energético da mineração de ferro, em sentido contrário ao do setor de mineração e pelotização (agregado). A diminuição do consumo energético observada no setor agregado, a partir do ano de 2015, é explicada, em parte, pelo rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana-MG, ocorrida no final do ano de 2015, e, posteriormente, pelo rompimento da barragem da mina de Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, no início do ano de 2019, que afetou o setor de pelotização da Vale S.A. O primeiro desastre, por exemplo, fez com que as operações da pelotização da Samarco S.A, instalada em Anchieta-ES e com capacidade produtiva de 29,5 milhões de

toneladas por ano, ficassem paralisadas no período compreendido entre 2016 e 2020 (HEIDER, 2022; SAMARCO, 2022). O processo de pelletização demanda uma grande quantidade de energia, seja sob a forma de energia térmica relacionada aos processos de queima necessários para a formação físico-química das pelotas, ou mesmo a energia elétrica, utilizada nos processos de cominuição, bombeamento e ventilação (MOURÃO, 2017).

Por outro lado, os acidentes anteriormente mencionados impactaram em menor grau o consumo energético dos setores de mineração (estimado) e o da mineração de ferro. No primeiro, verifica-se, a partir da análise das informações da Agência Nacional de Mineração, que houve, no período, aumento da produção ROM e beneficiada das cadeias produtivas que compõem a mineração, segundo a EPE (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023). Na mineração de ferro, apesar de ter ocorrido a diminuição da produção em Minas Gerais, houve o aumento da produção no estado do Pará, conforme se depreende dos dados da Agência Nacional de Mineração (2023a). Dentro deste contexto, observa-se que, no período temporal da pesquisa, houve um acréscimo de 51,45%, na mineração de ferro, enquanto, no estimado, o incremento foi de menos de um ponto percentual. Para fins de comparação, no ano de 2020, segundo dados do *Department of Industry, Science, Energy and Resources* (2022), o setor de mineração australiana (metálicos, não metálicos e pedreiras e outros serviços e suporte à mineração) consumiu, no referido ano, o valor de 217 petajoules em insumos energéticos.

Figura 11 – Consumo energético do setor “mineração e pelletização”, da mineração (forma desagregada) e da mineração de ferro, em PJ

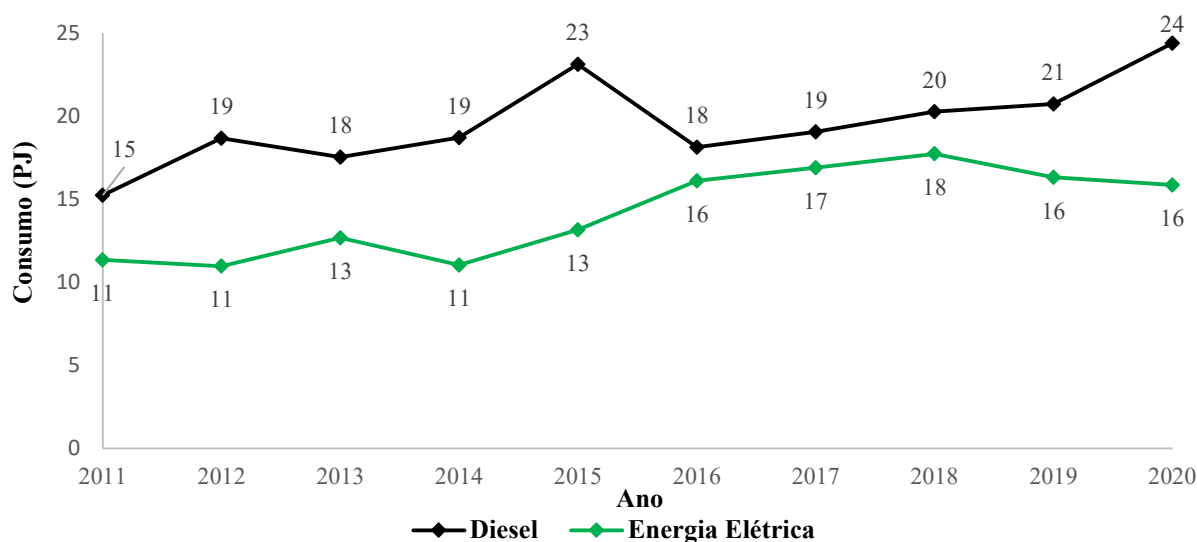


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Da análise da Figura 12, extrai-se, com base nas informações dos RAL, que o maior consumo energético na mineração de ferro é proveniente da utilização do óleo diesel. Esta condição vai ao encontro dos trabalhos de Haque e Norgate (2015), Palamure (2016) e Soofastaei e outros (2018). Tal fato é explicado pelo elevado consumo de combustíveis fósseis necessários na etapa de lavra, principalmente nas atividades de carregamento e transporte, uma vez que a grande maioria das minas brasileiras realizam suas operações no ciclo convencional de lavra, representado por caminhões e carregadeiras. Assim, e considerando o alto custo financeiro e ambiental decorrente do uso do óleo diesel, as empresas têm buscado a implementação de novas tecnologias e/ou melhoria de suas operações objetivando a eficiência destas atividades unitárias, conforme pode ser observado em iniciativas do IBRAM e proposições dos entes públicos relacionados ao tema (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013; INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2014; MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES, 2017). Ademais, observa-se que, no período de estudo, houve um aumento da ordem de 60,11% no consumo do óleo diesel, e de 39,80% no que se refere ao uso da eletricidade.

Figura 12 – Consumo energético da mineração de ferro por fonte, em PJ



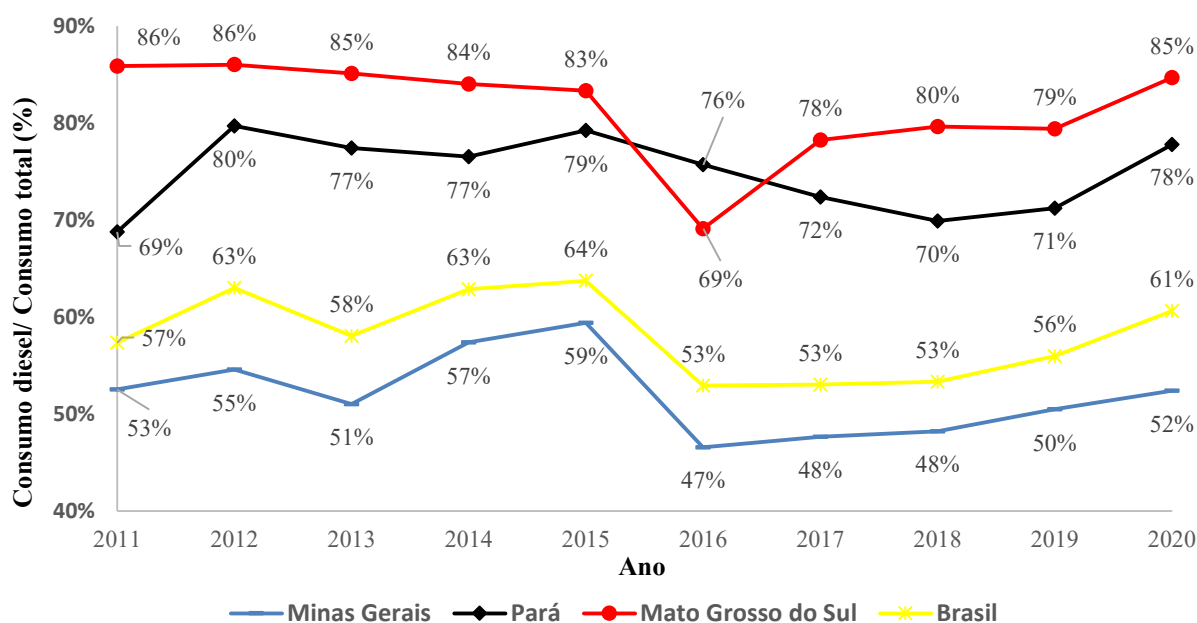
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13, por sua vez, verifica-se o percentual do consumo energético proveniente do diesel em relação ao consumo energético total, no Brasil e nas unidades federativas responsáveis pelas maiores produções da *commodity*. Extrai-se que, desde o ano de 2015, houve uma tendência de diminuição da participação do diesel em relação ao consumo total. Conquanto, a partir do ano

de 2019, observa-se o crescimento deste percentual, explicado, em parte, pelo estado do Pará, que possui grande participação na produção de minério de ferro brasileira e que tem como principal insumo energético o óleo diesel. A menor participação do diesel relacionada ao estado de Minas Gerais pode ser interpretada, em uma primeira análise, pelo decréscimo dos teores de suas jazidas, bem como pela tipologia dos seus minérios, demandando um maior consumo de energia elétrica no processo de beneficiamento, principalmente em relação ao processo de cominuição, consoante aos trabalhos de Jonusan (2017), Vasconcelos (2020) e Vilaça e outros (2022). Por seu turno, as atividades de extração nos estados do Pará e Mato Grosso do Sul exigem etapas de processamento mineral menos energointensivas, fazendo com que a participação do diesel na matriz energética seja majoritária.

Figura 13 – Percentual do consumo de energia de diesel em relação ao consumo energético total do Brasil, Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul



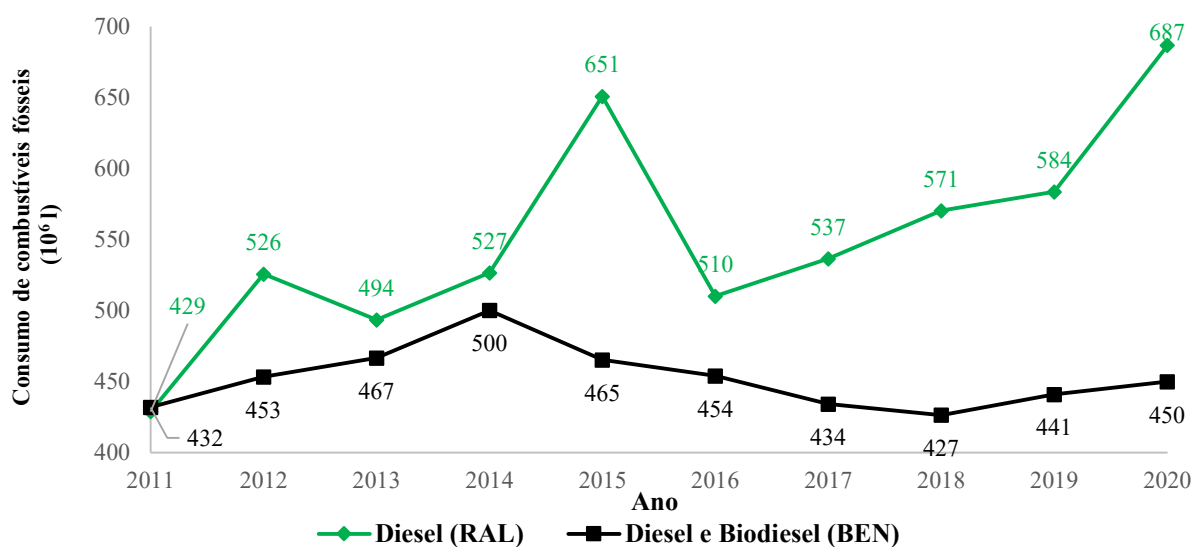
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Analisando especificamente o consumo de diesel em termos volumétricos, consoante à Figura 14, observa-se que as informações do setor de mineração de ferro, nos termos declarados no RAL, excedem o volume total dos combustíveis de origem fósseis (diesel e biodiesel) apresentados no BEN pela EPE. Tal situação causa, à primeira vista, estranheza, uma vez que os dados do BEN englobam diversos setores extrativos que compõem o agregado “mineração e pelotização”, como, por exemplo, a mineração de bauxita, fosfato, manganês, cobre e outros, que também consomem grandes volume de óleo diesel em seus processos de lavra. Diante de

tal situação, tem-se duas hipóteses possíveis, a saber, ou as informações declaradas no RAL encontram-se superdimensionadas ou, por outro lado, houve um subdimensionamento no BEN por parte da EPE. Para a solução desta problemática, verifica-se que, segundo informações da empresa privada de inteligência de negócios *CRU*, nos anos de 2015 e 2016, a média de consumo de diesel na mineração de ferro brasileira foi de 1,11 e 1,14 litros/t_{ROM}, respectivamente (*CRU, 2017 apud CARVALHO et al., 2018*). Assim, e considerando que nestes anos a produção ROM no Brasil foi de 595,7 e 558,5 milhões de toneladas, respectivamente, segundo dados da Agência Nacional de Mineração (2022), ter-se-ia valores estimados de consumo de diesel na mineração de ferro, na ordem de 661 e 636 milhões de litros, que, apesar de ligeiramente superiores aos dados da Figura 14, corroboram com a hipótese da existência de informações subestimadas por parte do BEN.

Figura 14 – Volume de diesel consumido na mineração de ferro (RAL) e no setor mineração e pelotização (BEN)

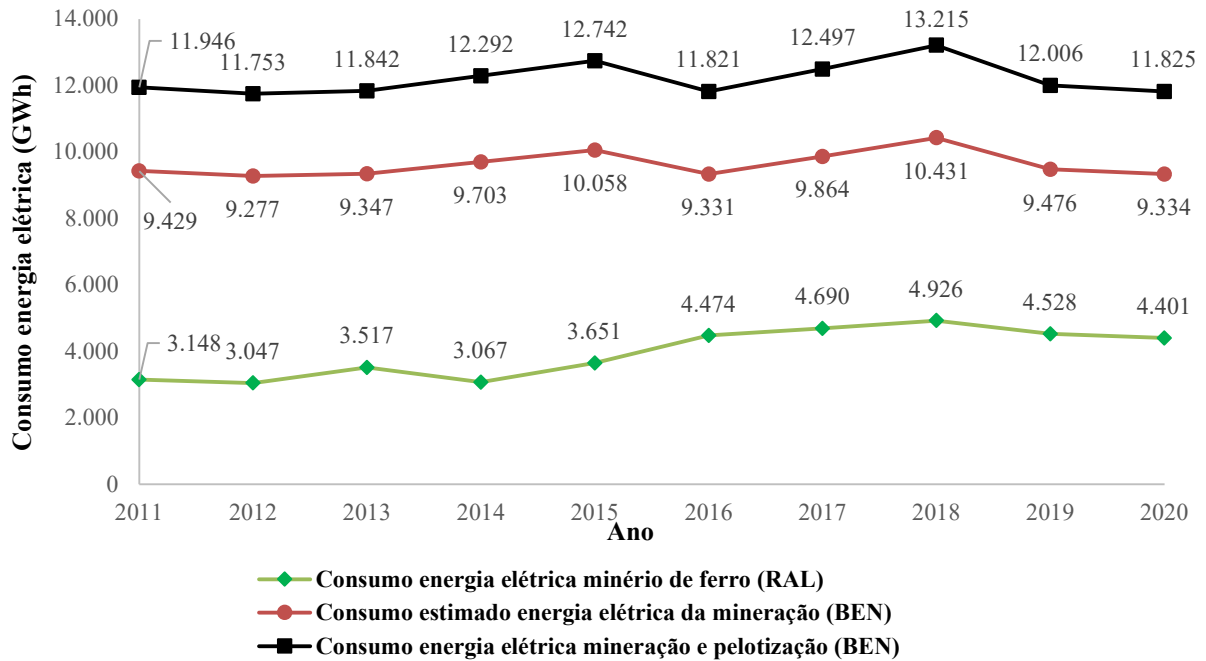


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a) e Empresa de Pesquisa Energética (2022).

Nota: Elaborado pelo autor.

Por seu turno, na Figura 15 tem-se os dados da energia elétrica consumida na mineração de ferro, no setor agregado “mineração e pelotização” e estimativas do consumo na mineração de forma agregada. É possível constatar um comportamento idêntico entre os três valores, contudo, percebe-se uma tendência de aumento do percentual do consumo da mineração de ferro, o que não ocorre nos outros setores. A explicação para tal fato pode derivar, dentre outros motivos, da necessidade de processos de beneficiamento mais energointensivos, principalmente no estado de Minas Gerais, como mostrado na Figura 13.

Figura 15 – Consumo de energia elétrica do setor “mineração e pelotização”, das estimativas do setor de mineração e da mineração de ferro

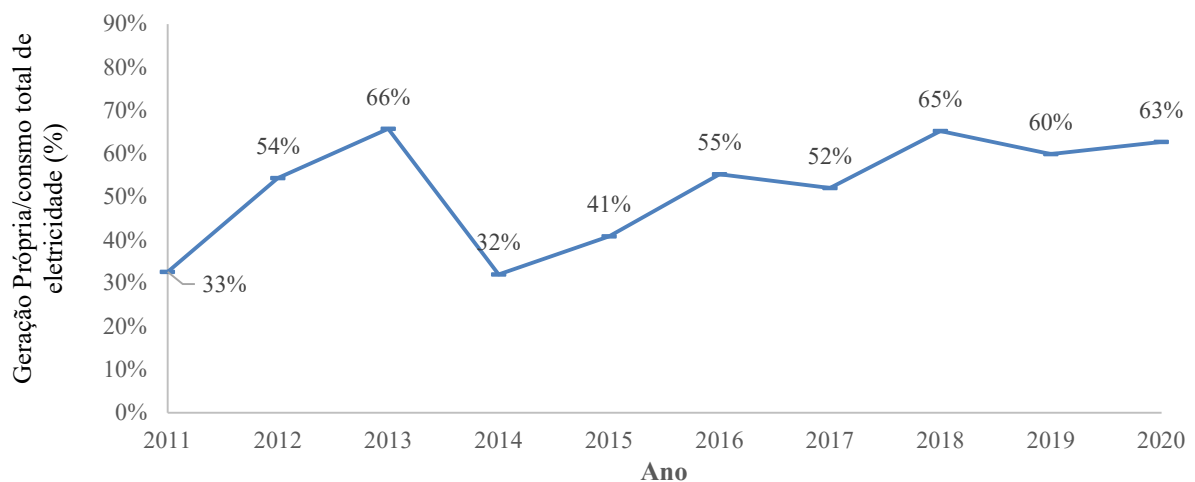


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a) e Empresa de Pesquisa Energética (2022).

Nota: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 ilustra a evolução do percentual da energia elétrica gerada pelas próprias empresas em relação ao consumo total da eletricidade. Da análise da figura, é possível observar que, nos três últimos anos, este percentual se estabeleceu no patamar próximo a 60%, demonstrando uma forte tendência das empresas de mineração de ferro em possuírem sua própria geração, como pode ser verificado em Vasconcelos, Jesus e Santos (2021).

Figura 16 – Participação do consumo de energia elétrica própria em relação ao total

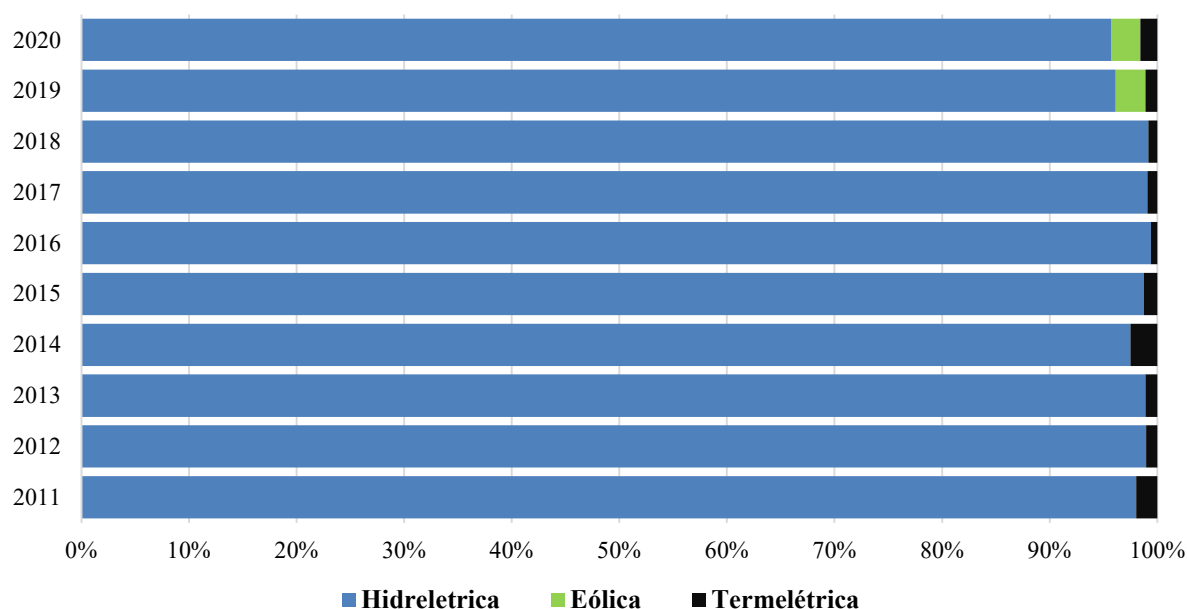


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Analisando a geração da energia elétrica pelas empresas segundo as fontes, observa-se, na Figura 17, que a maior parte desta é proveniente de hidrelétricas. Contudo, a partir do ano de 2019, já começa a ser notada uma maior participação da energia eólica (da ordem de 2,5%), ultrapassando até a quantidade de energia elétrica obtida a partir de geradores a óleo diesel (termelétricas), o que pode ser explicado, por exemplo, pela entrada em operação de parques eólicos da empresa Vale S.A (VALE, 2021). Cabe ainda ressaltar que a utilização de fontes renováveis para produção da energia tem sido tendência na mineração mundial, como pode ser verificado no trabalho de Abbaspour e Abbaspour (2022).

Figura 17 – Geração de energia elétrica própria por fonte (%)

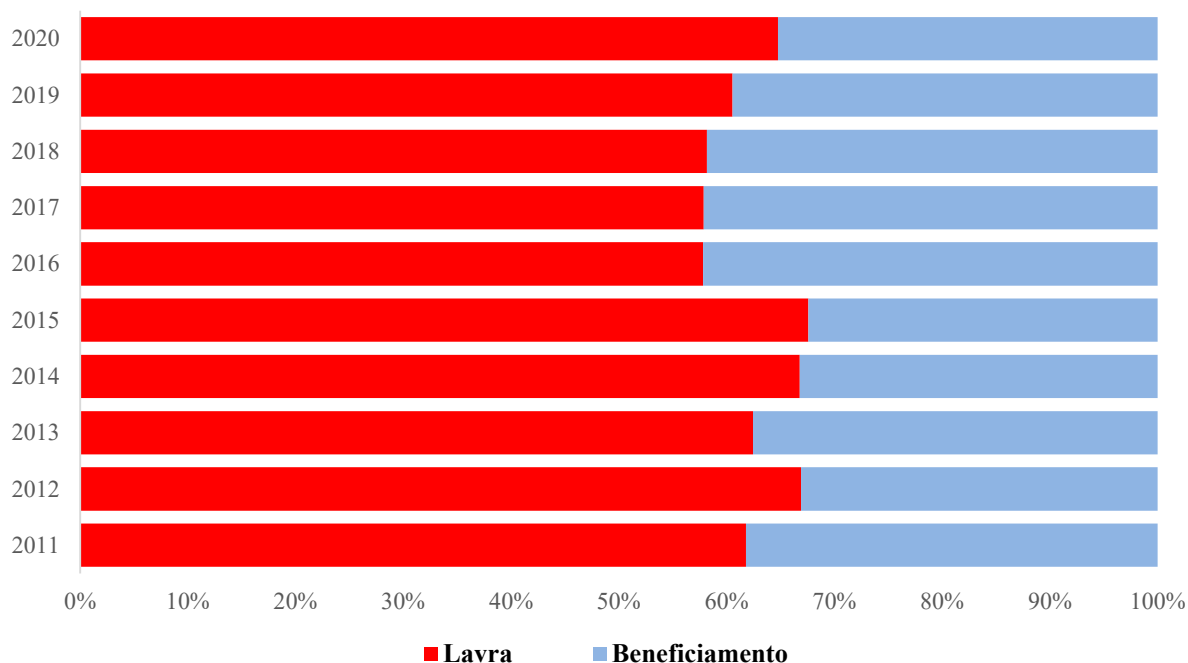


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Examinando o consumo energético, e desagregando-o entre as fases de lavra e beneficiamento, consoante à metodologia destacada em Jonusan (2017) e Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2017), tem-se na Figura 18 o percentual da energia consumida em cada fase, onde pode ser verificado que o maior consumo energético da mineração de ferro brasileira ocorre na lavra, oscilando no entorno do percentual de 60%. Estes resultados vão ao encontro dos valores alcançados por Norgate e Haque (2015), Palamure (2016) e Allen (2021), e explicados, como dito anteriormente, pelo consumo energético dos equipamentos de carregamento e transporte.

Figura 18 – Percentual do consumo energético nas fases de lavra e beneficiamento

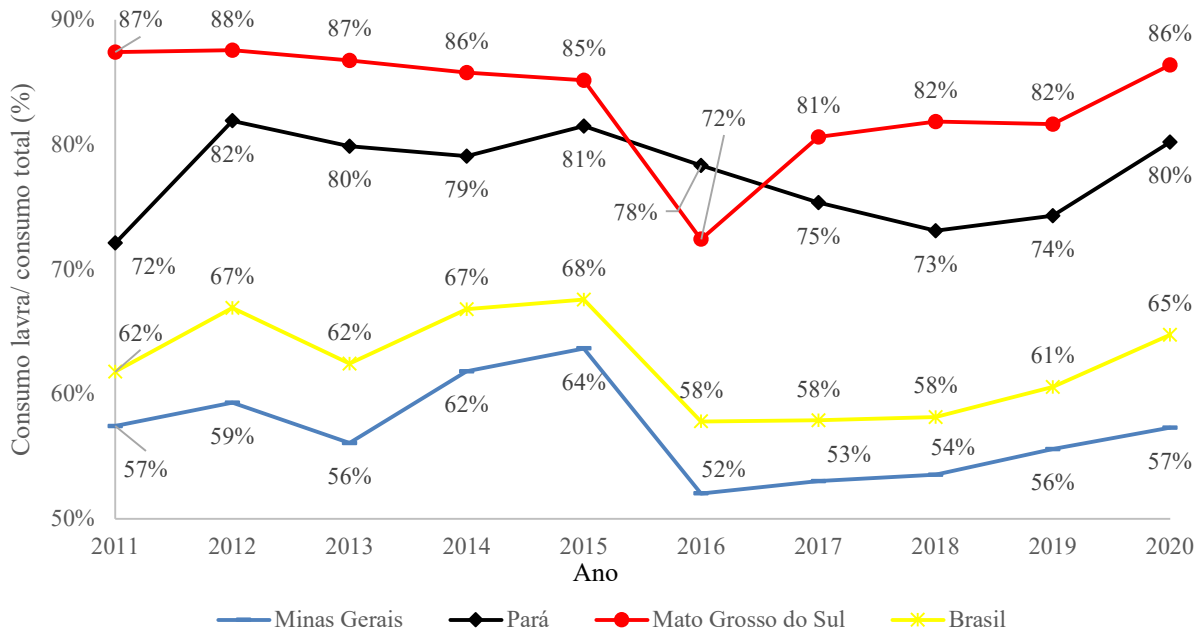


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Buscando um melhor entendimento sobre o tema, destaca-se na Figura 19 o percentual do consumo energético da lavra em relação ao total, estratificado por unidade federativa (maiores produtores). Da análise dos dados, percebe-se que os maiores percentuais se referem aos estados do Pará e do Mato Grosso do Sul, enquanto em Minas Gerais identificou-se os menores percentuais, o que pode ser explicado pela mesma situação já demonstrada na Figura 13, estando relacionada à tipologia do mineral extraída nas jazidas do estado mineiro, principalmente de itabiritos compactos, que demandam etapas de beneficiamento que envolvem processos mais energointensivos, vinculados às etapas de cominuição (CARVALHO; PEREIRA; NOGUEIRA, 2019; SEGURA-SALAZAR; SANTOS; TAVARES, 2021).

Figura 19 – Percentual do consumo energético na lavra em relação ao consumo energético total do Brasil, Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 Indicadores de Desempenho Energético na Mineração de Ferro

Para mensurar o desempenho energético do setor de mineração de ferro, estabeleceu-se, conforme pode ser verificado na seção 3, quatro indicadores de consumo específico, assim denominados:

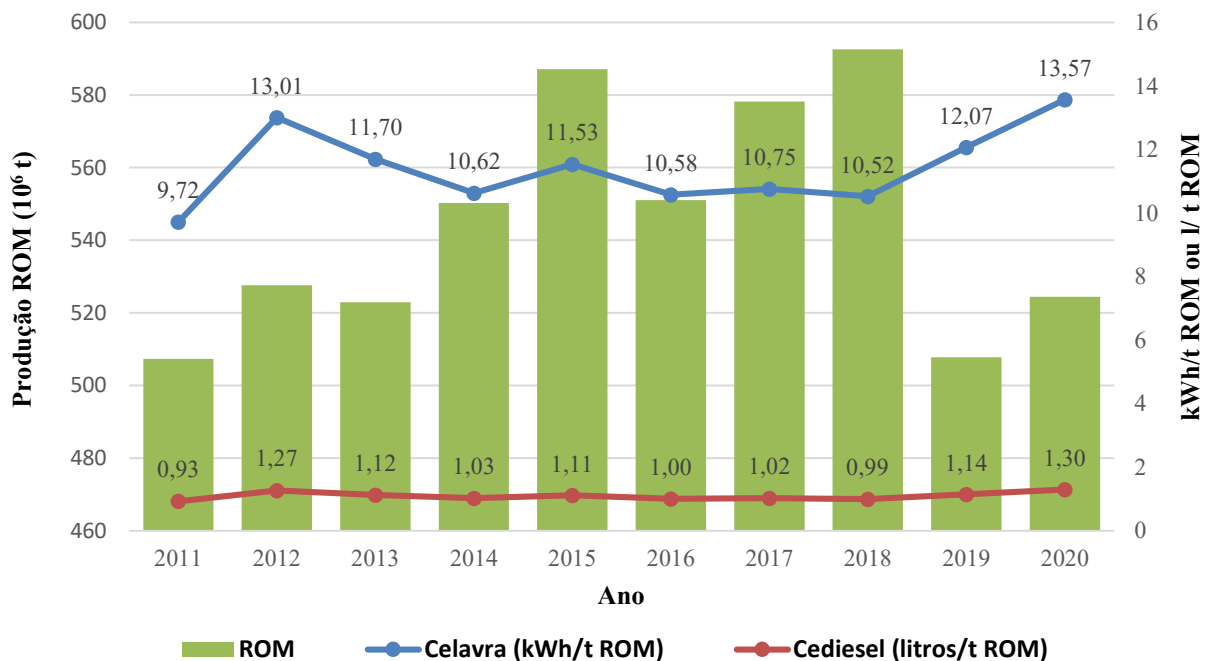
- consumo de diesel por tonelada ROM transportada (C_{diesel});
- consumo energético específico por tonelada ROM transportada (C_{lavra});
- consumo energético específico por tonelada beneficiada ($C_{beneficiamento}$) e
- consumo energético total específico por tonelada beneficiada (C_{total}).

Ante ao exposto, destaca-se, a seguir, a análise de cada um dos indicadores e suas especificidades em relação ao setor mineral e a algumas variáveis importantes no âmbito da exploração mineral.

4.3.1 Desempenho Energético na Lavra

A representação dos valores dos indicadores ponderados Ce_{diesel} e Ce_{lavra} e a quantidade de ROM para cada um dos anos pesquisados pode ser observada na Figura 20. De forma geral, verifica-se o aumento da ordem de 39% no valor dos indicadores, o que aduz, em uma primeira análise, na perda de eficiência energética nas atividades de lavra no período de estudo. Contudo, é imperioso destacar que a tendência nas minas é que, com o passar do tempo, haja aumento da DMT e da REM, fazendo com que haja um incremento do consumo energético nas atividades de lavra, principalmente aquelas relacionadas às operações de transporte e carregamento, uma vez ser necessário maior volume de material extraído para a produção de uma mesma quantidade de ROM (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013; IGOGO, 2021). Nesta linha, insta destacar que, muito provavelmente, o melhor indicador para conseguir captar a realidade das atividades de lavra seria a quantidade de energia necessária para o transporte de uma determinada quantidade de material, independentemente se ROM ou estéril, e, mesmo assim, não se estaria avaliando a influência da DMT. Para fins de exemplo, uma redução da DMT em 500 metros, pode resultar na diminuição do consumo energético da ordem de 31% (PURHAMADANI; BAGHERPOUR; TUDESHKI, 2021).

Figura 20 – Consumo específico da etapa de lavra em kWh/t e l/t e quantidade de ROM



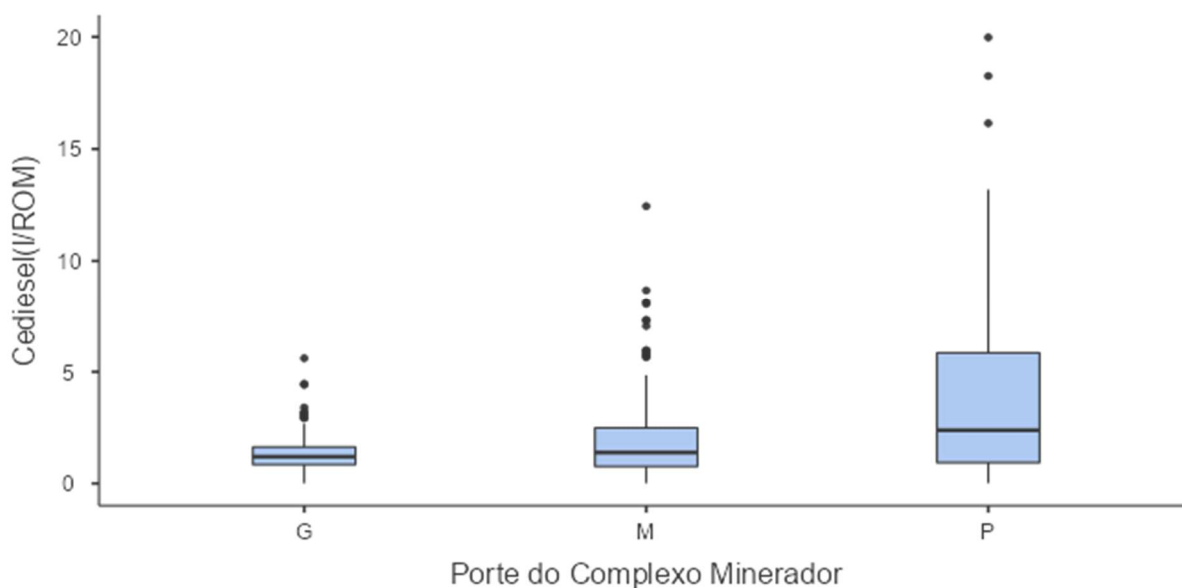
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Cabe aqui ressaltar que, apesar de existir a informação da quantidade de estéril movimentada nos RAL avaliados, os valores não se apresentaram de forma coerente, sendo verificado no exame primário dos dados que, muitas das vezes, estes eram declarados de forma aleatória. Os fatos aqui elencados prejudicam, em uma primeira instância, a análise da influência das variáveis destacadas, em detrimento às ações de melhorias tecnológicas que vêm sendo implementadas pelo setor, objetivando o aumento da eficiência energética da fase de lavra. Ainda nesta linha, extrai-se que, segundo informações da empresa privada de inteligência de negócios *CRU*, no ano de 2016, a média do consumo de diesel por tonelada de ROM, a nível mundial, era da ordem de 1,37 litros/t, e que no Brasil este seria próximo a 1,14 l/t, valor este ligeiramente superior ao observado no presente trabalho (*CRU, 2017 apud CARVALHO, 2018*). Por outro lado, *Carvalho e outros (2018)*, com base nas avaliações da *CRU*, estimaram que seriam necessários, nos anos de 2018 e 2019, consumos de 1,04 e 0,99 l/t, respectivamente, valores estes ligeiramente menores ao observado na presente pesquisa. Mas, de longe, os valores brasileiros apresentados são bastante inferiores aos verificados na Austrália, consoante aos trabalhos de *Haque e Norgate (2015)* e *Palamure (2016)*.

Por sua vez, a Figura 21 traz, sob a forma do gráfico *boxplot*, os dados individualizados do indicador Ce_{diesel} , categorizado quanto ao porte do complexo minerador. Da análise da figura é possível constatar que há uma tendência de que os complexos mineradores de grande porte tenham um consumo específico de diesel menor que as empresas de pequeno porte. Situação idêntica foi verificada por *Palmure (2016)*, e pode ser explicada pelo efeito escala, uma vez que as empresas de grande porte optam por operações de transporte por caminhões *off-road* que podem atingir capacidades de carregamento de até 320 toneladas, enquanto as empresas de pequeno porte, por restrições das características da mina, utilizam-se predominantemente de caminhões convencionais. Apesar dos primeiros consumirem mais combustíveis comparativamente aos convencionais, a sua capacidade de movimentação de materiais faz com que sejam mais eficientes na relação litro/tonelada transportada (*BOZORGEBRAHIMI, 2004; GROSSI, 2022*).

Figura 21 – Consumo específico de diesel por porte do complexo minerador



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 4 e 5 encontram-se destacadas as análises estatísticas dos dados referentes ao C_{diesel} discriminados por porte do complexo minerador. A partir da realização do teste de *Shapiro-Wilk*, observou-se que o *p-valor* apresentou valores menores que 0,001, e a condição do teste é que, para o *p-valor* inferiores a 0,05, rejeita-se a hipótese H_0 , que disserta sobre a normalidade de dados. Desta feita, realizou-se o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* (Tabela 4). Este é uma alternativa à análise de variância, e avalia a diferença entre as medianas de grupos distintos (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Isto posto, o resultado do teste indicou o *p-valor* do teste de *Kruskal-Wallis* como sendo menor do que 0,05, resultando na rejeição da hipótese H_0 que aduziria na inexistência de diferença estatística das medianas entre os grupos de estudo. Cabe ainda destacar que o valor χ^2 , segundo Fávero e Belfiore (2017), mensura a discrepância entre uma tabela de contingência observada e esperada, partindo da premissa que não há associação entre as variáveis estudadas e o *df* (graus de liberdade, do inglês *degrees of freedom*) segundo Oliva Filho (1990), é o número de comparações possíveis entre “*n*” elementos, tendo como notação matemática a equação $n-1$.

Tabela 4 – Resultados do teste de *Kruskal-Wallis*

Variável	χ^2	Df	<i>p-valor</i>
Diesel (l/t _{ROM})	19,8	2	< 0,001

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Em face do teste de *Kruskal-Wallis* não realizar o ranqueamento, ou mesmo destacar em quais dos grupos exista esta diferença, utilizou-se o teste de comparação entre pares de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner* (Tabela 5). Este é um teste de comparações múltiplas entre pares de conjuntos, no sentido de verificar qual dos fatores diferem entre si, a partir da soma do *ranking* de Wilcoxon, representado pela letra W. Este último, além de trazer a direção das diferenças entre cada par, leva em consideração a magnitude destas, no contexto dos grupos (FÁVERO; BELFIORE, 2017; MATOS, 2021). Assim, na comparação entre os grupos de grandes e pequenos complexos mineradores e dos médios em relação aos pequenos, verificou-se que o *p-valor* do teste de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner* foi inferior a 0,05, ficando assim comprovado, do ponto de vista estatístico, a existência de diferença entre os grupos, o que não foi verificado entre os pares médios e grandes empreendimentos, onde o *p-valor* do teste foi de 0,231.

Tabela 5 – Testes de comparação de *Dwass-Steel-Critchlow-Fligner*

Porte	W	<i>p-valor</i>
G x M	2,31	0,231
G x P	6,19	< 0,001
M x P	4,28	0,007

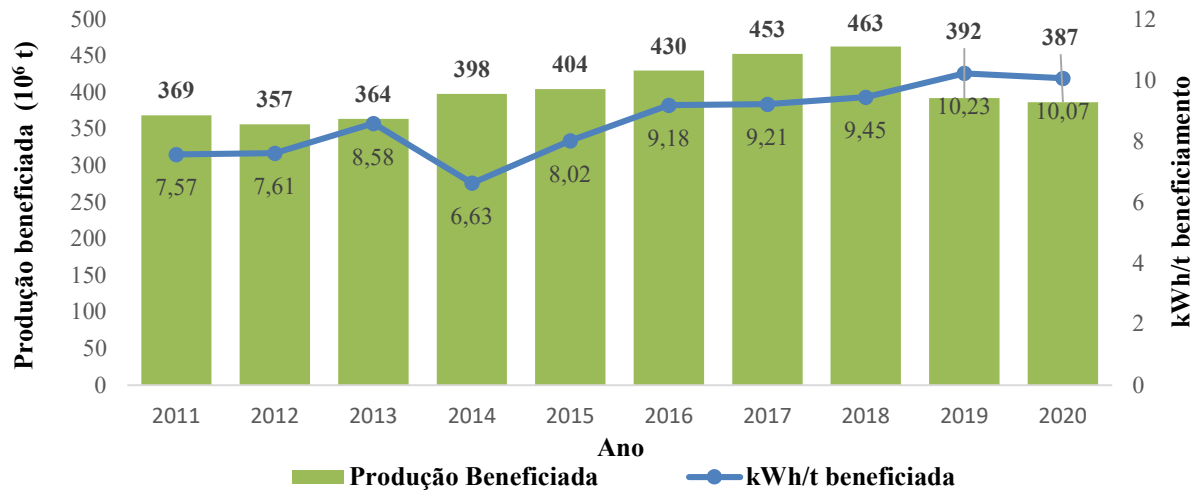
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Desempenho Energético no Beneficiamento

A Figura 22 apresenta os valores calculados do indicador $Ce_{beneficiamento}$ e a produção beneficiada, oportunidade em que se visualiza que, no período de estudo, houve um aumento da ordem de 33% no indicador proposto, explicado pela diminuição dos teores da alimentação e/ou modificação na tipologia do material do ROM, o que aduz na necessidade de processos de beneficiamento mais complexos e, por conseguinte, mais energointensivos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013; ATENG, 2020; IGOGO *et. al.*, 2021; MUDD, 2021). Da mesma forma que os indicadores destacados na seção 4.3.1, uma parcela do aumento dos valores no indicador estudado pode ter como razão principal a influência da diminuição dos teores e/ou tipologia do material, prejudicando sobremaneira a análise das ações que têm sido implementadas no setor, objetivando o aumento da eficiência energética dos processos de beneficiamento. Analisando este mesmo indicador, verifica-se que os valores aqui determinados encontram-se abaixo daqueles observados por CRU (2017), citado por Carvalho e outros (2018), que denota um valor médio da ordem de 14 kWh/t beneficiada.

Figura 22 – Consumo específico da etapa de beneficiamento em kWh/t e quantidade beneficiada

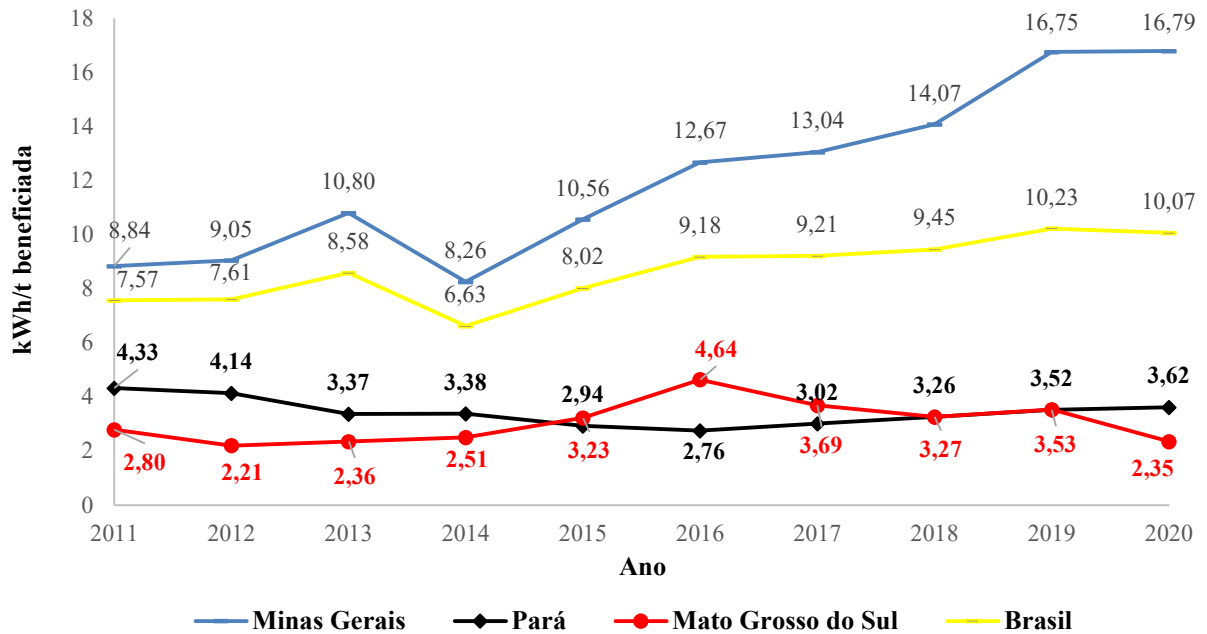


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 23, observa-se o indicador $Ce_{beneficiamento}$ dos produtores de minério de ferro localizados nas principais unidades federativas. Verifica-se que os maiores valores estão relacionados às operações no estado de Minas Gerais, o que pode ser explicado pela tipologia do material extraído em solo mineiro. De forma geral, e no contexto do QF, a lavra de itabiritos compactos tem sido uma tendência e, por consequência, a necessidade de processos de moagem, o que se traduz em rotas de processos mais complexas e com alto custo operacional, principalmente vinculadas à aquisição e ao uso de energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009; CARVALHO; PEREIRA; NOGUEIRA, 2019; SEGURA–SALAZAR; SANTOS; TAVARES, 2021). Por outro lado, os minérios encontrados no Mato Grosso do Sul e, no estado do Pará, apresentam-se com teores médios superiores aos do estado de Minas Gerais e, de forma geral, são predominantemente formados por minérios hematíticos, o que faz com que o beneficiamento deste material seja realizado quase que exclusivamente através das operações de cominuição (britagem) e classificação (CARVALHO, 2012; MORAES; RIBEIRO, 2018).

Figura 23 – Consumo específico da etapa de beneficiamento em kWh/t por unidade federativa

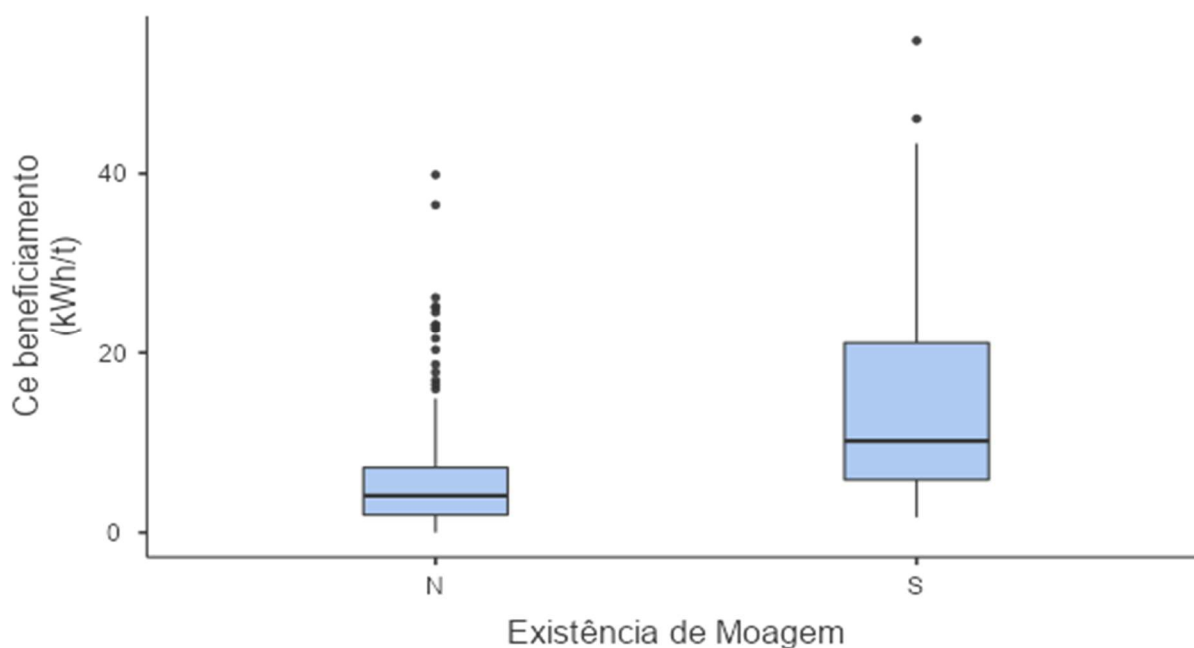


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Na Figura 24 encontra-se representado, sob a forma do gráfico *boxplot*, os dados individualizados do indicador $Ce_{beneficiamento}$, categorizados pela existência (S) ou não (N) do processo de moagem. Constata-se, conforme já esperado, que o consumo específico dos complexos mineradores que possuem a etapa de moagem é bem superior em relação a aqueles que não possuem esta etapa de cominuição em seus processos de beneficiamento. Conforme anteriormente destacado, a etapa de moagem é a maior consumidora de energia elétrica no processo de beneficiamento, podendo representar o percentual de até 64% da energia elétrica consumida nas plantas industriais (HAQUE; NORGATE, 2015; JESWIET; SZEKERES, 2016; JONUSAN, 2017; KATTA; DAVIS; KUMMAR, 2020a).

Figura 24 – Gráfico *boxplot* do indicador $Ce_{beneficiamento}$ por processo de beneficiamento



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 6, por sua vez, tem-se as análises estatísticas dos dados referentes ao $Ce_{beneficiamento}$ discriminado pela existência ou não da etapa de moagem. Pelo fato dos dados não apresentarem uma distribuição normal, conforme comprovado no teste de *Shapiro-Wilk*, (p -valor = 0,001), realizou-se o teste não paramétrico de comparação entre pares de *Mann-Whitney*. Este teste é uma alternativa ao paramétrico t de *Student*, sendo um dos mais poderosos, e tem como premissa o teste da igualdade das medianas (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Do resultado, verifica-se que, como o p -valor do teste de *Mann-Whitney* foi menor do que 0,05, onde rejeita-se a hipótese H_0 que versa que não há diferença entre as medianas entre os dois grupos, comprovando estatisticamente a existência de diferença entre os pares analisados. Por fim, a partir do valor de U , avalia-se o grau de entrelaçamento dos dados de dois grupos após a ordenação, de tal sorte que uma maior separação de dados aduz que as amostras são distintas do ponto de vista estatístico (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

Tabela 6 – Resultado do teste de comparação de pares de *Mann-Whitney*

Variável	U	p -valor
$Ce_{beneficiamento}$ (kWh/t)	4,908	< 0,001

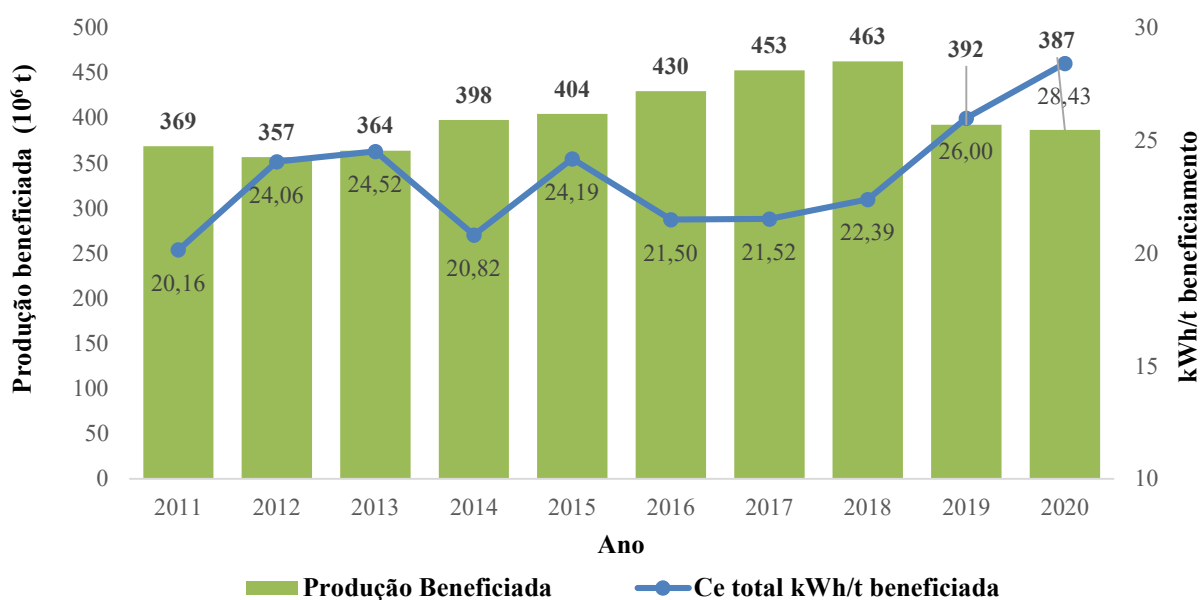
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Desempenho Energético Total (Lavra e Beneficiamento)

Por seu turno, da leitura da Figura 25, observa-se a representação dos valores do indicador Ce_{total} e da quantidade total de material beneficiado. Da análise das informações, é possível verificar uma grande variabilidade dos dados, com um viés de alta a partir dos anos de 2019 e 2020, o que pode ser explicado pelo aumento do Ce_{lavra} e Ce_{diesel} , também identificados na Figura 20. De forma geral, houve, no período de estudo, uma elevação de 41,02%, que intui-se ser função dos contextos já apresentados (DMT, teor e tipologia do minério). Para fins de comparação, Palamure (2016) identificou, na Austrália, consumo específico total médio da ordem de 35,64 kWh/t

Figura 25 – Consumo específico total em kWh/t e quantidade beneficiada

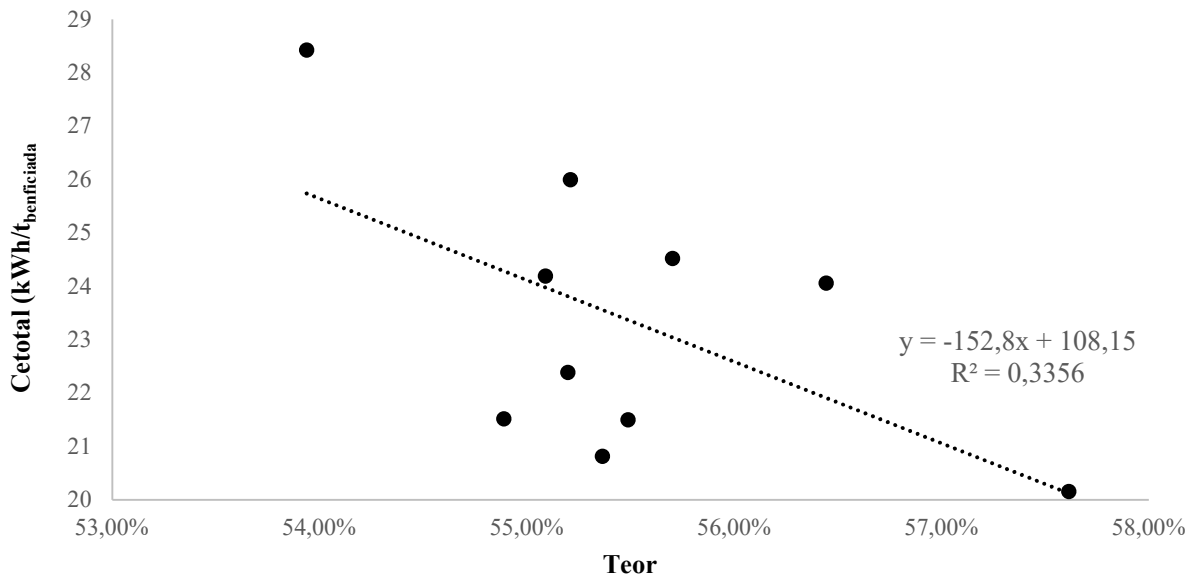


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

A Figura 26 apresenta um gráfico de dispersão que correlaciona o Ce_{total} e o teor de ferro do ROM de forma ponderada. Como pode ser observado, no Brasil, há uma tendência de aumento do Ce_{total} com a diminuição dos teores, fato já explicado por Igogo e outros (2021) e Haque e Norgate (2015).

Figura 26 – Dispersão entre o consumo específico total e o teor de ferro do ROM



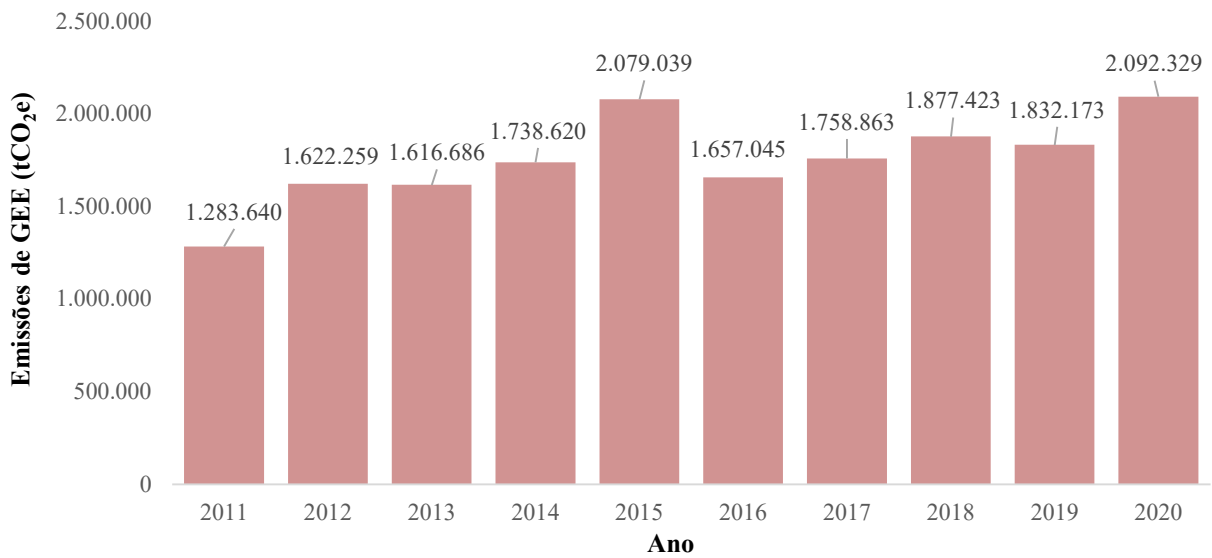
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

4.4 Estimativas de Emissões de GEE

Por intermédio da Figura 27, é possível observar as estimativas de emissões de GEE da mineração de ferro, calculados a partir dos valores do consumo energético de óleo diesel e da energia elétrica, e utilizando-se dos fatores de emissão destacados no Quadro 4. Analisando os dados da figura referenciada, verifica-se que os valores do presente estudo encontram-se 25,79% menores do que os identificados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (2014). Em comparação ao valor estimado para o ano de 2020 pelo Ministério de Minas e Energia (2013), os valores apresentam-se 48,62% menores. Cabe aqui destacar que o IBRAM analisou outras fontes de emissões de GEE, e não só o consumo energético. Por outro lado, as projeções do MME levaram em consideração o estudo do IBRAM e uma projeção de produção da ordem de 1 bilhão de toneladas, estimativa não concretizada. Para fins de contraposição, Katta (2019) estimou, para a mineração de ferro canadense no ano de 2015, valores da ordem de 2.158.000 tCO₂e.

Figura 27 – Estimativas de emissões GEE do setor de mineração de ferro, em tCO₂e

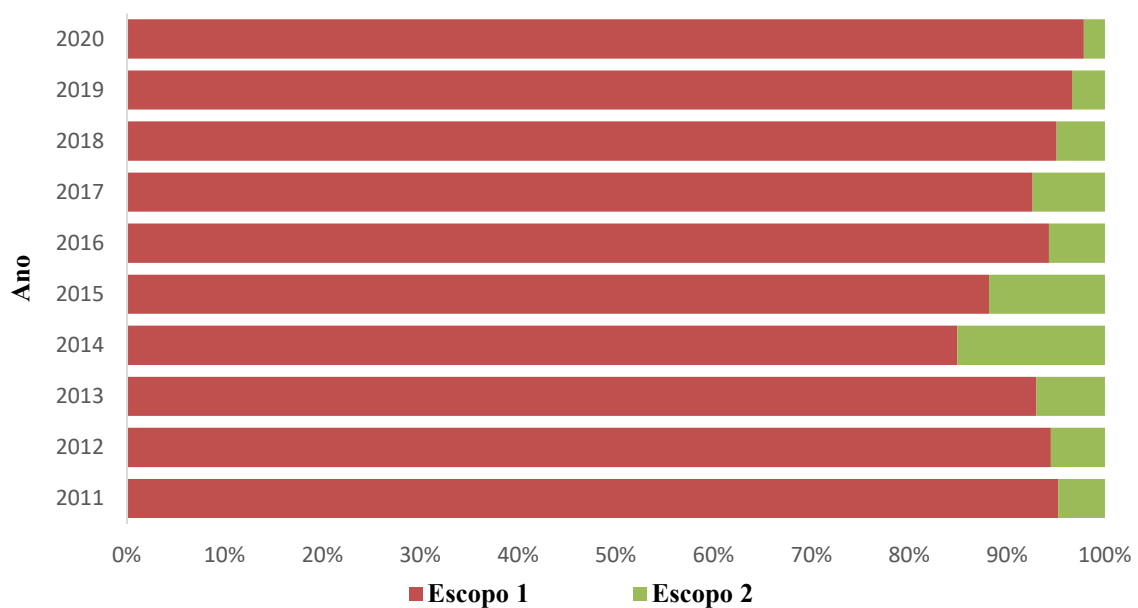


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28, por sua vez, verificam-se as estimativas de emissões de GEE por escopo, onde pode ser observado que o escopo 1 é o responsável pela maior parte das emissões, e que o percentual do escopo 2 tem diminuído ao longo dos anos em virtude da tendência do decréscimo de aquisição de energia elétrica de terceiros, o que já havia sido identificado no presente trabalho.

Figura 28 – Estimativas de emissões de GEE por escopo

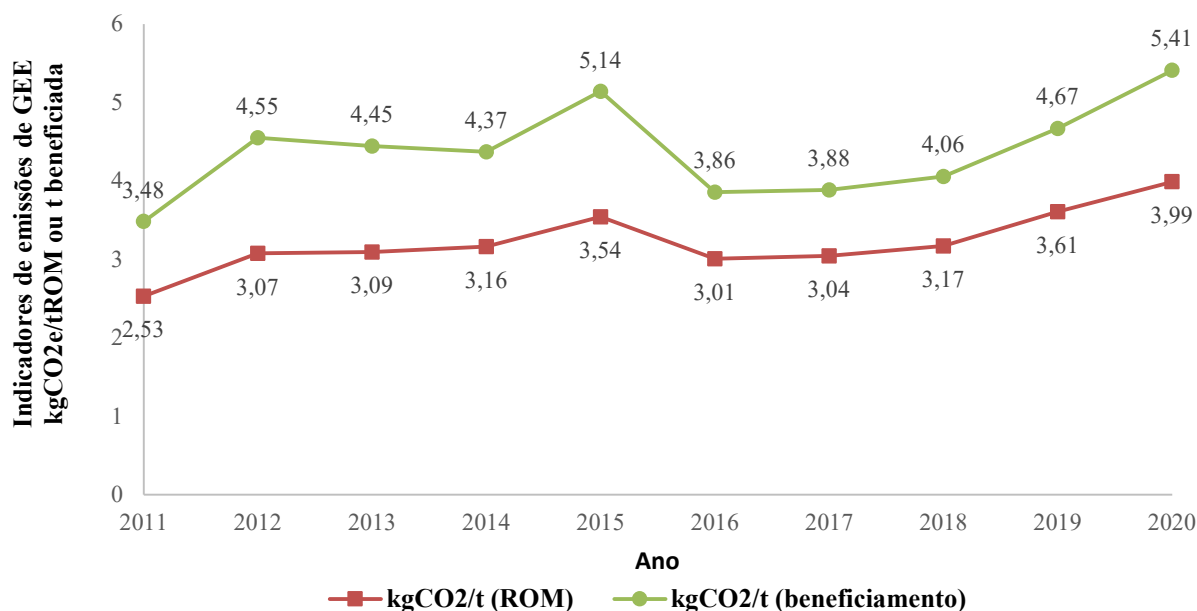


Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Por seu turno, a Figura 29 ilustra a evolução dos indicadores de emissões de CO₂e por tonelada de ROM e tonelada beneficiada, o que demonstra, principalmente a partir do ano de 2017, um viés de incremento nos valores. No período de estudo, houve um aumento de 57,67% e 55,32%, em relação ao kgCO₂e/t_{ROM} e ao kgCO₂e/t_{beneficiada}, respectivamente. Para fins de comparação, Haque e Norgate (2015) observaram valores de 9,3 kgCO₂e/t_{beneficiada}, enquanto Palamure (2016) identificou valores ligeiramente superiores, da ordem de 10,53 kgCO₂e/t_{beneficiada}, ambos no contexto da mineração de ferro australiana. Tais resultados indicam que a mineração brasileira, mesmo em tendência de acréscimo, apresenta valores ligeiramente inferiores, o que pode ser explicado por uma eletricidade gerada majoritariamente por fontes renováveis, dentre outros fatores. Por sua vez, Ferreira (2014) verificou que, para a produção de 1 tonelada de minério concentrado na Samarco S.A., eram emitidos 5 kgCO₂e. Já o levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (2014) observou, para os anos de 2008 e 2011, valores de 3,08 e 3,13 kgCO₂e/t_{ROM}. Por fim, utilizando-se a equação proposta por Palácios (2012) e considerando os teores de ferros brasileiros, a estimativa de emissões de GEE por tonelada beneficiada variaria de 0,75 a 1,01 kgCO₂e.

Figura 29 – Estimativas de fatores de emissões de CO₂e por tonelada produzida e beneficiada



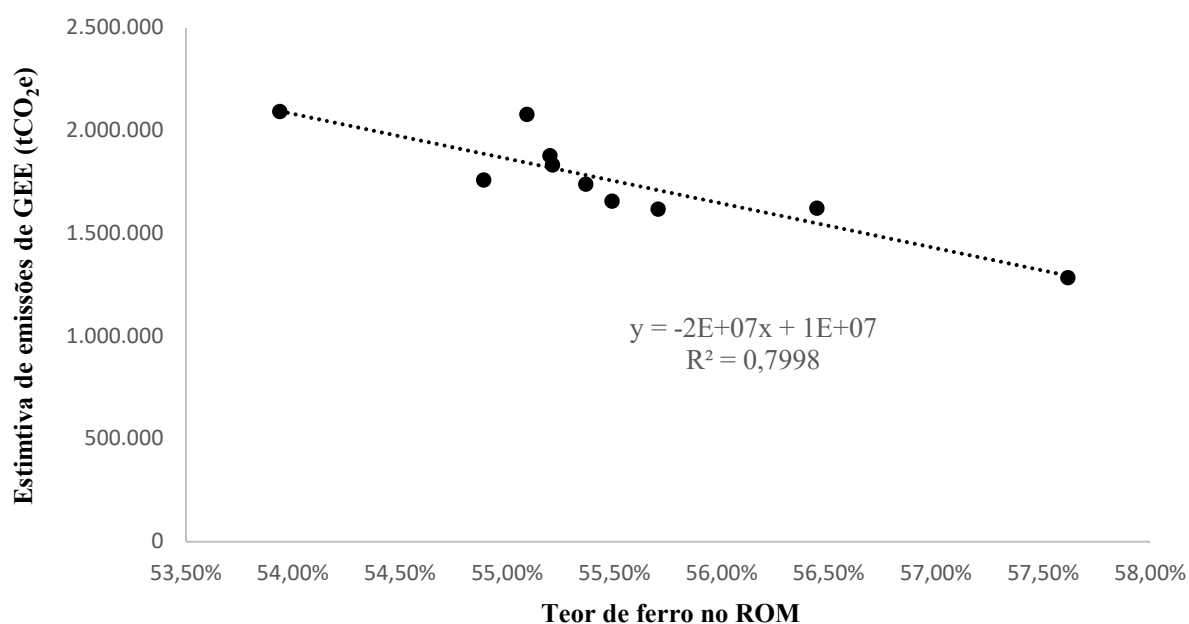
Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

No sentido de entender a motivação da tendência de aumento dos fatores de emissões ao longo dos anos, encontra-se representado na Figura 30 um gráfico de dispersão, onde é demonstrado

o teor médio ponderado de ferro dos complexos mineradores estudados e as estimativas de emissões de GEE para cada ano da pesquisa, podendo ser verificado que as emissões de GEE tendem aumentar em função da diminuição dos teores médios das jazidas, situação apontada no estudo do Ministério de Minas e Energia (2013) e em Azadi e outros (2020). A relação inversa entre emissões de GEE e teores de jazidas restou verificada por Gan e Griffin (2018), onde esta relação ocorreu de forma exponencial, diferente do observado no presente trabalho, em que a relação se apresenta de forma linear. Importante se faz destacar que, muito provavelmente, a inclinação da reta é influenciada pelas iniciativas do setor mineral no sentido da melhoria de eficiência energética e da descarbonização do setor (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2020).

Figura 30 – Estimativas de emissões de GEE em função do teor médio das jazidas



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a).

Nota: Elaborado pelo autor.

Por oportuno, deve-se destacar que as estimativas apresentadas nesta seção, como dito anteriormente, baseiam-se tão somente no consumo de insumos energéticos dentro do contexto da mina e beneficiamento. Um melhor entendimento das emissões de GEE no setor mineral de ferro carece de dados referentes ao uso de explosivos, emissões fugitivas, decapeamento, emissões provenientes de resíduos sólidos e efluentes, tratamento e correção de solos, dentre outros, bem como a abordagem das cadeias de transporte (ferroviário, rodoviário e marítimo).

5 CONCLUSÕES

Para a análise do desempenho energético de um determinado setor, é imprescindível o acesso aos dados em um certo nível de desagregação, pelo menos no nível de determinadas cadeias produtivas minerais, situação inexistente no contexto nacional, uma vez que a EPE, ao divulgar o BEN para o setor mineral, como dito anteriormente, o faz de forma agregada ao da pelotização. Assim, a coleta e a utilização dos dados da ANM, no que se refere aos insumos energéticos, se fez bastante efetiva para o entendimento do setor de mineração de ferro brasileira.

Desta feita, a partir da análise dos dados de insumos energéticos obtidos junto à ANM, por meio do RAL, pode-se identificar, por intermédio dos indicadores de consumo específico, que, ao longo do período de 2011 e 2020, houve aumento do consumo energético necessário para a movimentação de 1 tonelada de ROM de 39% e, para o processamento e a produção de 1 tonelada de produto beneficiado, da ordem de 33% e 41%, respectivamente. Tal situação é, até um certo ponto, esperada, tendo em vista a tendência natural da diminuição dos teores, o que não é diferente dentro do contexto brasileiro.

Além da análise aqui destacada, observou-se que o maior consumo energético do setor mineral é proveniente do uso do diesel, capitaneado pelas atividades de transporte e carregamento, indo ao encontro dos estudos disponíveis na literatura. Por outro lado, foi possível verificar que fatores vinculados às diferentes tipologias dos minérios e, por conseguinte, às rotas de processo, influenciam de maneira preponderante no consumo da energia elétrica, o que faz com que haja diferenciação entre as unidades federativas do Brasil, no que se refere às características da proporção entre os consumos dos insumos estudados, bem como em relação aos indicadores de desempenho energético relacionados ao beneficiamento.

Neste sentido, é imperioso destacar que as variáveis tipologia do minério, DMT e REM influenciam de maneira preponderante no consumo dos insumos energéticos tratados no presente estudo, o que dificulta a análise, de forma individualizada, da influência das novas tecnologias e processos que visam à eficiência do uso dos insumos energéticos. Intui-se que esta foi uma das grandes limitações do presente trabalho, que poderá ser superada em trabalhos futuros.

Em relação às estimativas de emissões de GEE provenientes dos insumos energéticos estudados, observou-se no setor de mineração de ferro um aumento nos indicadores $\text{kgCO}_2/\text{t}_{\text{ROM}}$ e $\text{kgCO}_2/\text{t}_{\text{beneficiada}}$ que, aparentemente, está relacionado às questões intrínsecas da mineração já destacadas (DMT, REM, tipologia e teor), além daquelas vinculadas aos fatores de emissões. Cabe, contudo, destacar a existência de oportunidades para realização de trabalhos que abordem outras fontes de emissões, bem como em relação às atividades de transporte.

Por fim, entende-se que o assunto da energia relacionada à mineração no Brasil ainda carece de estudos que consigam analisar cada uma das operações unitárias de forma individualizada, semelhantes a estudos desenvolvidos no Canadá, nos Estados Unidos e na Austrália. Ademais, uma divulgação de dados do setor mineral de forma desagregada por parte da EPE, seja do setor de pelotização, ou mesmo entre as cadeias produtivas que compõem o agregado mineração, far-se-ia importante para o melhor entendimento dos setores de forma distinta, respeitadas suas particularidades e propiciando meios para a avaliação do consumo por meio de indicadores de desempenho energético específicos. Dentro deste contexto, a ANM poderia, além de buscar uma melhoria quanto à qualidade dos dados apresentados (por meio de ações regulatórias), fomentar a realização de estudos setoriais que utilizem os dados de insumos energéticos e de produção mineral como forma de subsidiar as políticas públicas do Ministério de Minas e Energia voltadas à questão energética e dela derivadas (ações relacionadas ao clima, por exemplo) no setor mineral brasileiro. O mesmo se aplica às entidades representativas do setor, como é o caso do IBRAM, onde já se verificam iniciativas neste sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, H.; ABBASPOUR, F. Renewable Energy Systems in the Mining Industry: A Literature Review and Research Agenda. **International Journal of Renewable Energy Research**, Ankara, v. 12, n. 1, p. 569-580, 2022. Disponível em: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/12828/pdf> . Acesso em: 20 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **RALWeb 2022**. [S. l.], 2023a. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SCA/Site/Login.aspx? returnUrl=%2fRAL%2fSite%2fDeclaracoes%2fPesquisarRal.aspx>. [Acesso restrito].

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Observatório da CFEM**. [S. l.], 2023b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizDA5NGMyYmYtOWQyMi00NzA1LWFhOTQtNmU5NjEyMTI3ZDMxIiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection7a43f884dc43352e5953>. Acesso em: 20 jan. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Anuário Mineral Brasileiro Interativo**. [S. l.], 2023c. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizTRkNjI3MWEtMGI3My00ZTgzLWIyN2YtMzNjNDhjNTViM2Q2IiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection99c5eac1c0e9e21725a>. Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília, DF: ANM, 2023d. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf> . Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Sumário Mineral 2017**. Brasília, DF: ANM, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 15 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 50001: Sistemas de gestão da energia – Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ALLEN, M. **Mining energy consumption 2021**. Glasgow: The Weir Group PLC, 2021. Disponível em: <https://www.ceecthefuture.org/resources/mining-energy-consumption-2021>. Acesso em: 18 jan. 2022.

ALMEIDA, P. S. **Intensidade de eletricidade municipal: estudo de caso do estado do Espírito Santo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019. Disponível

em:https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_13860_Pedro%20Secchin%20-%20Disserta%20E7%E3o%20-%20Final.pdf. Acesso em: 26 fev. 2023.

ALMEIDA, C. M.; NEVES, T. C.; FIGUEIREDO, A. C. L. Estudo de viabilidade econômica do uso de correias transportadoras nas operações de lavra de uma mina de minério de ferro. *In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO*, 19., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2018. p. 178-188.

ALVES, W.; FERREIRA, P. V.; ARAÚJO, M. Sustainability in small–medium–artisanal mining enterprises in Brazil. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROJECT EVALUATION*, 3., 2016, Guimarães. **Proceedings [...]**. Guimarães: Universidade do Minho, 2016. p. 87-94. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/53431/1/Sustainability%20in%20Small%20Medium-Wellington.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ALVES, W.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability. **Resources Policy**, Londres, v. 74, article 101648, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101648>. Acesso em: 20 jan. 2022.

AMORIM, F. D.; MARTINS, J. H.; NUNES, A. P. L. Processamento mineral a seco: testes em laboratório com minério de ferro de depósito no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 21375-21398, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-372>. Acesso em 15 jun. 2023.

ARAUJO, A. C. Introdução. *In: VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. (org.). Introdução ao Tratamento de Minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 13-14.

ARAUJO, A. C.; AMARANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, Londres, v. 112, n. 1, p. 54-64, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/037195503225011439>. Acesso em: 30 jan. 2023.

ASR, E. T. A.; KAKAIE, R.; ATAEI, M.; MOHAMMAD, R. T. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 229, p. 213-231, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.029>. Acesso em: 29 dez. 2021.

ATENG, I. A. **Assessing the energy management culture of global leading mining companies: curbing carbon emissions in a world of growing climate change concerns**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Montana Tech, Butte, Estados Unidos da América, 2020. Disponível em: https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rschr/246. Acesso em: 04 jun. 2022.

AZADI, M.; NORTHEY, S. A.; ALI, H. S.; EDRAKI, M. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 13, p. 110-104, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41561-020-0531-3>. Acesso em: 27 out. 2022.

AZNAR-SÁNCHEZ, J. A.; VELASCO-MUÑOZ, J. F.; BELMONTE-UREÑA, L. J.; MANZANO-AGUGLIARO, F. Innovation and technology for sustainable mining activity: a worldwide research assessment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 221, p. 38-54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.243>. Acesso em: 30 mar. 2022.

AWUAH-OFFEI, K. Energy efficiency in mining: A review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 117, p. 89-97, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.035>. Acesso em: 15 jan. 2022.

AWUAH-OFFEI, K. Introduction. *In*: AWUAH-OFFEI, K. (ed.). **Energy efficiency in the minerals industry**. 1st. ed.. Berlim: Springer, 2018. p 1-10.

BALLANTYNE, G. R.; POWELL, M. S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. **Minerals Engineering**, Londres, v. 65, p. 109-114, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BARBATO, C. N.; SAMPAIO, J. A. Determinação experimental do Índice de Trabalho (WI). *In*: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM: MCTI, 2007. p. 179-189.

BONTEMPO, F.; GONTIJO, G.; SANTOS, A.; TEIXEIRA, E.; BRANDÃO, R. Desenvolvimento de modelo geometalúrgico aplicado à cominuição do itabirito compacto de Serra Azul. *In*: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 43., Belo Horizonte, 2013. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2013. p. 1-10.

BOZORGEBRAHIMI, E. **The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining**. 2004. Tese (Doctor of Philosophy in Mining Engineering) – Department of Mining Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 2004. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/831/1.0081125/1>. Acesso em: 24 fev. 2023.

BRASIL MINERAL. **Empresas do Ano do Setor Mineral**. São Paulo: Signus, 2021.

CAMPOS, T. M. **Modelagem matemática da prensa de rolos aplicada a cominuição de minério de ferro**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/18051/1/monopoli10026009.pdf> Acesso em: 24 fev. 2023.

CARLOS, M. R. **Energia nas operações de desmonte de rocha e suas influências na moagem de minérios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/170948>. Acesso em: 24 fev. 2023.

CARLOS, M. R.; KOPPE, J. C. Energy and CO₂ emissions in iron ore mining. *In: WORLD MINING CONGRESS PROCEEDINGS – SUSTAINABILITY IN MINING*, 24., Rio de Janeiro, 2016. **Anais [...]**. Brasília, DF: IBRAM, 2016. p. 149-154.

CARVALHO, B. C. L. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2346>. Acesso em: 24 fev. 2023.

CARVALHO, M.; PEREIRA, C.; NOGUEIRA, F. Evaluation of grinding circuits for iron ore. **REM - International Engineering Journal**, [Ouro Preto], v. 72, p. 161-166, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720037>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CARVALHO, P. S. L. D.; MESQUITA, P. P. D.; REGIS, R. D. D.; MEIRELLIS, T. D. L. Sustentabilidade Socioambiental da Mineração. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 47, p. 333-390, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15361>. Acesso em: 28 out. 2022.

CASTRO, E. F.; RUSSO, J. F. C.; ARAÚJO, D. R.; TURRER, H. D. G.; MACHADO, L. C. R. Constatação dos benefícios da aplicação da prensa de rolos antes das etapas de moagem, deslamagem, flotação e remoagem de minério de ferro. *In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO*, 20., São Paulo, 2019. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2019. p. 1-8.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. *In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). Tratamento de Minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 405-459.

COLUMBIA CENTER ON SUSTAINABLE INVESTMENT; RESPONSIBLE MINING FOUNDATION. **Mineração e os ODS: uma atualização do estado das coisas em 2020**. Amsterdã, CCSI: RMF, 2020. Disponível em: https://www.responsibleminingfoundation.org/app/uploads/RMF_CCSI_Mining_and_SDGs_EN_Sept2020.pdf. Acesso em: 11 jan. 2022.

CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. Classificação e peneiramento. *In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). Tratamento de Minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 225-272.

CURI, A.; FELSCH JUNIOR, W. S.; RODOVALHO, E. C.; MEIRELES, B. P. Evaluation of haul trucks performance in a CSN mine. *In: DREBENSTEDT, C.; SINGHAL, R. Mine Planning and Equipment Selection*. Berlim: Springer, 2014. p. 1143-1150.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2017.

CRU. **CRU International: iron ore cost model**. London, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.crugroup.com/analysis/steelmaking-raw-materials/>. Acesso em: 10 out. 2020.

DELEIVINGNE, L.; GLAZENER, W.; GRÉGOIR, L.; HENDERSON, K. **Climate risk and decarbonization: What every mining CEO need to know**. McKinsey Insights, 2020.

Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Climate%20risk%20and%20decarbonization%20What%20every%20mining%20CEO%20needs%20to%20know/Climate-risk-and-decarbonization-What-every-mining-CEO-needs-to-know.pdf>. Acesso em: 23. fev. 2023.

DELLOITTE. **Tracking the trends 2022: redefining mining**. London, 2022. Disponível em <https://internationalwim.org/wp-content/uploads/2023/01/gx-tracking-the-trends-2022-digital-min.pdf>. Acesso em: 16 set. 2022.

DUFFY, K.; VALERY, W.; JANKOVIC, A.; HAYASHIDA, R. Resource efficient mining processes of tomorrow. *In: FUTURE MINING CONFERENCE*, 3., Sydney, 2015. **Proceedings [...]**. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015. p. 227-238.

DEPARTMENT OF INDUSTRY, SCIENCE, ENERGY AND RESOURCES, **Australian Energy Update 2020**, Australian Energy Statistics, September, Canberra, 2020. Disponível em: https://www.energy.gov.au/sites/default/files/Australian%20Energy%20Statistics%202020%20Energy%20Update%20Report_0.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 14/10: Análise da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010–2019)**. Rio de Janeiro: EPE, 2010. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-270/20100809_4\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-270/20100809_4[1].pdf). Acesso em: 27 jan. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas da Eficiência Energética: Brasil 2019 - Relatório de Indicadores**. EPE: Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-461/Atlas%20da%20Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica%20do%20Brasil%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-461/Atlas%20da%20Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica%20do%20Brasil%20(002).pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional – Ano Base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Manual Metodológico: BEN 2ª Edição**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/BEN%20_%20Manual%202022.pdf. Acesso em: 23 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional Interativo**. [S. l.]: EPE, 2023. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/ben/> Acesso em: 23 fev. 2023.

ENRÍQUEZ, M. A. R. S.; DRUMMOND, J. A. Mineração e desenvolvimento sustentável - dimensões, critérios e propostas de instrumentos. *In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M.*

M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. (eds.). **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**. Rio de Janeiro: CETEM: MCT, 2007. p. 249-275.

FÁVERO, L. P. L.; BELFIORE, P. P. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel, SPSS e Stata**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FELSCH JUNIOR, W. S.; ORTIZ, C. E. A.; CURI, A.; GONÇALVES, D. R.; PINTO, A. A. Environmental and Operational Benefits through Implementing a Fleet Management System in Mining Industry. **International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 109-115, 2020. Disponível em: <https://juniperpublishers.com/ijesnr/pdf/IJESNR.MS.ID.556140.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2022.

FERREIRA, H.; LEITE, M. G. P. A. Life Cycle Assessment study of iron ore mining. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 108, p. 1081-1091, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.140>. Acesso em: 30 nov. 2022.

FERREIRA, H. **Aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção de polpa de concentrado de minério de ferro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3508>.. Acesso em: 24 fev. 2023.

FERNANDES, E. Z.; LEAL, E. M.; FIGUEIREDO, R. L.; REIS, G. P. Analysis of the Energy Efficiency of Diesel Oil Consumption in the Brazilian Iron Ore Mining Company. **Journal of Power and Energy Engineering**, Wilmington, v. 6, n. 11, p. 23-29, 2018. Disponível em: 10.4236/jpee.2018.611003. Acesso em: 15 dez. 2022.

FREITAS, L. S. **Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Acesso em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9N5H6X>. Disponível em: 24 fev. 2023.

GAN, Y.; GRIFFIN, W. M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China – uncertainty and trends. **Resources Policy**, Londres, v. 58, p. 90-96, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.03.015>. Acesso em: 15 jan. 2022.

GARCIA, J. O. **Impactos do rompimento de barragens no setor de mineração sobre o valor das ações**. 2021. Dissertação (Mestrado em Administração) – Centro Universitário Faculdade de Engenharia Industrial, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.fe.i.edu.br/handle/FEI/3232>. Acesso em: 24 fev. 2023.

GAVA, M. C. **Análise Energética de Projetos de Sistemas de Bombeamento de Polpas de Minério de Ferro Mediante Simulação Computacional**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2016. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2014/Dissertacao%20-%20Marcilene.pdf>.. Acesso em: 24 fev. 2023.

GOMES, R. B.; TOMI, G. F. C.; ASSIS, P. S. Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilátero Ferrífero Area. **Minerals Engineering**, v. 70, Londres, p. 201-206, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.019>. Acesso em: 20 jan. 2022.

GORMAN, M. R., DZOMBAK, D. A. A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 137, p. 281-291, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>. Acesso em: 30 abr. 2022.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8MTF32>. Acesso em: 23 fev. 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GROSSI, B. S. **Análise da influência do dimensionamento de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de uma mina a céu aberto**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/3862>. Acesso em: 24 fev. 2023.

HARTMAN, H.; L.; MUTMANSKY, J. **Introductory mining engineering**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

HAQUE, N.; NORGATE, T. Life cycle assessment of iron ore mining and processing. *In*: LU, L. (ed.). **Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2015. p. 615-630.

HEIDER, M. Evolução do parque de pelotização no Brasil. **In the Mine**, São Paulo, ano XV, n. 93, 2021. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/evolucao-do-parque-de-pelotizacao-no-brasil/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

HOLMBERG, K.; KVIKYTÖ–REPONEN, P.; VALTONEN, K.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. **Tribology International**, Londres, v. 115, p. 116-139, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>. Acesso em: 05 jan. 2022.

HOLMES, J. R.; LU, Y.; LU, L. Introduction: Overview of the global iron ore industry. *In*: LU, L. (ed.). **Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. 2nd ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2022. p. 1-55.

HUND, K.; LA PORTA, D.; FABEGAS, T. P.; LAING, T.; DREXHAGE, J. **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition**. World Bank Group: Washington, DC, 2020. Disponível em: <https://pubdocs.worldbank.org/en/9617115>

88875536384 /Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

IGOGO, T.; AWUAH-OFFEI, K.; NEWMAN, A.; LOWDER, T.; ENGEL-COX, J. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. **Applied Energy**, [s. l.], v. 300, article 117375, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>. Acesso em: 15 dez. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics**. Paris: IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-fundamentals-on-statistics..> Acesso em: 27 jan. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>. Acesso em: 17 set. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DA MINERAÇÃO. **II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral**. Brasília, DF: IBRAM, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DA MINERAÇÃO. **Setor Mineral 2022**. Brasília, DF: IBRAM, 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2023/02/Dados-IBRAM-%E2%80%93Setor-Mineral-2022-3.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Políticas Públicas para a Indústria Mineral**. 1. ed. Brasília, DF: IBRAM, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama, Japan: IGES, 2006. v. 2 (Energy). Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf. Acesso em: 19 jun. 2023

JANKOVIC, A.; VALERY, W. Closed circuit ball mill – Basics revisited. **Minerals Engineering**, Londres, v. 43-44, p. 148-153, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.006>. Acesso em: 18 maio 2022.

JANIKOWSKA, O.; KULCZYCKA, J. Impact of minerals policy on sustainable development of mining sector – a comparative assessment of selected EU countries. **Mineral Economics**, [s. l.], v. 34, p. 305-314, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00248-5>. Acesso em: 23 jan. 2022.

JESUS, W. G. M. **Análise do processo de adequação da Usina de Conceição I**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/180143>. Acesso em: 24 fev. 2023.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Energy consumption in mining comminution. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 48, p. 140-145, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>. Acesso em: 13. jan. 2022.

JONUSAN, R. A. S. **Estudo do planejamento energético para o setor de mineração de minério de ferro no estado de Minas Gerais no horizonte 2014/2015, utilizando o modelo ENPEP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear e Energia) – Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOSAWZL9T/1/disserta__o_final_raoni_ad_o.pdf. Acesso em: 24 fev. 2023.

KATTA, A. K.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Development of disaggregated energy use and greenhouse gas emission footprints in Canada's iron, gold, and potash mining sectors. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 152, article 104485, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104485>. Acesso em: 15 dez. 2021.

KATTA, A. K.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold and potash mining sectors. **Journal of Clean Production**, Amsterdã, v. 245, article 118718, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118718>. Acesso em: 05 jun. 2022.

KATTA, A. K. **Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold and potash mining sectors**. 2019. Dissertação (Master of Science in Engineering Management) – Department of Mechanical Engineering University of Alberta, Alberta, 2019. Disponível em: https://era.library.ualberta.ca/items/94af642f-b70b-4fbb-af36-5be47b870288/view/fd211268-7381-4120-af73-c33a6d8038a4/Katta_Anil_K_201907_MSc.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

KARMAZIN, V. V.; BIKBOV, M. A.; BIKBOV, A. A. The energy saving technology of beneficiation of iron ore. **Magnetic and Electrical Separation**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 211-224, 2002. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/archive/2002/082148.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2021.

KLEIN, C; HURLBUT, C. S. **Manual of Mineralogy**. 21st. ed.. New York: John Wiley & Sons, 1999.

KLEIN, B.; WANG, C.; NADOLSKI, S. Energy-efficient comminution: Best practices and future research needs. *In*: AWUAH–OFFEI, K. (ed.). **Energy efficiency in the minerals industry**. 1st. ed.. Berlin: Springer, 2018. p 197-211.

KEENAN, J; KEMP, D; OWEN, J. Corporate responsibility and the social risk of new mining technologies. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Londres, v. 26, n. 4, p. 752-760, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.1717>. Acesso em: 30 dez. 2021.

LEVESQUE, M. **An improved energy management methodology for the mining industry**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Laurentian University of Sudbury, Ontário, Canadá, 2015. Disponível em: <https://zone.biblio.laurentian.ca/handle/10219/2473?mode=full>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LEVESQUE, M.; MILLAR, D.; PARASZCZAK, J. Energy and mining—the home truths. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 84, p. 233-255, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.088>. Acesso em: 01 mar. 2022.

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 275-300.

LIU, L.; JI, H.; LU, X.; WANG, T.; ZHI, S.; PEI, F.; QUAN, D. Mitigation of greenhouse gases released from mining activities: A review. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 28, p. 513-521, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12613-020-2155-4>. Acesso em: 05 jun. 2022.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**, 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM:MCTIC, 2010. p. 3-18.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**, 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 3-23.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M.; BRAGA, P. F. A. Cominuição: Britagem e moagem. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**, 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 135-183.

MACÍA, M. Y.; PEDRERA, J.; CASTRO, M. T.; VILALTA, G. Analysis of Energy Sustainability in Ore Slurry Pumping Transport Systems. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 11, article 3191, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11113191>. Acesso em: 04 jan. 2022.

MARÍN, A.; GOYA, D. Mining-The dark side of the energy transition. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, [s. l.], v. 41, p. 86-88, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.09.011>. Acesso em: 13 maio 2023.

MARÉ, E.; BEVEN, B.; CRISAFIO, C. Developments in nonmagnetic physical separation technologies for hematitic/goethitic iron ore. *In*: LU, L.(ed.). **Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. 1st. ed. Sawston:Woodhead Publishing, 2015. p. 309-338.

MATIOLO, E.; COUTO, H. J. B.; NEYMAYER, L.; SILVA, K.; FREITAS, A. S. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. **Minerals Engineering**, Londres, v. 158, article 106608, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106608>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MATOS, T. P. P. **Análise espaço-temporal do oxigênio dissolvido no Açude Castanhão, Ceará, Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Energia e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022. Disponível em <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3151/1/THARCIA%20PRISCILLA>

A%20DE%20PAIVA%20BATISTA%20MATOS%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf.
Acesso em: 11 maio 2023.

MFUMU; K. M. **Aplicação da avaliação do ciclo de vida no cálculo do fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/215151>. Acesso em: 24 fev. 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília, DF: MCTI, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>. Acesso em: 23 out. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Inventários Corporativos**. [S. l.], 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao/arquivo/Inventrio_2022_janago.xlsx. Acesso em: 24 out. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de mineração e pelletização**. Brasília, DF: MCTI, 2017.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **ComexStat: Exportação e Importação Geral**. [S. l.], 2022. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 20 fev. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Técnico 18: Perfil do minério de ferro**. Brasília, DF: SGM/MME, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-estal-1/a-mineracao-brasileira/documentos/p09_rt18_perfil_da_mineraxo_de_ferro.pdf/@@download/file.. Acesso em: 08 jan. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração: Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC)**. Brasília, DF: MME, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/plano-setorial-de-mitigacao-e-de-adaptacao-a-mudanca-do-clima-na-mineracao-arquivo-doc/@@download/file..> Acesso em: 20 jan. 2022.

MIRANDA, B. M.; VIEIRA, T. A.; DELGADO, S. S.; CABRAL, A. G.; ANDRADE, F. O. Comparação do consumo de energia e a produtividade de uma perfuratriz elétrica e uma perfuratriz a diesel de grande porte em uma mineradora em Itabira, Minas Gerais. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 26., João Pessoa, 2016. **Anais [...]**. João Pessoa: ABEPRO, 2016. p. 1-14.

MONTEIRO, N. B. R., SILVA, E. A., MOITA NETO, J. M. Sustainable Development Goals in Mining. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 228, p. 509-520, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.332> .Acesso em: 22 jan. 2022.

MORAES, S. L.; RIBEIRO, T. R. Brazilian Iron Ore and Production of Pellets, **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, Londres, v. 40, n. 1, p. 16-23, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1481056>. Acesso em: 17 dez. 2021.

MOURÃO, J. M. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico**: NT do minério de ferro e pelotas e situação atual e tendências 2025. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Nota+Tecnica+TR02+MINERIO+DE+FERRO+E+PELOTAS_rev_04_4766.pdf/e4611287-faa1-4244-b9a2-931c42385229?version=1.0. Acesso em: 20 jan. 2022.

MOURÃO, J. M. **Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro**. Vitória: Conceitual Consultoria Mínero-Siderúrgica, 2017. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/download/file/aspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacao-de-minerio-de-ferro>. Acesso em: 23 out. 2022.

MUDD, G. M. Sustainable/Responsible Mining and Ethical Issues related to the Sustainable Development Goals (SDGs). **Geological Society of London**, London, v. 508, p. 187-199, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/SP508-2020-113>. Acesso em: 15 dez. 2021.

NAPIER-MUNN, T. Is progress in energy-efficient comminution doomed?. **Minerals Engineering**, Londres, v. 73, p. 1-6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.009>. Acesso em: 15 jan. 2022.

NASCIMENTO, J. C. S.; NASCIMENTO, J. S. S.; RIBEIRO, P. S.; MELO, S. B. F.; SOUSA, L. M.; REIS, P. S. G.; SILVA, L. A. B.; CARVALHO, L. V. Mineração através do beneficiamento à seco em Canaã dos Carajás-PA: alternativa para a barragem de rejeitos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 80788-80800, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/18652/15020>. Acesso em: 15 abr. 2022.

NATURAL RESOURCES CANADA. **Benchmarking the energy consumption of Canadian Open-Pit Mines**, 2005. Disponível em: 1939B_OEE_OpenPit-e4 (canada.ca). Acesso em: 21 jan. 2022.

NEVES, T. V.; SILVA, L. S. S.; SÃO JOSÉ, F.; PEREIRA, C. A. Caracterização da moagem de um itabirito anfíbolítico: estudo de Work Index. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 28., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABM, 2019. 8 p. Disponível em: <https://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/058.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, Londres, v. 42, p. 13-21, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.012>. Acesso em: 15 dez. 2021.

NORGATE, T., HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 18, n. 3, p. 266-274, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>. Acesso em: 10 dez. 2021.

OLIVA FILHO, A. L. Elementos de estatística. **Brazilian Journal of Anesthesiology**, Brasil, v. 40, n. 2, p. 119-132, 1990. Disponível em: <https://bjan-sba.org/article/5e498b830aec5119028b468f> .. Acesso em: 24 maio 2023.

OMOTEHINSE, A.; TOMI, G. Impact of mining activities on the achievement of sustainable developments goals. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE MINERALS INDUSTRY*, 9., 2019, Sidney. **Anais [...]**. Sidney: SDIMI, 2019. p. 58-61. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Hitch/publication/333602583_Social_license_from_a_European_perspective/links/5cf633a992851c4dd026fd09/Social-license-from-a-European-perspective.pdf#page=68. Acesso em: 26 fev. 2023.

PALÁCIOS, L. T. **Realidad estratégica de la sostenibilidad de los recursos naturales: la explotación del hierro**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2012. Disponível em: <https://oa.upm.es/14774/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

PALÁCIOS, L. T. Natural resources sustainability: iron ore mining. **Dyna**, Medelin, v. 78, n. 170, p. 227-234, 2011. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000600027. Acesso em: 15 jan. 2022.

PALAMURE, S. D. **Energy efficiency and carbon dioxide emissions across different scales of iron ore mining operations in Western Australia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Ciência, Edith Cowan University, Austrália, 2016. Disponível em: <https://ro.ecu.edu.au/theses/1936>. Acesso em: 13 nov. 2021.

PATTERSON, S. R.; KOZAN, E.; HYLAND, P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. **European Journal of Operational Research**, Amsterdã, v. 262, n. 2, p. 759-770, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.081>. Acesso em: 14 jan. 2022.

PARK, J.; KIM, K. Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine. **International Journal of Mining Science and Technology**, Amsterdã, v. 30, n. 2, p. 179-188, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.12.021>. Acesso em: 30 jan. 2022.

PERALTA, S.; SASMITO, A. P.; KUMRAL, M. Reliability effect on energy consumption and greenhouse gas emissions of mining hauling fleet towards sustainable mining. **Journal of Sustainable Mining**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 85-94, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.08.002>. Acesso em: 28 dez. 2021.

PERLIN, A. P.; GOMES, C. M.; KNEIPP, J. M.; MOTKE, F. D. Practices of energy use management and sustainable performance in Brazilian mineral industries. **Environmental Quality Management**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 143-153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tqem.21566>. Acesso em: 13 dez. 2021.

PEREIRA, M. K. **Análise comparativa entre caminhões fora de estrada na mineração: através de indicadores de desempenho**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação

em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11816>. Acesso em: 24 fev. 2023.

PIMENTEL, B. S.; GONZALEZ, E. S.; BARBOSA, G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 112, p. 2145-2157, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.023>. Acesso em: 02 dez. 2022.

PINTO, P. H. F. **Desenvolvimento de rotas para cominuição de itabiritos compactos do quadrilátero ferrífero**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-19072016-085459/pt-br.php>. Acesso em: 22 fev. 2023.

PINTO, P. F.; DELBONI, H. Comminution circuits for compact itabirites. **REM-International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 69, n. 3, p. 355-359, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/remi/a/cXr5chB7rpHZHmQXKzGVhsJ/>. Acesso em: 05 dez. 2021.

POSSA, M. V.; NASCIMENTO, C. R.; FRANÇA, S. C. A. Reologia no tratamento de minérios. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**, 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 549-594.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas: Mapeando os objetivos de desenvolvimento sustentável na mineração**, 2017. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/publications/atlas-mapeando-os-objetivos-de-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel-na-minera%C3%A7%C3%A3o..> Acesso em: 10 jan. 2022.

PURHAMADANI, E.; BAGHERPOUR, R.; TUDESHKI, H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 291, article 125228, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>. Acesso em: 13 fev. 2022.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/163322>. Acesso em: 23 fev. 2023.

RAMANI, R. V. Surface mining technology: progress and prospects. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 46, p. 9-21, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.440>. Acesso em: 20 dez. 2021.

RIBEIRO, B. G. C. **Estudo de viabilidade econômica para a implantação de correias transportadoras de ROM de minério de ferro: estudo de caso da Mina Fábrica em**

Congonhas, Estado de Minas Gerais, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3447> . Acesso em: 23 fev. 2023.

RIBEIRO, B. G.; SOUSA, W. T.; LUZ, J. A. Feasibility project for implementation of conveyor belts in an iron ore mine. Study case: Fabrica Mine in Minas Gerais State, Brazil. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 69, p. 79-83, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672013690021>. Acesso em: 05 jan. 2022.

RODOVALHO, E. C.; LIMA, H. M.; TOMI, G. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 172, p. 177-185, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.048>. Acesso em: 13 jan. 2022.

ROY, P. P. Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 14, article 652, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06949-z>. Acesso em: 04. jan. 2022.

SAHOO, L. K.; BANDYOPADHYAY, S.; BANERJEE, R. Benchmarking energy consumption of truck haulage. *In*: AWUAH-OFFEI, K. (ed.). **Energy Efficiency in the Minerals Industry**. 1st. ed. Berlim: Springer, 2018. p. 159-180.

SALAZAR, M. Decomposição do consumo de energia na indústria brasileira: efeitos do aumento da atividade entre 1970-2019. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 27, n. 1, p. 81-104, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i1.582>. Acesso em: 15 dez. 2021.

SAMARCO. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. [S. l.], 2021 Disponível em: https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2022/08/Samarco_Relatorio-Sustentabilidade-2021-1.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; GONZAGA, L. M. Separação magnética e eletrostática. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**, 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 341-379.

SALES, A.; TOMI, G.; NOGUEIRA, B. A.; GODOY, P. H. Increased power efficiency in mining by using high-fidelity haul truck simulation. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 73, n. 1, p. 93-98, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672018730058>. Acesso em: 15 dez. 2021.

SAMPAIO, J. A.; DELBONI JUNIOR, H. Cominuição: Princípios da cominuição. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 107-131.

SANCHIDRIÁN, J. A.; SEGARRA, P.; LÓPEZ, L. M. Energy efficiency in rock blasting. *In*: AWUAH-OFFEI, K. (ed.). **Energy Efficiency in the Minerals Industry**. 1st edition. Berlim: Springer, 2018. p. 87-118.

SEGURA-SALAZAR, J.; TAVARES, L. M. Eco-eficiência no projeto de circuitos de cominuição: o caso brasileiro. *In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS*, 45., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2015. p. 544-554. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/eco-eficiencia-no-projeto-de-circuitos-de-cominuicao-o-caso-brasileiro>. Acesso em: 26 fev. 2023.

SEGURA-SALAZAR, J.; SANTOS, N. S. L.; TAVARES, L. M. Holistic Pre-Feasibility Study of Comminution Routes for a Brazilian Itabirite Ore. **Minerals**, [S.l.], v. 11, n. 8, article 894, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min11080894>. Acesso em: 15 jan. 2022.

SILVA, J. M. **Apostila da Disciplina Lavra Subterrânea**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

SILVA, J. P. M.; OLIVEIRA, P. S.; FIGUEIREDO, A. C. L.; GUIMARÃES, M. G.; SILVA, F. T.; VIEIRA, M. G. Aumento da eficiência energética na moagem secundária do Concentrador I. *In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS*, 16., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2015. p. 874-881. Disponível em: https://www.artigos.entmme.org/download/2015/cominui%C3%87%C3%83o/SILVA,%20J.P.M._OLIVEIRA,%20P.S._FIGUEIREDO,%20A.C.L._GUIMARAES,%20M.G.G._SILVA,%20F.T._VIEIRA,%20M.G._%20-%20AUMENTO%20DA%20EFICI%C3%8ANCIA%20ENERG%C3%89TICA%20NA%20MOAGEM%20SECUND%C3%81RIA%20DO%20CONCENTRADOR%20I.pdf. Acesso em: 15 fev. 2023.

SOARES, L.; BOSCOV, M. E. G. Barragem de rejeitos. *In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (eds.). Tratamento de Minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018. p. 845-907.

SOOFASTAEI, A.; KARIMPOUR, E.; KNIGHTS, P.; KIZIL, M. S. Energy-efficient loading and hauling operations. *In: AWUAH-OFFEL, K. (ed.). Energy Efficiency in the Minerals Industry*. 1st edition. Berlin: Springer, 2018. p. 121-146.

SOOFASTAEI, A.; FOULADGAR, M. Improve Energy Efficiency in Surface Mines Using Artificial Intelligence. *In: SHAHZAD, S (ed.). Energy Efficiency*. Londres: IntechOpen, 2021. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/79641>. Acesso em: 04 jun. 2022.

STELA, L. H.; DUARTE, J. C.; PEREIRA, C. O. Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 34-45, 2020. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/article/view/8>. Acesso em: 26 nov. 2022.

TAVARES, F. V.; MONTEIRO, L. P. C. Uso de Indicadores de Eficiência Energética em Plantas de Produção de Amônia. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 261-269, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.22409/engevista.v15i3.453>. Acesso em: 13 abr. 2022.

TURRER, H. D. G.; SAWASATO, E. Y.; GUIMARÃES, F. R.; MAGALHÃES, C. R.; DIAS, G. S.; RUSSO, J. C.; PIMENTEL, D. A.; MAZZINGHY, D. B. Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos do depósito da Serra dos Sapos. *In:*

SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 43., 2013, Belo Horizonte. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2013. p. 278-286.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy and environmental profile of the U.S. mining industry**. [S. l.]: US DOE, 2002. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/overview.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Mineral industry energy bandwidth study**. [S. l.]: US DOE, 2007. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/iedo/articles/us-mining-industry-energy-bandwidth-study..> Acesso em: 18 jan. 2022.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2022**. Reston, Virginia: USGS, 2021. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.

VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JR, H. A. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10Be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1409-1425, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v33n5/v33n5a32.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.

VASCONCELOS, J. A.; BRANDÃO, P. R. G.; LEMOS, L. N. Estudos de caracterização e concentração de itabirito compacto do Complexo Serra Azul, MG. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 89-94, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2012.014>. Acesso em: 10 jan. 2022.

VASCONCELOS, J. A. **Panorama do consumo energético na produção de minério de ferro e proposição de medidas de eficiência energética**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Eficiência Energética) – Pós-Graduação em Eficiência Energética, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Disponível em: <https://pergamum.ifes.edu.br/pergamumweb/vinculos/00001a/00001ace.pdf>. Acesso em: 10. jul. 2023.

VASCONCELOS, J. A.; JESUS, R. G.; SANTOS, Y. C. S. Panorama do consumo energético na produção brasileira de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. **Latin American Journal of Energy Research**, São Mateus, v. 8, n. 2, p. 37-48, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n2.p37-48>. Acesso em: 20 fev. 2022.

VIANNA, I. Q. **Inovação tecnológica no processo de cominuição da pelotização: substituição da moagem a úmido por multiprensagem a umidade natural**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Disponível em https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_15576_Dissertac%26%23807%3Ba%26%23771%3Bo%20-%20Igor%20Vianna%20-%20Inovac%26%23807%3Ba%26%23771%3Bo%20Tecnolo%26%23769%3Bgica%20Pelotizac%26%23807%3Ba%26%23771%3Bo%20%20Vers%E3o%20para%20Defesa%20%28%29.pdf. Acesso em: 24 fev. 2023.

VILAÇA, A. S. I.; SIMÃO, L.; MONTEDO, O. R. K.; OLIVEIRA, A. P. N.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resources Policy**, [s. l.], v. 75, article 102477, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102477>. Acesso em: 01 mar. 2023.

WANG, Q.; ZHANG, R.; LV, S.; WANG, Y. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Londres, v. 43, article 100977, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100977>. Acesso em: 05 jan. 2022.

WU, J.; YANG, J.; MA, L.; LI, Z.; SHEN, X. A system analysis of the development strategy of iron ore in China. **Resources Policy**, [s. l.], v. 48, p. 32-40, 2016. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/jrpoli/v48y2016icp32-40.html>. Acesso em: 30 mar. 2022.

ANEXO A – AUTORIZAÇÃO PARA USO DOS DADOS DO RAL



AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM)

DESPACHO Nº 125175/SEFAM-ES/ANM/2021

Processo: 48076.000350/2021-51

Interessado(s): YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

Destinatário(s): Gerência de Economia Mineral

Prezada Gerente da Economia Mineral da ANM/ES,

Considerando que no resultado parcial do processo seletivo do Programa de Pós Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) figure como Classificado, o que traduzirá, brevemente na aprovação do Processo Seletivo;

Considerando que o **anteprojeto** apresentado na seleção do PPGES versa sobre a **questão da análise da energia de forma holística em atividades de mineração** (vide SEI nº 3000000) no contexto da SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, e que nos procedimentos metodológicos, pretende-se utilizar os dados básicos do **Relatório Anual de Lavra (RAL)**, sejam estas: descrição das minas operacionalizadas (localização, situação operacional, metodologia de lavra etc.), volume de ROM, produção beneficiada, equipamentos, insumos utilizados na mina (diesel, explosivos etc.), consumo de combustível por matriz energética, teores dentre outros, venho requerer **AUTORIZAÇÃO para USO e DIVULGAÇÃO das informações acima destacadas**, sob a FUTURA forma de DISSERTAÇÃO/ARTIGO, destacando que estas informações NÃO contemplarão dados sobre nomes de MINA e EMPRESAS, sendo que esta divulgação acontecerá de forma AGREGADA por **setor, metodologia de lavra ou porte das operações**. Ademais, destaco que em hipótese alguma, ocuparei os servidores desta GEMI na obtenção destas informações, sendo esta, de exclusiva responsabilidade deste servidor (consulta aos RAL's, AMB, dados abertos dentre outros), o qual será realizada em horário distinto à jornada de trabalho do servidor.

Por fim, solicito o DEFERIMENTO deste requerimento, colocando-me a disposição para quaisquer informações adicionais que por venturam sejam necessárias.



Documento assinado eletronicamente por **Yolacir Carlos de Souza Santos, Especialista em Recursos Minerais (art. 1º da Lei 11.046/2004)**, em 17/09/2021, às 16:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM)

DESPACHO Nº 126322/GEMI/ANM/2021

Processo: 48076.000350/2021-51

Interessado(s): YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

Destinatário(s): YOLACIR CARLOS DE SOUZA SANTOS

Prezado Sr. Yolacir,

Esta GEMI defere o pedido de uso e divulgação dos dados constantes no Relatório Anual de Lavra citados no documento 2999944, desde que sejam cumpridos os atos legais vigentes sobre sigilo de dados.

Atenciosamente,

Karina Andrade Medeiros

Gerente de Economia Mineral Substituta



Documento assinado eletronicamente por **Karina Andrade Medeiros, Gerente de Economia Mineral, Substituta**, em 21/09/2021, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.