



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2021) v. 8, n. 2, pp. 37–48
<https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n2.p37-48>

Panorama do consumo energético na produção brasileira de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero

Overview of energy consumption in Brazilian iron ore production in the Quadrilátero Ferrífero

João Antônio Vasconcelos^{1,*}, Renata Gomes de Jesus², Yolacir Carlos de Souza Santos¹

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética, Instituto Federal do Espírito Santo-Ifes, campus Vitória, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética, Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, campus Vitória, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: vasconcelos_ufop@yahoo.com.br

Received: 02 September 2021 | Accepted: 23 September 2021 | Published online: 09 January 2022

Resumo: O Brasil destaca-se na produção de minério de ferro, o que demanda grandes quantidades de insumos energéticos nas etapas produtivas. Neste sentido, as principais fontes de energia na mineração são: a eletricidade, óleo diesel, explosivos e gás natural ou óleo pesado (pelotização), que demandam altos níveis de energia. Na última década observou-se uma tendência de diminuição do teor de ferro nas reservas minerais, o que se faz necessário, cada vez mais a busca de formas mais eficientes de processos e menor consumo energético na cadeia produtiva, com intuito de reduzir os custos operacionais e emissão de gás carbônico na atmosfera. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento na última década do consumo energético global na produção de minério de ferro num complexo mineiro formados por várias minas e usinas, situados no Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais, Brasil. Para tal, utilizou-se a pesquisa documental com abordagem quantitativa não-probabilística baseado nos dados disponíveis nos Relatórios Anuais de Lavra e, posteriormente, avaliou-se as medidas de melhorias em termos de eficiência energética, de acordo com a literatura existente. Os resultados mostraram que as características e teores do minério, o planejamento adequado da lavra, a relação estéril/minério, a complexidade dos processos da usina e alternativas de transporte, podem ser determinantes no consumo de energia. Em geral, conclui-se que deve sempre buscar uma integração com gestão e eficiência energéticas nas diferentes etapas produtivas, de forma a obter otimização operacional, economia de recursos e ganhos socioambientais.

Palavras-chave: Mineração, minério de ferro, gestão de energia e eficiência energética.

Abstract: *The Brazil stands out in the production of iron ore, which demands large amounts of energy inputs in the production stages. The main energy sources in mining are electricity, diesel oil, explosives and natural gas or heavy oil (pelletizing), which demand high levels of energy. In the last decade there has been a tendency for the iron content in mineral reserves to decrease, which makes it increasingly necessary to search for more efficient processes and lower energy consumption in the production chain, in order to reduce operational costs and carbon dioxide emissions into the atmosphere. Thus, this project aimed to evaluate the behavior in the last decade of the global energy consumption in the production of iron ore in a mining complex formed by several mines and plants, located in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. To this end, we used desk research with a non-probabilistic quantitative approach based on the data available in the Annual Mining Reports and then evaluated the measures for energy efficiency improvements, according to the existing literature. The results showed that ore characteristics and grades, proper planning of mining, the ratio of waste rock to ore, the complexity of the mill processes, and transportation alternatives can be determinants of energy consumption. In general, it is concluded that one should always seek an integration with energy management and efficiency in the different production stages, in order to obtain operational optimization, resource savings and socio-environmental gains.*

Keywords: mine, iron ore, energy management, energy efficiency.

1. Introdução

O Brasil se destaca na produção mundial de minerais essenciais no campo de aplicação do setor energético e outros, com destaque para o minério de ferro, ouro, níquel, lítio, nióbio, tântalo, titânio, vanádio, manganês, alumínio e outros em menor proporção (USGS, 2021), que juntos geram uma receita bruta da ordem de R\$ 193 bilhões (ANM, 2021), sendo que o minério de ferro com 73 minas e 64 usinas em operação (ANM, 2020) possui uma participação de 73,9% no valor da produção mineral comercializada, cujos principais estados produtores são Minas Gerais e Pará (ANM, 2021).

Entretanto, os depósitos minerais constituem uma fonte de recurso não renovável, cujo aproveitamento, em função da redução dos teores dos minérios, aumento da produção e aumento da profundidade dos depósitos, é dependente, cada vez mais, da utilização de fontes de energia de maior rendimento (Jonusan, 2017).

Nesta seara, para produção de minério de ferro são necessárias diversas etapas produtivas: perfuração, desmonte, carregamento, transporte, cominuição, classificação, concentração de minérios, espessamento ou filtragem e disposição de estéril / rejeitos, das quais são dispendidas grandes demandas energéticas, como eletricidade, óleo diesel e gás natural ou óleo pesado, no caso de pelletização (Northey, Haque, e Mudd, 2013; Jeswiet et al., 2015; Ferreira e Leite, 2015; Holmberg et al., 2017).

O setor de mineração e pelletização consumiram 28.109,71GWh de energia total (elétrica e outras fontes) no ano de 2019, sendo que uma das principais fontes de energia é a eletricidade que corresponde a 47,0% (EPE, 2021). Em específico, no Estado de Minas Gerais, o setor extrativo mineral, incluindo a pelletização, é um dos grandes consumidores de energia, especialmente de eletricidade (1ª maior demanda), gás natural (2ª maior demanda) e óleo diesel (3ª maior demanda) (Jonusan, 2017).

Ressalta-se que, no Brasil, não existe uma política governamental de longo prazo específica para o uso eficiente da energia na indústria, o que reflete na baixa prioridade dos programas federais, nos investimentos de fundos setoriais e nas condições de financiamento para eficiência energética.

De acordo com Guardia (2010) foram avaliados 217 projetos de eficiência energética industrial nos últimos 10 anos, desenvolvidos dentro do Programa de Eficiência Energética (PEE) (Lei nº 9.991/2000), sob regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 13 áreas distintas, incluindo o setor mineral com 11 projetos. Os resultados gerais apontaram que por meio de um investimento de R\$161 milhões nos projetos foi possível gerar uma economia de 626GWh, o que apresenta um custo da energia conservada (CEC) de R\$79/MWh, ou seja, uma economia anual de aproximadamente R\$50 milhões e um *pay-back* em torno de 3 anos.

Apesar dos investimentos e programas implementados, no Brasil apenas 6% do uso final de energia em 2017 foi coberto por políticas obrigatórias de eficiência energética (IEA, 2019), logo, é de extrema importância mapear e diagnosticar o consumo energético na produção de minério de ferro com intuito de identificar oportunidades de melhoria em termos de eficiência energética e estabelecimentos de políticas públicas.

2. Metodologia

A escassez de informações e parâmetros para acompanhamento da demanda energética no setor mineral, em especial na produção de minério de ferro, prejudica o estabelecimento de políticas públicas e pode gerar perdas de cunho socioambiental. Logo, o mapeamento do consumo energético e verificação das medidas de conservação de energia, tornam-se essenciais para criação de gestão energética efetiva. Desta maneira, este trabalho, busca identificar o consumo energético global na produção de minério de ferro na última década (2010 a 2019) no complexo mineiro denominado Quadrilátero Ferrífero (MG). Para tal, utilizou-se a pesquisa aplicada e o método científico hipotético-dedutivo com uma abordagem quantitativa não-probabilística. Para isto, o procedimento técnico foi baseado numa pesquisa documental e bibliográfica conforme etapas indicadas na Figura 1, cuja área alvo de estudo foi o complexo mineiro da região do Quadrilátero Ferrífero, localizado no Estado de Minas Gerais. Nesta seara, a pesquisa documental baseou-se nos Relatórios Anuais de Lavra (RAL) enviados pelas empresas do setor mineral ao Sistema Eletrônico RALWeb da Agência Nacional de Mineração (ANM). Estes relatórios são enviados anualmente conforme o cadastro nacional de pessoas jurídicas (CNPJ) da matriz ou filial ou o cadastro de pessoas físicas (CPF), e contém diversas informações relacionadas às atividades de mineração, tais como as minas e usinas inseridas na área de processos minerários ou agrupamento destes.

No caso específico, para análise do setor produtivo de minério de ferro considerou-se somente os processos minerários em fase de concessão de lavra ou manifesto de mina de uma grande empresa produtora de minério de ferro, ou seja, que possuem títulos autorizativos de lavra outorgados pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

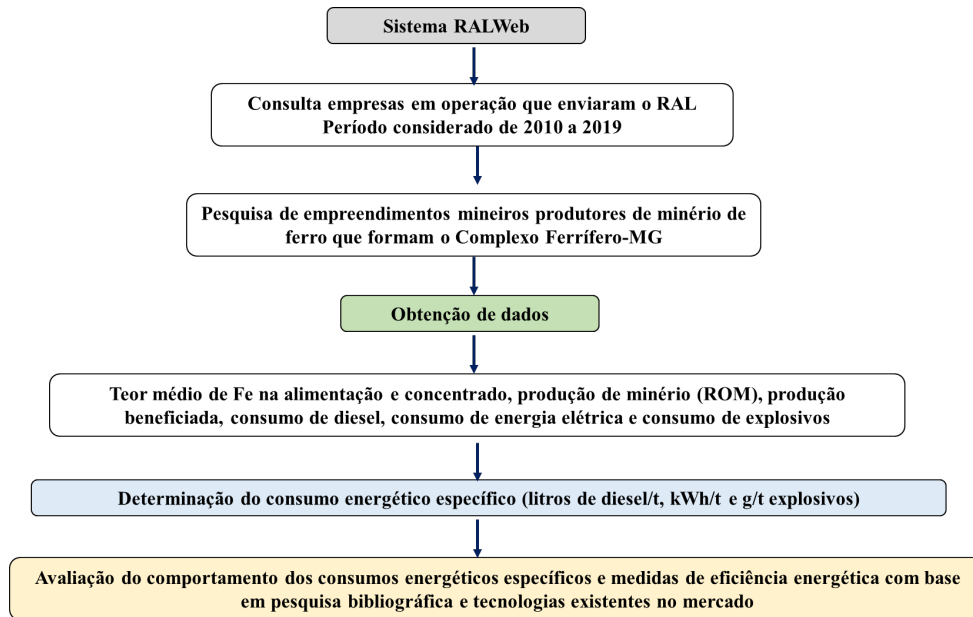


Figura 1. Etapas necessárias para obtenção e tratamento dos dados.

Ressalta-se que durante a depuração dos dados existentes nos RAL verificou-se que no período estudado, a empresa responsável pelo envio, apresentou as informações em diferentes CNPJ e ainda lançou as fontes energéticas (diesel, energia elétrica e explosivo) para um determinado grupo de minas e usinas, prejudicando a análise de forma individualizada. Nesta esteira, optou-se por realizar a análise das principais minas e usinas de forma global, situadas no Estado de Minas Gerais.

Com base nas informações declaradas pela empresa nos RAL, foi considerado neste trabalho, como Complexo Quadrilátero Ferrífero, o conjunto formado por 18 (dezoito) usinas de tratamento de minério, sendo elas: Cauê, Conceição I, Conceição II, Água Limpa, Gongo Soco, Brucutu, Timbopeba, Fazendão, Alegria, Fábrica Nova, Feijão, Fábrica, ITM Pico, ITM Vargem Grande, ITM Abóboras, ITM Mutuca, ITM Azul e ITM Jangada.

Ainda em consulta aos RAL, de posse das usinas selecionadas, foram verificados quais as minas que alimentação as referidas usinas, sendo identificadas 19 (dezenove) minas a seguir (Figura 2): minas do Meio, Cauê, Conceição Lavra, Água Limpa Lavra, Gongo Soco Lavra, Brucutu Lavra, Timbopeba, Fazendão, Alegria Lavra, Fábrica Nova, Córrego do Feijão, Fábrica Lavra, mina do Pico, Tamanduá, Capitão do Mato, Abóboras, Capitão Xavier, Mar Azul e Jangada. Em sequência, foi realizada uma depuração dos dados no Sistema Eletrônico RALWeb da ANM no período de 2010 a 2019, de onde foram levantados anualmente por mina e usina do complexo mineiro estudado, os seguintes dados: teor médio de ferro na alimentação da usina, produção de minério (ROM) em toneladas, quantidade de estéril em toneladas, quantidade de minério na alimentação das usinas em toneladas, produção beneficiada global em toneladas, recuperação mássica na usina, consumo de energia elétrica por geração de terceiros, própria e global (kWh/ano), consumo de diesel (litros) e consumo de explosivos (kg).

Ainda com base nos dados do RAL ano-base 2019 foram levantados o quantitativo dos principais equipamentos das usinas e minas. Estes dados, por serem gerados em arquivo na extensão “pdf” foram selecionados individualmente, ano a ano conforme CNPJ e posteriormente, lançados e tratados quantitativamente no software Excel, associando aos conjuntos de usina e mina para calcular o consumo específico de diesel (l/t minério bruto e l/t beneficiada), relação estéril/minério, distribuição da geração de terceiros e própria de energia elétrica, consumo específico de energia elétrica (kWh/t beneficiada), distribuição da matriz energética, consumo global de energia (kWh/t) e consumo específico de explosivo (g/t) no período mencionado por meio de histogramas para avaliar possíveis oscilações, tendências e correlação com a produção.

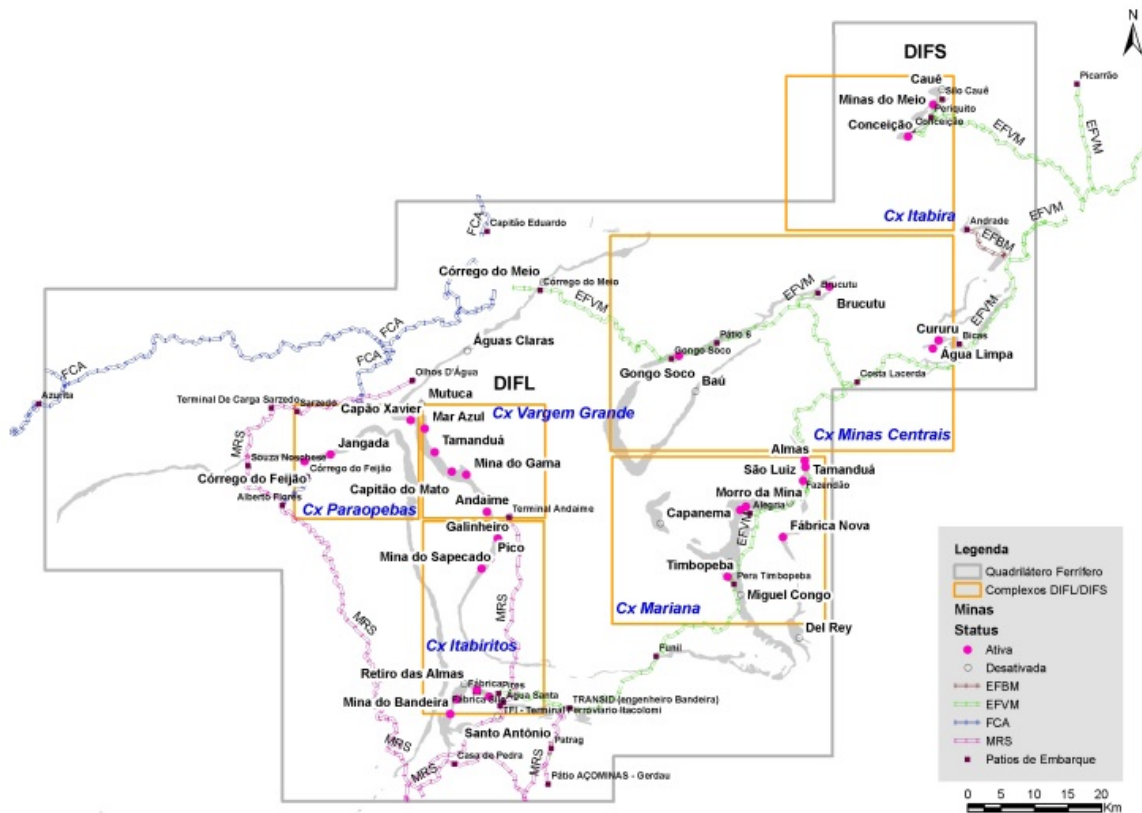


Figura 2. Mapa ilustrativo do Quadrilátero Ferrífero envolvendo os complexos mineiros estudados. Fonte: Vale (2017).

Para a obtenção da distribuição da matriz energética, as principais fontes de energia (eletricidade, diesel e explosivo) foram convertidas primeiramente em megajoule (MJ) e depois em GWh para avaliar a tendência temporal no período estudado, bem como verificar qual a fonte principal no ciclo produtivo. Para o explosivo, utilizou-se para conversão em MJ, a relação de 1kg de ANFO (nitrato de amônio + diesel) igual a 2,3MJ (Orica, 2008), tendo em vista que quase todo explosivo utilizado nas operações de desmonte de minério de ferro é a base deste tipo de explosivo. Enquanto para o diesel utilizou-se para conversão em MJ, a relação de 1 litro de diesel para 35,5MJ (EPE, 2019).

Já para o cálculo do consumo global de energia do complexo, o somatório das fontes energéticas (óleo diesel, energia elétrica e explosivo) em megajoules foram convertidas previamente em kWh e posteriormente obtido o consumo específico em kWh por toneladas de alimentação das usinas com o intuito de comparar os resultados aos padrões estabelecidos nos relatórios de eficiência energética do Departamento de Energia dos Estados Unidos para o setor de mineração de metálicos (DOE, 2007).

3. Resultados e discussões

3.1 Distribuição da matriz energética

Os principais insumos energéticos utilizados na produção de minério de ferro são basicamente: o óleo diesel, energia elétrica e explosivos (Carlos, 2017). Existe também a utilização de gasolina para abastecimento de veículos leves e gás liquefeito de petróleo (GLP) para aquecimento. Todavia, os números são insignificantes na análise da matriz energética, tendo em vista a pequena quantidade utilizada quando comparado as outras fontes principais de energia conforme mostrada nas Figuras 3 e 4.

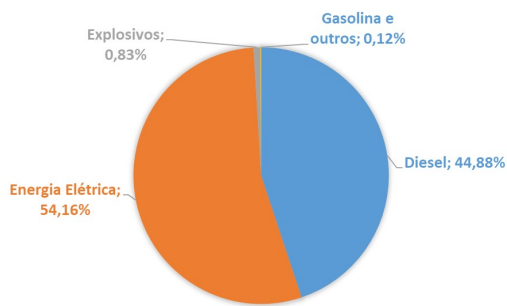


Figura 3. Distribuição das fontes energéticas que compõe o Complexo Quadrilátero Ferrífero.

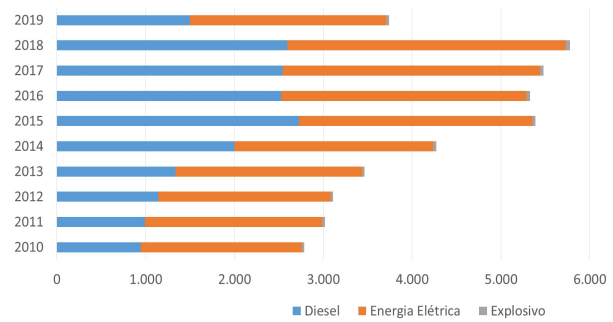


Figura 4. Evolução da matriz energética no Complexo Carajás em GWh.

Observou-se que a energia elétrica é responsável por cerca de 54% da matriz energética para produção de minério de ferro, seguida pelo diesel com 44,88%. Tais fatos, podem ser explicados, respectivamente pela necessidade de maior uso de energia elétrica no tratamento de minérios, principalmente quando se tem uma tendência de queda no teor de ferro e maior distância de transporte das minas até a usina. Como pode ser observado, a contribuição do explosivo e gasolina na matriz energética é ínfima, quando comparada das demais fontes energéticas.

A evolução das principais fontes na matriz energética no período de 2010 a 2019 podem ser verificados na Figura 4, sendo verificado um aumento crescente da matriz energética, com pico de máximo consumo em 2018, onde alcançou um total de 5.776,84 GWh, sendo a energia elétrica responsável por 54% deste consumo. No que tange a utilização de energia elétrica, cerca de 58,7% são utilizadas na etapa de moagem (Jonusan, 2017) devido a necessidade de obter um produto de menor granulometria e/ou propiciar a liberação de minerais úteis do minério para posterior concentração. Em nível mundial, de toda a energia necessária na mineração de minerais metálicos nos Estados Unidos, 53,68% foram gastas na etapa de moagem e 21,90% nos equipamentos a diesel (DOE, 2007).

3.2 Teor de ferro na exploração de minério e associação com o consumo de energia

É possível verificar nas Figuras 5 e 6, indicam respectivamente, a movimentação de minério (ROM) e produção beneficiada, além dos teores médios de ferro na alimentação das usinas e produto global beneficiado, e ainda a recuperação mássica destas usinas.

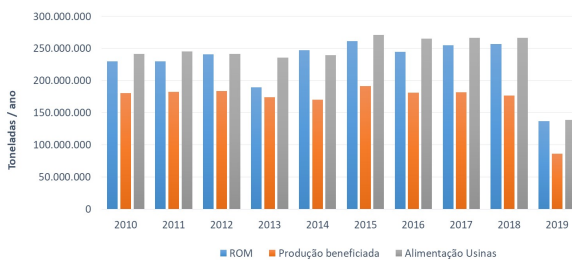


Figura 5. Movimentação de ROM e produção beneficiada, respectivamente das minas e usinas.

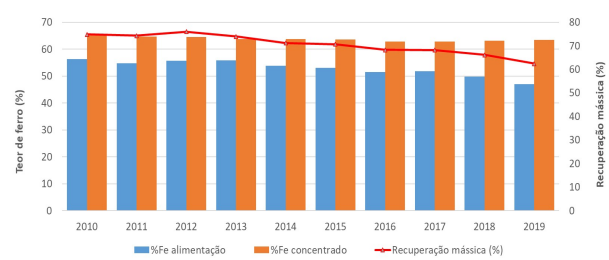


Figura 6. Teor médio de ferro e recuperação nas usinas.

Observa-se, na Figura 5, que no período de 2010 a 2019 houve a necessidade de maior movimentação de ROM para manter a escala de produção beneficiada, com exceção ao ano de 2019, justificado pelo acidente em Brumadinho/MG que levou a uma redução na produção de minério de ferro na região. Tal fato, pode ser explicado pelo processo de diminuição dos teores de minério de ferro nas reservas lavráveis (Vale, 2016) conforme Figura 6, onde em 2010, o teor de ferro na alimentação das usinas era de 56,35% e posteriormente em 2019 caiu para 46,91%. Isto posto, resultou ao longo do período analisado, numa queda da recuperação mássica nas usinas, de 74,79% em 2010 para 62,38% em 2019 conforme indicado na Figura 6.

Insta destacar que as jazidas de minério de ferro brasileiras são consideradas as melhores do mundo em termos de qualidade, contudo existe uma tendência natural de diminuição de seus teores, o que leva a usinas de tratamento de minérios, mais complexas e que demandam maior consumo energético (Mourão, 2008; Norgate e Jahanshahi, 2010; Palacios, 2012; Calvo et al., 2016; MME, 2013).

3.3 Evolução do consumo energético na lavra de minério

A Figura 7 mostra a razão de carregamento (g/t) de explosivos ao longo do período estudado, enquanto a Figura 8 indica a distribuição dos equipamentos de operação da mina por setor. Já as Figuras 9 e 10, detalham, respectivamente o consumo de diesel e preço do insumo em Minas Gerais, além do consumo específico de diesel por tonelada de minério bruto e beneficiada.

É possível observar que houve um aumento do consumo de explosivos ao longo do período estudado, sendo que a razão média de carregamento em 2010 foi em torno de 175g/t, chegando a 344 g/t em 2019, ou seja, aumento cerca de 96% (Figura 7). É importante frisar, que melhorias no desmonte de rochas por explosivo podem reduzir significativamente o consumo energético nas usinas, pelo aumento da razão de carregamento, escolha adequada do tipo de explosivo, malha de perfuração, monitoramento da fragmentação e outros parâmetros integrantes do plano de fogo, em especial nos itabiritos compactos existentes em grandes proporções no Complexo Quadrilátero Ferrífero em função da exaustão dos minérios hematíticos de maiores teores de ferro (Silva, 2009; Neves, 2018; Carlos e Koppe, 2016; Napier-Munn, 2015; Moraes e Gripp, 2004).

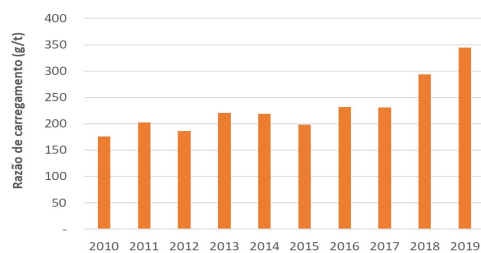


Figura 7. Razão de carregamento de explosivos utilizados nas minas do Complexo Quadrilátero Ferrífero.

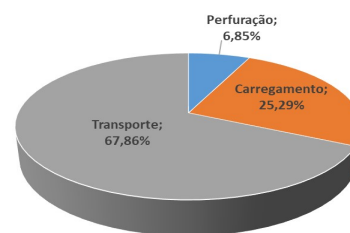


Figura 8. Distribuição do quantitativo de equipamentos que consomem óleo diesel no Complexo Quadrilátero Ferrífero e Carajás por etapa produtiva.

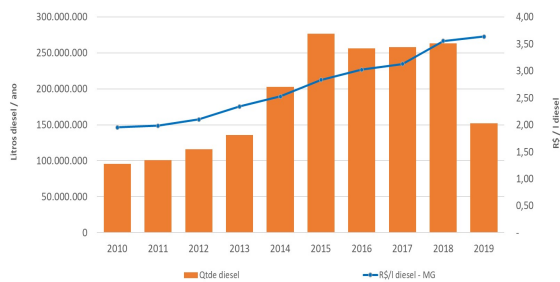


Figura 9. Consumo de diesel e evolução dos preços. Fonte: ANP (2019).

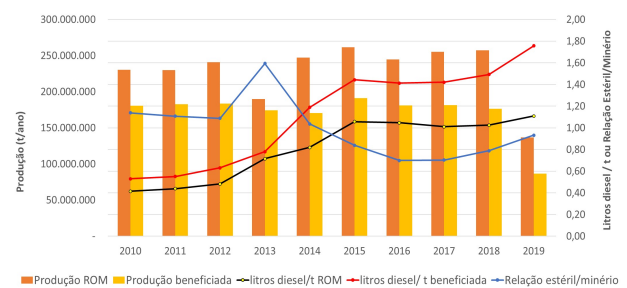


Figura 10. Consumo específico de diesel por tonelada de minério bruto e beneficiada associado a evolução da relação estéril/minério e produção no Complexo Quadrilátero Ferrífero.

No que tange, ao consumo de diesel, em geral observou-se um crescimento no período analisado (Figura 9), sendo que 67,86% dos equipamentos que o utilizam correspondem a etapa de transporte de minério e/ou estéril (Figura 8). No ano de 2010, o consumo era cerca de 95 milhões de litros atingindo aproximadamente 263 milhões de litros no ano de 2018, ou seja, 176,8% de aumento. Salienta-se que em 2019 houve uma queda acentuada no consumo de diesel neste complexo, muito provável devido ao rompimento da barragem no Córrego do Feijão em Brumadinho/MG e paralisação de outras minas com problemas estruturais nas barragens de rejeito, que prejudicaram a movimentação de minério. Um ponto em destaque é que o preço médio do diesel em 2010 era de R\$1,95/l e em 2019 chegou a R\$3,63/l (Figura 9), ou seja, 86% de aumento. Isto impacta significativamente, os custos operacionais, caso não haja política e implementação de medidas de eficiência energética.

Em termos de consumo específico de diesel (litros/t ROM), em 2010, o valor era de 0,421 subindo gradativamente até atingir 1,02 em 2018 (Figura 10), valor este próximo (1,00/t) ao encontrado por Lopes (2010) na Mina de Fábrica/MG. Este fato, pode ser explicado pela maior distância de transporte que leva a um maior consumo de diesel por tonelada de minério produzido (Purhamadani, Bagherpour e Tudeshki, 2021; Palacios, 2012; MME, 2013). Cabe destacar que apesar da relação estéril/minério ter diminuído após o ano de 2013, houve um aumento no consumo específico de diesel / t de minério bruto e beneficiada com estabilização no período de 2015 a 2018. Tal fato pode ser explicado pela redução do teor de corte nas minas e melhorias nos processos das usinas, que permitiram um melhor aproveitamento

do material estéril, ou seja, o material que era considerado no passado sem valor econômico passou a ser considerado minério. De qualquer maneira, conforme indicado na Figura 10, em função da menor recuperação mássica nas usinas pelo declínio do teor de ferro, maiores movimentações de minério (ROM) são necessárias para manter a escala de produção beneficiada, o que implica em maiores dispêndios com óleo diesel.

3.4 Evolução do consumo de energia elétrica

Os dados do RAL ano-base 2019 mostram que a fonte primária de energia elétrica das unidades operacionais da empresa estudada, incluindo a pelotização é oriunda em sua maior parte de usinas hidrelétricas que fornecem energia para suas unidades operacionais em todo território nacional conforme a demanda destas e por participação em rateio nas seguintes hidrelétricas: Igarapava/SP, Porto Estrela/MG, Funil/MG, Candonga/MG, Aimorés/MG, Capim Branco/MG, Capim Branco II/MG, Estreito/MA, Machadinho/SC, Nova Maurício/MG, Mello/MG, Belo Monte/PA e Glória/MG. Como uso de fontes alternativas de energia elétrica, a partir de 2019, a empresa informou a Agência Nacional de Mineração, a geração de energia eólica por meio de rateio da produção, nas seguintes centrais geradoras eólicas (EOL): EOL São Raimundo/CE, EOL Santo Inácio III/CE, EOL Garrote/CE e EOL Santo Inácio IV/CE. A potência total destas usinas destinadas aos empreendimentos mineiros em 2019 foi informada em 14.038.945 kW, sendo 3,4% proveniente de geração eólica e 96,6% de hidrelétricas. Ressalta-se que estas centrais de geração eólica têm capacidade para fornecer 6,16% da potência total necessária nas unidades operacionais da empresa, além de ser uma forma de energia limpa (ONU, 2017).

A Figura 11 mostra a evolução do consumo de energia elétrica e o histórico de tarifa de fornecimento de energia elétrica na região sudeste incluindo os impostos segundo a ANEEL (2020). Já Figura 12 mostra a evolução da distribuição da aquisição de energia elétrica por tipo de geração.

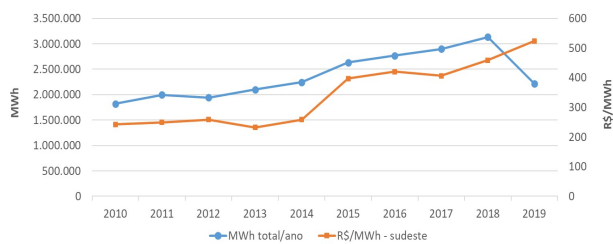


Figura 11. Evolução do consumo de energia elétrica e preço médio de fornecimento para o setor industrial na região sudeste. Fonte: ANEEL (2020).

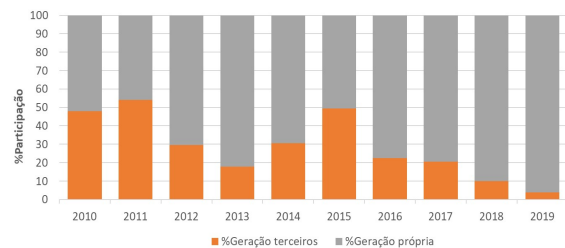


Figura 12. Distribuição do percentual de aquisição de energia elétrica nos empreendimentos estudados.

No ano de 2010 foram gastos cerca de 1,8 milhões de MWh de energia, chegando à aproximadamente 3,1 milhões de MWh em 2018 (Figura 10), ou seja, em uma década, o consumo médio cresceu expressivamente 72,22%. Este consumo em 2018, foi equivalente a 10% de toda energia elétrica utilizada no setor industrial do Estado de Minas Gerais, segundo dados do anuário estatístico de energia elétrica da EPE (2019).

Cabe destacar que em 2010, a tarifa média de fornecimento de energia elétrica na região sudeste para o setor industrial (ANEEL, 2020) era de R\$ 242,21/MWh e posteriormente apresentou um crescimento exponencial chegando a R\$523,97/MWh em 2019, ou seja, o ajuste de preço no período correspondeu a 116,32%. Considerando que a energia elétrica é a fonte energética mais representativa na matriz energética, este aumento significativo no preço da tarifa de fornecimento pode inviabilizar muitos projetos e atividades em operação. Neste sentido, a estratégia utilizada pela empresa para obtenção de energia elétrica de geração própria, no período de 2010 a 2019, teve muito êxito do ponto de vista do custo operacional e ambiental (ONU, 2017). Foi observado que em 2010, o percentual de aquisição de terceiros era em torno de 48%, diminuindo gradativamente até chegar a 4% em 2019 (Figura 12).

É importante salientar que mesmo com a geração própria de energia, considerando a complexidade das plantas de tratamento de minério com etapas de moagem deve ser dada atenção ao gerenciamento de energia elétrica. Nesta esteira, a ISO 50.001 mostra-se numa boa alternativa, uma vez que o documento inclui definições, responsabilidades e funções dentro de uma organização para gerenciamento de energia, bem como os requisitos de medição, documentação e relatórios (ABNT, 2018).

As Figuras 13 e 14, indicam a evolução do consumo específico de energia elétrica (kWh/t beneficiada) e distribuição dos principais equipamentos utilizados nas usinas.

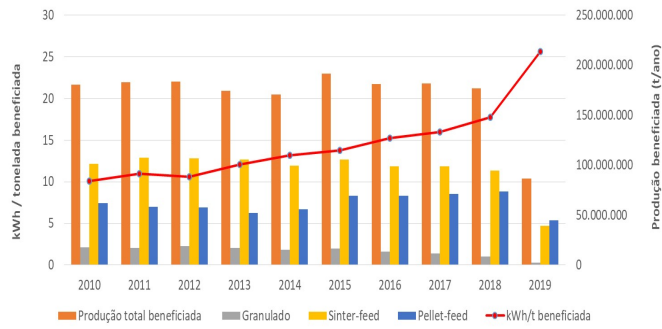


Figura 13. Consumo específico de energia elétrica (kWh/t beneficiada) e quantidade de produtos beneficiados.

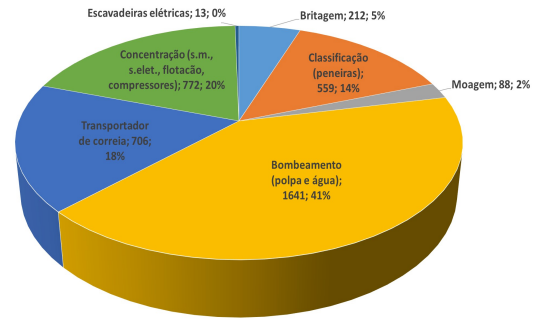


Figura 141. Quantidade dos principais equipamentos consumidores de energia elétrica.

No que se refere ao consumo específico de energia elétrica em 2010 era de 10,08 kWh/t chegando a 2018 com 17,76kWh/t, ou seja, em 9 anos houve um aumento aproximado de 76,29%. Ressalta-se que minérios com menor teor de ferro exigem usinas de beneficiamento mais complexas e conseqüentemente maior consumo de energia por tonelada beneficiada (MME, 2013), como é o caso do Complexo Quadrilátero Ferrífero, onde existe uma tendência natural de exaustão das minas (Carvalho, 2012; Vale, 2016). Em termos de comparação, o resultado encontrado aproxima-se com o valor estimado no estudo realizado por Vasconcelos (2011), onde amostras de rochas itabiríticas estereis do Quadrilátero Ferrífero, submetidas a etapa de fragmentação (britagem e moagem) para obter um grau de liberação em torno de 95% necessitaria de 18kWh/t.

Outro fator interessante, é que em termos quantitativos, a etapa de bombeamento representa cerca de 41% do total de equipamentos de operação das minas e usinas no Sudeste, porém com apenas um quantitativo de 2% na moagem tem-se um impacto de 58,7% no consumo de energia elétrica em face a 18,7% nas etapas de bombeamento. As escavadeiras elétricas também, ocupam um lugar de destaque com uma participação de 6% (Jonusan, 2017, Formento et al., 2016).

Ressalta-se que em 2019 houve uma queda no consumo de energia, em virtude da diminuição da escala de produção e paralisação das atividades em algumas minas e usinas. Tais fatos, estão relacionados ao acidente com rompimento da barragem de rejeitos na mina Córrego do Feijão em Brumadinho e problemas estruturais com as barragens de outras minas.

3.5 Análise do consumo específico total de energia

É importante mencionar que não foi encontrado na literatura brasileira referências de consumo específico de minério de ferro em relação a adoção de boas práticas de eficiência energética. Neste sentido, foram consideradas as referências de consumo específico em 3(três) cenários distintos: referência atual (sem adoção de boas práticas), as melhores práticas de eficiência energética e o valor mínimo praticável, todos utilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para as indústrias de mineração de metálicos (DOE, 2007). É importante lembrar que para cada tipo de minério metálico, existem equipamentos e processos distintos, que influenciaram na recuperação mássica das usinas, relação estéril/minério e conseqüentemente na quantidade necessária de minério (ROM) movimentado, e por sua vez na relação de energia por tonelada de ROM.

Assim, a Figura 15 mostra o consumo específico total de energia necessária para o funcionamento das minas e usinas situadas no Complexo Quadrilátero Ferrífero (kWh/t minério), enquanto a Figura 16 apresenta a correlação entre a energia específica total e o teor de ferro no minério.

Para o Quadrilátero Ferrífero observou-se um aumento crescente no consumo energético total no empreendimento mineiro, sendo igual a 12,10 kWh/t ROM em 2010 e 22,47 kWh/t ROM em 2018, ou seja, crescimento de 86% aproximadamente numa década (Figura 15). Foi possível constatar que com o declínio do teor de ferro houve um aumento significativo de energia nos empreendimentos mineiros, sendo que no ano de 2019, o consumo total específico chegou a 97,19 MJ/t ROM (Figura 16), valor este situado entre os grupos G1 (82 MJ/t) e G2 (145,5MJ/t) de minerais, com tendência de maior concentração no grupo G2 no decorrer do desenvolvimento da lavra, devido a presença de itabiritos compactos envolvidos em uma matriz quartzosa de compostos silicáticos com teor médio de 30 a 40% de ferro, que requerem grande quantidade de energia por necessitar de uma moagem intensiva para liberação das fases minerais úteis (Mourão, 2008; Vasconcelos, 2011; Palacios, 2012; MME, 2013).

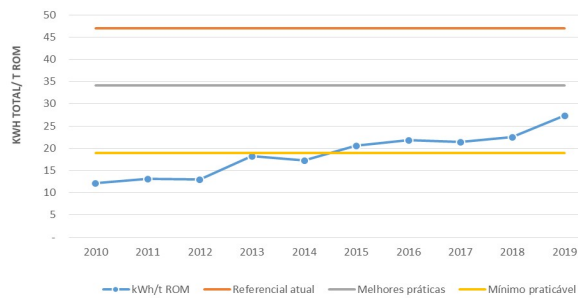


Figura 15. Consumo específico total de energia (kWh/t) no Complexo Quadrilátero Ferrífero/MG em relação às referências do DOE (2007) para indústria de mineração de metálicos.

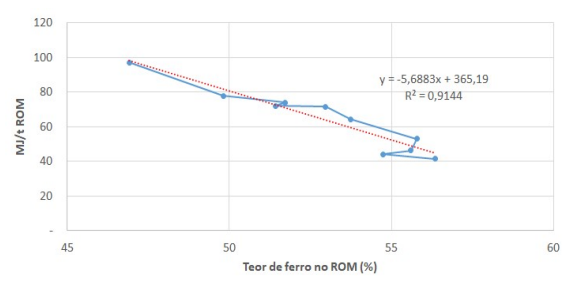


Figura 16. Correlação entre o teor de ferro no ROM e o consumo específico total de energia (kWh/t ROM) no Complexo Quadrilátero Ferrífero/MG.

Ressalta-se que não foi possível com base nos dados dos relatórios de anuais de lavra avaliar o consumo energético por etapa produtiva, contudo é extremamente importante levantar e monitorar o consumo de energia nestas diferentes etapas para implementações de medidas de eficiência energética e consequentemente redução das emissões de t CO₂eq. Neste sentido, não foi constatado nos relatórios anuais de lavra a implantação da ISO 50001 (ABNT, 2018), que poderia contribuir para melhor gestão do uso de insumos energéticos, otimização operacional, redução do custo operacional e até mesmo aumentar as receitas com a geração própria de energia, em caso de redução no consumo específico de energia.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade ano-base 2019, a empresa estudada elaborou um programa de eficiência energética global já iniciado, que envolverá a governança centralizada, padronização dos processos chaves, implantação de equipes multidisciplinares nas unidades, definição de KPIs e mapeamento das iniciativas de redução do consumo energético. Foi relatado que o referido programa está sendo implantado nos complexos Serra Sul, na região Norte do Brasil, e em Vargem Grande, Mariana e Itabira no estado de Minas Gerais (Vale, 2020).

4. Conclusões

- O declínio no teor de ferro observado no período estudado é fator determinante no transporte e na recuperação mássica das usinas e consequentemente reflete em maior consumo de diesel e energia elétrica em função da necessidade de maior quantidade de minério para atingir a mesma escala de produção beneficiada e movimentação de estéril;
- A estratégia de autogeração de energia elétrica por fontes limpas do ponto de vista operacional e de desenvolvimento sustentável mostra-se extremamente importante para continuidade das operações e redução de custo. Porém, deve estar alinhada a uma política eficiente em gestão energética, sendo a ISO 50.001 uma das ferramentas para tal;
- Para as diferentes etapas produtivas de um empreendimento mineiro, observou-se diversas oportunidades de melhorias em termos de eficiência energética, dentre elas: redução da inclinação média das rampas, a substituição de caminhões por correias transportadoras, utilização de sistema de localização por GPS na frota de caminhões, uso de britagem móvel na cava, determinação da configuração ótima de fragmentação em função da granulometria desejada e características do minério, utilização de sistema de controle, automação e inteligência artificial no processamento de minérios, e medição e monitoramento contínuo do consumo energético nas diferentes etapas produtivas;
- Os balanços energéticos disponibilizados pelos órgãos governamentais, seja estadual ou federal, tratam o setor extrativo mineral de forma integrada, e não fornecem uma classificação específica dentro do setor mineral, como por exemplo a produção de minério de ferro ou produção de minerais metálicos. Desde modo, a indústria mineral apresenta uma grande variabilidade de processos produtivos, que é dependente de cada depósito geológico, além de sofrer alterações ao longo do tempo, devido à variação de teores e exaustão das minas. Tais fatores implicam em uma grande variação na demanda de energia para o setor extrativo mineral, independente de fatores puramente econômicos.

Referências bibliográficas

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2020) *Tarifas médias (R\$/MWh) por classes de consumo e por regiões geográficas do Brasil – mensal e anual a partir de 2003*. [online] Brasília: ANEEL < <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita> > (Accessed 04 April 2020).
- Agência Nacional de Mineração – ANM (2020) *Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas 2020*. [pdf] Brasília: ANM. Available at: < https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf > (Accessed 22 August 2021).
- Agência Nacional de Mineração – ANM (2021) *Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas 2021 – Versão Preliminar Produção*. [pdf] Brasília: ANM. Available at: < https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/AMB_2021_Prod_Preliminar_para_publicacao2.pdf > (Accessed 22 August 2021).
- Agência Nacional Petróleo – ANP (2019), *Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis*. [online] Rio de Janeiro: ANP < <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-do-levantamento-de-precos-e-de-margens-de-comercializacao-de-combustiveis> > (Accessed 03 April 2020).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2018) Comitê brasileiro de gestão e economia de energia. *NBR ISO 50001: Sistemas de gestão da energia – Requisitos com orientações para uso*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Calvo, G, Mudd, G e Valero, A (2016) Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources*, [online] 5, 36, pp.1-14, 2016. Available at:<<https://pdfs.semanticscholar.org/0fb2/3ed97e4675abcf94f6b3debc8a49acc60e50.pdf>> [Accessed 19 July 2019].
- Carlos, MR (2017) *Energia nas operações de desmonte de rocha e suas influências na moagem de minérios*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Available at: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/170948/001053369.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> (Accessed 9 August 2019).
- Carlos, MR e Koppe, JC (2016) ‘Energy and CO₂ Emissions In Iron Ore Mining’, In: *24th World Mining Congress. Sustainability In Mining*, [pdf] Rio de Janeiro, Brazil, IBRAM. Available at: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/sustentabilidade-na-mineracao.pdf>> (Accessed 26 August 2019).
- Carvalho, BCL (2012) ‘Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra’, Universidade Federal de Ouro Preto. Available at: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2346/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_AproveitamentoMin%C3%A9riosFerro.pdf> (Accessed 19 June 2019).
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2019) *Balanco Energético Nacional 2019: ano-base 2018*. [pdf] Rio de Janeiro: EPE. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. (Accessed 26 August 2019).
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2021) *Balanco Energético Nacional Interativo*, [online], Rio de Janeiro: EPE, <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>> (Accessed 22 August 2021).
- Ferreira, H e Leite, MGPA (2015) ‘Life Cycle Assessment study of iron ore mining’, *Journal of Cleaner Production*, [e-journal] 108(A), pp.1081-1091. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.140>>.
- Formento, R, Bauler, DT, Baviera, ALM, Luca, HP e Luchini, L (2016) *Energy Efficiency and Reliability of Electric Motors*. In: *24th World Mining Congress. Sustainability In Mining*, [pdf] Rio de Janeiro, Brazil, IBRAM. Available at: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/sustentabilidade-na-mineracao.pdf>> (Accessed 26 August 2019).
- Guardia, E (2010) *Oportunidades de eficiência energética para a indústria: uma visão institucional: sumário executivo*, [pdf] Brasília: Confederação Nacional das Indústrias. Available at:

- <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/c9/3b/c93b31f3-e542-44bc-83eb-cafc8095fe48/20121127134708892924i.pdf> (Accessed 10 June 2019).
- Holmberg, K, Kivikytö-Reponena, P, Härkisaarib, P, Valtonen, K e Erdemirc, A (2017) ‘Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry’, *Tribology International*, [e-journal] 115, pp.116-139. <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>>.
- International energy agency – IEA (2019) *Energy Efficiency 2018 - Analysis and outlooks to 2040*. [pdf]. Available at: <<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018>> (Accessed 20 June 2019).
- Jeswiet, J, Archibald, J, Thorley, U e De Souza, E (2015) ‘Energy Use in Premanufacture (Mining)’, *Journal Procedia CIRP*, [e-journal] 29, pp.816-821. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.071>.
- Jonusan, RA S (2017) *Estudo de Planejamento Energético para o Setor de Mineração de Minério de Ferro no Estado de Minas Gerais no Horizonte 2014/2035, Utilizando o Modelo ENPEP*. DED. Universidade Federal de Minas Gerais. Available at: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AWZL9T>> (Accessed 6 June 2017).
- Lopes, JR (2010) *Viabilização Técnica e Econômica da Lavra Contínua de Minério de Ferro com o uso de Sistema de Britagem Móvel “in Pit” Auto Propelado*. DED. Universidade Federal de Ouro Preto. Available at: <https://repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2665/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Viabiliza%C3%A7%C3%A3oT%C3%A9cnicaEcon%C3%B4mica.pdf> (Accessed 19 June 2019).
- Ministério de Minas e Energia – MME (2013) *Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração: Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC)*. [pdf] Brasília: MME<<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006220.pdf>> (Accessed 20 June 2019).
- Morais, JL e Gripp, MFA (2004) ‘Fundamentos para simulação dos desmontes de rocha por explosivos’, *Revista Escola de Minas*, [e-journal] 57 (4), pp.241-248. <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000400005>>.
- Mourão, JM (2008) *Estudo prospectivo do setor siderúrgico: NT do minério de ferro e pelotas e situação atual e tendências 2025*. [pdf] Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Available at: <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> (Accessed 19 June 2019).
- Napier-Munn, T (2015) ‘Is progress in energy-efficient comminution doomed?’, *Journal Minerals Engineering*, [e-journal] 75 (15), pp.1-6. <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.009>>.
- Neves, LS (2018) *Modelagem de desmonte de rocha para otimização da metodologia mine to mill*. Undergraduate thesis. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá. Available at: <<http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/12/Laura-Soares-Neves-min.pdf>> (Accessed 12 April 2020).
- Norgate, T e Jahanshahi, S (2010) ‘Low grade ores – Smeth, leach or concentrate?’, *Journal Minerals Engineering*, [e-journal] 23, 2, pp.65-73, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.10.002>.
- Northey, S, Haque, N e Mudd, G (2013) ‘Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining’, *Journal Cleaner Production*, [e-journal] 40, pp.118-128. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.027>>.
- Organização das Nações Unidas – ONU (2017) *Atlas: Mapeando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Mineração*. [pdf] Columbia, Estados Unidos: ONU, <<https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/publicacoes/atlas-mineracao-ods.pdf>> (Accessed 23 August 2019).
- Orica, 2008. *Technical Data Sheet. ANFO*. [pdf]. Available at: <http://www.oricaminingservices.com/au/en/product/markets/page_open_cut_coal/anfo/37> (Accessed 2 April 2020).

- Palacios, LDLT (2012) *La sostenibilidad en los recursos naturales: la explotación del hierro*. Ph. D. Universidade Politécnica de Madrid. Available at: <http://oa.upm.es/14774/1/LUIS_DE_LA_TORRE_DE_PALACIOS.pdf> (Accessed 23 April 2020).
- Purhamadani, E, Bagherpour, R e Tudeshki, H (2021) ‘Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems’, *Journal of Cleaner Production*, [e-journal] 291. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>>.
- Silva, VC (2009) *Curso de MIN 210 - Operações Mineraias*. [pdf] Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas/Universidade Federal de Ouro Preto. Available at: <https://www.academia.edu/25700203/DEPARTAMENTO_DE_ENGENHARIA_DE_MINAS_ESCOLA_DE_MINAS_UFOP_CURSO_DE_MIN_210_-OPERA%C3%87%C3%95ES_MINEIRAS> Acesso em: 11 abr. 2020.
- United States Department of Energy’s – DOE (2007) *Industrial technologies program: Mining Energy Bandwidth Analysis Process and Technology Scope*. [pdf]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mining_bandwidth.pdf> (Accessed 16 June 2019).
- United States Geological Survey – USGS (2021) *Mineral Commodity Summaries 2021*. [pdf] Reston, Virginia, U.S.A.: USGS. Available at: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>> (Accessed 22 August 2021).
- Vale (2016) *Formulário 20-F. Relatório anual de mercado de capitais: Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos: Exercício 2015*. [pdf] Rio de Janeiro: Vale S. A. Available at: <http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale%2020-F%202015_p.pdf> (Accessed 29 March 2020).
- Vale (2017) *Curso de Mineração – Básico. Módulo II: Geologia de Mina e Operações de Lavra*. [pdf]. Available at: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2017/07/apo_cbm_modulo_2.pdf> (Accessed 28 March 2020).
- Vale (2020) *Relatório de Sustentabilidade 2019*. [pdf] Rio de Janeiro: Vale, <http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/sustainability-reports/Sustentabilidade/Relatorio_sustentabilidade_vale_2019_alta_pt.pdf> (Accessed 07 June 2020).
- Vasconcelos, JA (2011) *Rotas de processo para concentração de rochas itabiríticas da Mina Lagoa das Flores, Itatiaiuçu, MG*. DEd. Universidade Federal de Minas Gerais. Available at: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8MSFXS>> (Accessed 19 June 2019).