

COMINUIÇÃO ELÉTRICA POR PULSOS DE ALTA TENSÃO: PROGRESSO E DESAFIOS

VIEIRA, Marcelo José¹

FERNANDES, Ederson Carvalhar²

KRÜGER, Suelly³

RESUMO

A indústria de mineração é uma importante fonte de matérias-primas para muitas outras, como manufatura, transporte, construção, energia e a própria área de mineração. Um dos processos que ganhou destaque atualmente é a moagem fina, pois está se tornando uma operação unitária cada vez mais comum no processamento de minerais. Descrevem-se os avanços recentes na cominuição elétrica por pulsos de alta tensão e os desafios técnicos para trazer essa tecnologia para a indústria de mineração. Partículas de minério de pré-enfraquecimento e liberação preferencial de minerais em tamanhos grosseiros são os dois principais resultados de pesquisa que podem trazer benefícios potenciais para a indústria. Dessa forma este estudo tem o objetivo geral de apresentar os principais resultados e desafios do uso de pulso de energia para cominuição de materiais na indústria de mineração. A metodologia utilizada foi de revisão da literatura. Os desafios emergentes para a indústria de mineração para perceber os benefícios desta nova tecnologia de cominuição incluem expansão para aplicação industrial, projeto de circuito híbrido, maximização de rachaduras induzidas por pulso e estudo dos efeitos de processamento a jusante.

Palavras-chave: Cominuição elétrica; Energia; Pulsos de alta tensão.

1 INTRODUÇÃO

A cominuição sempre ocupou o lugar central no repertório das operações de processamento mineral. Isso continuará por muito tempo pois esse processo industrial é uma operação de unidade problemática (CHAVES; PERES, 2018). Ainda é praticamente impossível explorar os recursos minerais da crosta terrestre sem triturar o material até o estado particulado, no qual pode ser processado e usado de maneira útil. As ferramentas de operações de cominuição são rudes em comparação com outras operações de engenharia de processo e, como resultado, essas operações

¹ Graduando em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário UNINTER

² Mestre em Engenharia Mecânica pela UTFPR e Professor Orientador no Centro Universitário Internacional UNINTER

³ Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela PUCPR e Professora Orientadora no Centro Universitário Internacional UNINTER

fornecem produtos que nunca são ideais para seu uso subsequente (KAWATRA, 2019).

Além dos problemas causados pelas dificuldades puramente técnicas associadas às operações, a cominuição chama cada vez mais atenção por ser um grande consumidor de energia, e sabe-se que a eficiência de utilização de energia das máquinas industriais é desconfortavelmente baixa. O custo da energia para a realização desse processo é frequentemente um fator determinante na viabilidade econômica de uma atividade produtora de minerais.

A cominuição, que inclui, entre outros, britagem e moagem, consome cerca de um terço da energia usada pela indústria de mineração. Métodos aprimorados estão continuamente buscados, a fim de alcançar a redução de tamanho e liberação de minerais necessários para uma melhor recuperação de minerais valiosos com menor consumo de energia e menores emissões (CHAVES; PERES, 2018).

Pulsos de alta tensão para quebrar rochas têm atraído a atenção de pesquisadores na última metade do século (KAWATRA, 2019). Dessa forma este estudo tem o objetivo geral de apresentar os principais resultados e desafios do uso de pulso de energia para cominuição de materiais na indústria de mineração. Os objetivos específicos são: i) descrever o histórico da evolução da tecnologia; ii) apresentar as etapas do processo de cominuição; iii) entender como funciona a cominuição por pulsos elétricos; iv) apresentar dados sobre consumo de energia para a cominuição.

A justificativa para a realização deste estudo está ligada diretamente à necessidade de entender como pode-se diminuir custos na produção industrial, de forma específica com relação ao consumo energético para a cominuição do minério, dessa forma isso irá ajudar a compreender uma forma de reduzir os custos para este processo para, assim, ter capacidade de formar estratégias capazes de tanto melhorar o processo como reduzir os custos para a mineração.

O documento é estruturado em cinco seções, já com a inclusão da seção de Introdução apresentada. A seção 2 contém a fundamentação teórica. A seção 3 contém a metodologia aplicada ao desenvolvimento do projeto. A seção 4 apresenta o cronograma do projeto.

2 PROCESSO DE COMINUIÇÃO

O setor industrial usa mais energia fornecida do que qualquer outro setor de uso final, consumindo cerca de 54% da energia total fornecida no mundo. O setor industrial pode ser categorizado por três tipos distintos de indústria: manufatura com uso intensivo de energia, manufatura não intensiva em energia e não manufatura (ALIGLERI, 2016).

O mix e a intensidade de combustíveis consumidos no setor industrial variam entre regiões e países, dependendo do nível e do mix de atividade econômica e do desenvolvimento tecnológico (CAPELLI, 2013).

A energia é usada no setor industrial para uma ampla gama de finalidades, como processo e montagem, vapor e cogeração, aquecimento e resfriamento de processo e iluminação, aquecimento e ar-condicionado para edifícios. O consumo de energia do setor industrial também inclui matérias-primas químicas básicas. As matérias-primas de gás natural são usadas para produzir produtos químicos agrícolas. Líquidos de gás natural e derivados de petróleo (como nafta) são usados para a fabricação de produtos químicos orgânicos e plásticos, entre outros usos (ROSSITER; JONES, 2015).

No caso de referência do *International Energy Outlook (IEO) 2021* (EIA, 2021), o consumo mundial de energia do setor industrial está projetado para aumentar em média 1,2%/ano, de 222 quatrilhões de unidades térmicas britânicas (Btu) em 2012 para 309 quatrilhões de Btu em 2040.

A maior parte do crescimento de longo prazo no consumo de energia do setor industrial ocorre em países fora da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). De 2012 a 2040, o consumo de energia industrial em países não membros da OCDE cresce em média 1,5%/ano, comparado com 0,5%/ano nos países da OCDE. O consumo de energia industrial não pertencente à OCDE, que representou 67% da energia entregue pelo setor industrial mundial em 2012, representa 73% do consumo de energia entregue pelo setor industrial mundial em 2040 (EIA, 2021).

No geral, o uso total de energia do setor industrial aumenta de 73 quatrilhões de Btu em 2012 para 85 quatrilhões de Btu em 2040 nos países da OCDE e de 149 quatrilhões de Btu em 2012 para 225 quatrilhões de Btu em 2040 nos países não pertencentes à OCDE. O uso de energia do setor industrial da OCDE cresce lentamente no caso de referência IEO 2021, com média de 0,5%/ano de 2012 a 2040

(EIA, 2021).

O setor industrial responde por aproximadamente 40% do uso total de energia fornecida pela OCDE de 2012 a 2040. No setor industrial não-OCDE, a parcela do uso de energia entregue diminui de 64% em 2012 para 59% em 2040, à medida que muitas economias emergentes não-OCDE se afastam da manufatura com uso intensivo de energia, enquanto o uso de energia cresce mais rapidamente em todos os outros setores de uso final (HUMPHREYS, 2015).

Como a maioria dos minerais é finamente disseminada e intimamente associada à ganga⁴, eles devem ser inicialmente desbloqueados ou liberados antes que a separação possa ser realizada. Isso é obtido por cominuição, na qual o tamanho de partícula do minério é progressivamente reduzido até que as partículas limpas do mineral possam ser separadas por métodos disponíveis (ROONWAL, 2018).

A cominuição em seus estágios iniciais é realizada para tornar o material recém-extraído mais fácil de manusear por raspadores, transportadores e carregadores de minério e, no caso de produtos de pedreira, para produzir material de tamanho de partícula controlado (CHAVES; PERES, 2018). Explosivos são usados na mineração para remover minérios de seus leitos naturais e a detonação pode ser considerada o primeiro estágio da cominuição. A cominuição na planta de processamento mineral, ou moinho, ocorre como uma sequência de processos de britagem e moagem.

A trituração reduz o tamanho de partícula do minério *run-of-mine* (ROM) a um nível tal que a trituração pode ser realizada até que o mineral e a ganga sejam substancialmente produzidos como partículas separadas. A britagem é realizada pela compressão do minério contra superfícies rígidas ou por impacto contra superfícies em um caminho de movimento rigidamente restrito (CHAVES; PERES, 2018).

A britagem é geralmente um processo a seco e é realizado em várias etapas, taxas de redução (tamanho da alimentação para tamanho do produto) pequenas, varia de três a seis em cada etapa. A taxa de redução de um estágio de britagem pode ser definida como a razão entre o tamanho máximo de partícula que entra e o tamanho máximo de partícula que sai do britador, embora outras definições sejam usadas (LUZ *et al.*, 2018). A moagem convencional ocorre em moinhos de tambor, onde o minério é introduzido em um moinho horizontal, onde o corpo cilíndrico do moinho é girado

⁴ material sem valor comercial que envolve, ou está intimamente misturado com um mineral desejado em um depósito de minério

por um motor, o que faz com que a carga de minério e o meio de moagem do moinho caiam (ROONWAL, 2018).

A moagem é realizada por impacto, atrito e abrasão do minério pelo movimento livre de meios não conectados, como hastes de aço, bolas de aço ou cerâmica ou seixos grosseiros de minério. A moagem é geralmente realizada úmida para fornecer uma alimentação de lama ao processo de concentração, embora a moagem a seco tenha várias aplicações (LUZ *et al.*, 2018).

Os moinhos primários autógenos ou semiautógenos são moinhos rotativos capazes de moer rações muito grosseiras, substitui assim um ou dois estágios de moagem. Existe um conjunto sobreposto de tamanhos de partículas onde é possível esmagar ou moer o minério (ROONWAL, 2018).

Um dispositivo de cominuição relativamente novo que é um tanto intermediário entre a britagem fina e os moinhos de tamboreamento grosso são os rolos de moagem de alta pressão (HPGR). Esses dispositivos de trituração a seco utilizam dois rolos rotativos que criam a quebra por compressão de um leito de partículas, no qual ocorre a quebra entre as partículas (CHAVES; PERES, 2018).

Moinhos agitados agora são comuns no processamento de minerais para moagem fina, embora tenham sido usados em outras indústrias por muitos anos. Eles representam a ampla categoria de moinhos que usam um agitador para transmitir movimento ao aço, à cerâmica ou a outros meios de partículas finas. Existem configurações verticais e horizontais (LUZ *et al.*, 2018).

Em comparação com os moinhos de bolas, os moinhos agitados enfatizam a energia de cisalhamento em vez da energia de impacto, que, juntamente com o tamanho da mídia fina, é mais eficiente em energia para moagem fina. Os moinhos agitados também fornecem maior intensidade de energia (potência por unidade de volume do moinho, kW m²) do que os moinhos de bolas, o que torna as unidades mais compactas (CHAVES; PERES, 2018).

2.1 COMINUIÇÃO E ENERGIA

O consumo de energia por processos industriais está se tornando um grande problema em todo o mundo. As incertezas no fornecimento de gás natural e os efeitos ambientais adversos de outras fontes importantes de energia, petróleo bruto, carvão e urânio, estão aumentando as pressões econômicas que representam problemas

significativos para as indústrias produtoras de minerais (KAWATRA, 2019).

Em alguns casos, já há evidências de que os custos de energia da cominuição determinarão a viabilidade de setores significativos da indústria. Embora existam procedimentos brutos para a quantificação do consumo de energia por cominuição, agora está muito claro que um maior progresso na compreensão de como a energia é usada só pode vir de uma compreensão detalhada e fundamental da física da fratura de material particulado frágil (REVUELTA, 2018).

Quaisquer novos avanços realmente significativos na tecnologia de cominuição na próxima década virão particularmente da exploração de uma compreensão fundamental básica dos processos de fratura que sustentam todos os sistemas de cominuição industriais. Os mecanismos precisos de fratura são desconhecidos quando sólidos frágeis, como material mineralógico particulado, são submetidos a um impacto rápido. Este problema atraiu o interesse de muitos cientistas desde o início dos anos sessenta (OKRUSCH; FRIMMEL, 2020).

O trabalho inicial, particularmente aquele realizado na Europa, estava preocupado principalmente com a determinação da distribuição do tamanho das partículas da progênie que resultava da fragmentação controlada de partículas frágeis individuais e com a relação entre essa distribuição e a entrada de energia específica (KAWATRA, 2019).

A principal dificuldade em investigar os fenômenos associados ao rápido impacto da fratura de partículas frágeis é criar experimentos que sejam capazes de desvendar os detalhes dos micro processos que ocorrem na faixa de milissegundos. Isso foi solucionado com a adaptação de um dispositivo que tem sido usado com sucesso por engenheiros mecânicos e cientistas de materiais por muitos anos para estudar processos de impacto - a saber, a barra de pressão Hopkinson (OKRUSCH; FRIMMEL, 2020).

O novo dispositivo, que ficou conhecido como *Ultrafast Load Cell*, permite a medição precisa e reproduzível da distribuição das energias de fratura, da resistência das partículas, bem como da distribuição dos tamanhos da progênie que resultam da fratura por impacto (KAWATRA, 2019). A célula de carga ultrarrápida também pode ser usada para estudar a fratura por impacto de leitos de partículas sob condições que corresponderiam, pelo menos aproximadamente, às condições que ocorrem em um moinho de bolas (REVUELTA, 2018).

Nos últimos anos, os dados da célula de carga ultrarrápida e do pêndulo duplo

exibiram uma consistência notável e revelaram uma uniformidade e universalidade até então insuspeitada, mas que nos permite especular agora, com considerável confiança, que a distribuição de tamanho que resulta de um evento de impacto em uma única partícula é previsível sob uma ampla variedade de condições, desde que a energia disponível para o evento de impacto é conhecida.

2.2 COMINUIÇÃO ELÉTRICA

A tecnologia de energia de pulso de alta tensão (AT) consiste em uma fonte de alimentação de alta tensão, um gerador de pulso de alta tensão e a área de processo. Os materiais são imersos em um líquido na área de processo. Líquidos dielétricos, como a água, têm uma alta rigidez dielétrica quando o tempo de subida da tensão é mantido abaixo de 500 ns. Conseqüentemente, a água atua como um isolante elétrico especial para evitar descargas elétricas fora das rochas (OKRUSCH; FRIMMEL, 2020).

Vários nomes técnicos relacionados à tecnologia de pulso HV aparecem na literatura. Em comparação com outras técnicas de pulso usando tempos de subida de tensão mais curtos, a eficiência energética da desintegração eletro-hidráulica pode ser menor e os resultados do pré-enfraquecimento da rocha e da liberação mineral podem ser diferentes (REVUELTA, 2018).

Atualmente, duas marcas de equipamentos de pulso de alta tensão aparecem no mercado: selFrag fabricado pela SELFRAG AG com sede na Suíça e Spark pela CNT-MC com sede no Canadá. O JKMRC instalou uma máquina selFrag Lab. O selFrag Lab foi projetado para tratar amostras na faixa de 1 kg por lote. Os parâmetros de processo selecionáveis são: número de pulsos, tensão de descarga (91–200 kV) que controla a energia por pulso, folga do eletrodo (10–40 mm) e frequência de descarga (1–5 Hz) (OKRUSCH; FRIMMEL, 2020).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa se classifica como uma pesquisa exploratória pois busca uma resposta para um problema específico, tendo como base um fenômeno apontando no objetivo do trabalho (GIL, 2017). Para o alcance dos objetivos, este estudo foi formatado para ser realizado em duas etapas: Revisão da literatura através de

pesquisa bibliográfica e análise dos dados.

A primeira etapa da pesquisa será do tipo exploratória, visa não somente proporcionar uma maior familiaridade com o tema investigado, como também tornar mais fácil a etapa seguinte da pesquisa. Para isso será realizada uma pesquisa bibliográfica em livros, periódicos de circulação nacional e, principalmente internacional, haja vista que este tema é pouco estudado nas academias brasileira. Para Gil (2017, p. 44) “a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”.

No que pese os livros serem importante fonte de pesquisa, neste estudo será dado ênfase especialmente a artigos científicos que tenham sido publicados nos últimos 10 anos (2012 a 2022) haja visto a sua imediaticidade na publicação, o que não ocorre com livros. Gil (2017) já anotou que o planejamento da pesquisa exploratória é bastante flexível, permite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado, permite maior aprofundamento da temática e versatilidade dos pontos a serem investigados.

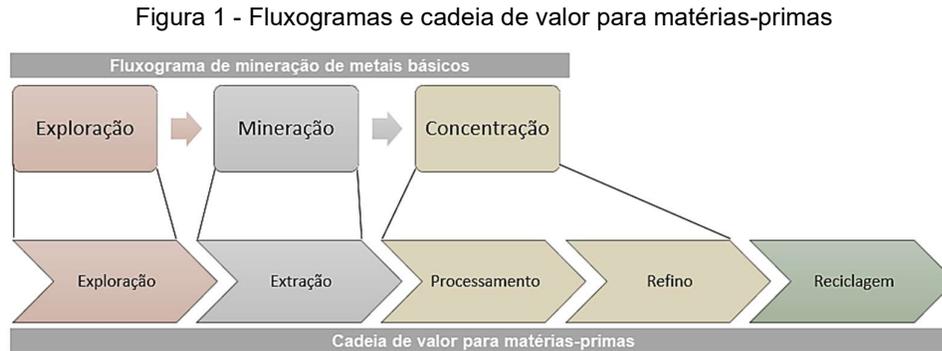
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSUMO DE ENERGIA NA MINERAÇÃO

A mineração é o primeiro elo da cadeia de suprimentos de metais na manufatura. O material na cadeia de abastecimento é proveniente de material reciclado ou mineração, com 100% de material reciclado sendo o ideal, evitando assim a mineração e reduzindo os impactos ambientais (HUMPHREYS, 2015).

Porém, ainda demorará muito para que a humanidade alcance o *status* de uma economia circular, por isso deve-se garantir impactos mínimos devido à mineração. Em última análise, a mineração se preocupa com: percentual de metal presente no minério; refinar ou remover impurezas ou elementos indesejados; Escória, matéria residual separada de metais durante a fundição ou refino; Fluxo, material inorgânico que separa o metal do material indesejado (QUDRAT-ULLAH; PANTHALLOR, 2020)

Os fluxogramas para metais básicos na cadeia de abastecimento de mineração e a cadeia de valor para matérias-primas são mostrados esquematicamente na Figura 1. A concentração de metais, especificamente processamento e refino, vem imediatamente após a extração processo conforme mostrado na Figura 1.



Fonte: Adaptado de NRCAN (2015).

Na cadeia de suprimento do material extraído, a concentração de minério é o processo pelo qual o mineral sendo extraído é separado da rocha que contém o mineral, seja química ou fisicamente. Antes disso, o minério deve ser esmagado até um tamanho adequado para moagem. A moagem é então feita para produzir partículas finas que podem ser processadas química ou fisicamente (NRCAN, 2015).

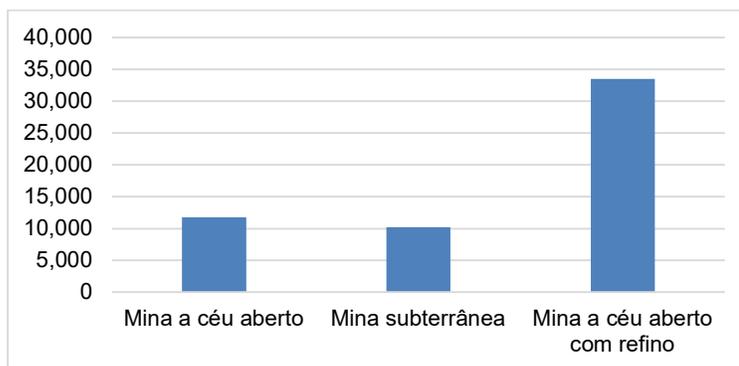
Há uma escassez de informações sobre o consumo de energia específico para minas individuais. A energia necessária para operar uma mina é dividida em seis componentes: britagem, moagem, processamento, rejeitos, água de processo, planta geral (auxiliar) (HUMPHREYS, 2015).

4.2 CONSUMO DE ENERGIA EM MINAS A CÉU ABERTO/SUBTERRÂNEAS

Há uma escassez de informações sobre o consumo de energia específico para minas individuais. Norgate *et al.* (2006) realizaram um estudo, que é uma colaboração que compara as operações de sete usinas/concentradores de minas: quatro de ouro e três de minério de ferro. A energia média necessária para sete minas, com base na necessidade de energia é dividida em seis componentes: britagem, moagem, processamento, rejeitos, água de processo, planta geral (auxiliar).

Adicionando esta energia à energia média necessária para uma mina a céu aberto, calculada como 11.766 kWh/quilotonelada, ou a energia média necessária para uma mina subterrânea, 10.241 kWh/quilotonelada, a energia necessária para uma mina a céu aberto com refino, será de 33.507 kWh/quilotonelada (NORGATE *et al.*, 2006). O Gráfico 1 apresenta estes dados.

Gráfico 1 – Energia média necessária para cada tipo de mina

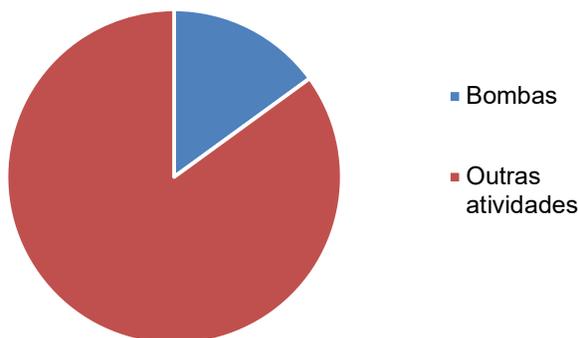


Fonte: Adaptado de Norgate *et al.* (2006).

Os requisitos de energia para minas a céu aberto e subterrâneas incluem eletricidade e uma variedade de combustíveis de carbono: gás natural, gás propano e óleo diesel (NRCAN, 2015). Ambas as operações a céu aberto e subterrâneas são muito diferentes e têm necessidades de energia diferentes, por exemplo, as minas subterrâneas têm necessidades de energia HVAC, enquanto as minas a céu aberto não.

Ambos os tipos de minas precisam de bombas para a água que flui do lençol freático, com bombas representando aproximadamente 25% a 32% do consumo total de energia do motor em uma mina média. Globalmente, estima-se que todas as bombas consomem 15% da eletricidade disponível, conforme apresentado no Gráfico 2. Além disso, os requisitos de energia HVAC podem ser de pelo menos 25% das necessidades de energia da mina subterrânea (QUDRAT-ULLAH; PANTHALLOR, 2020).

Gráfico 2 – Energia global com bombas nas minas



Fonte: Adaptado de Qudrat-Ullah e Panthallor (2020).

O consumo de energia da mineração contribui para os custos operacionais da mineração e ocorre em todas as etapas do processo de recuperação do minério: desmonte, escavação, britagem, transporte e moagem (cominuição). Por exemplo, a indústria de mineração de cobre deverá consumir 41,1 terawatts-hora (TWh) em 2025, um aumento de 95,5% em relação a 2013 (IEA, 2019). Somente novos projetos de mineração devem consumir 36,2% até 2025. As maiores empresas de cobre do mundo usam usinas de concentração, que consomem muita energia e usam as maiores bombas do mundo em seu principal processo de produção. A distribuição de energia em uma mina é de 3 a 5% para detonação, 5 a 7% para britagem e 80 a 90% para moagem (EIA, 2021).

O consumo de energia ocorre em toda parte nos setores de mineração e manufatura. Para relevância no consumo de energia, a Tabela 1 compara o consumo de energia para certas partes do setor de mineração com outros consumos globais de energia.

Tabela 1 – Exemplos de consumo de energia da mineração, global e específico

Consumo de energia	%
Consumo global de energia elétrica de cominuição	≈4
Consumo global total de energia HVAC	12
Consumo de energia HVAC de mina única	25
Bombear o consumo global de eletricidade mundial	15
O uso da bomba de eficiência máxima reduz o consumo global de energia	7
Consumo total de energia do motor da bomba em uma mina média	25-32

Fonte: IEA (2019).

Como visto, o processo de cominuição do minério consome aproximadamente 4% de toda a energia global.

4.3 CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE COMINUIÇÃO

A cominuição (britagem e moagem) é responsável por pelo menos 40% do uso total de energia na mineração e processamento mineral. Melhorar o *design* do

fluxograma irá maximizar a rejeição de ganga antes da próxima etapa a jusante e garantir as tecnologias de britagem e moagem mais eficientes em termos energéticos.

Existem muitas oportunidades específicas de eficiência energética para cominuição. Estes são mais bem aplicados ao projeto de circuitos de cominuição quando um aumento na capacidade é necessário ou uma mudança na dureza do minério é esperada para um circuito operacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O consumo de energia a partir do processo de cominuição em mineradoras foi tema da presente pesquisa. O objetivo da cominuição é reduzir o minério a um tamanho tal que ele possa ser processado nas indústrias de manufatura e transformação.

Como visto, o consumo energético que o processo de cominuição têm é elevado, representando aproximadamente 4% de todo o consumo global de energia. Em função disso, existe uma necessidade crescente de implementação, em larga escala, de sistemas de gerenciamento de energia com vistas à maximização do uso da energia elétrica para este processo.

O objetivo geral deste estudo era analisar o consumo de eletricidade utilizado na moagem fina nas mineradoras. Dessa forma, analisou-se como é o consumo de energia para cada tipo de atividade de mineração: a céu aberto, subterrânea e a céu aberto com refino. Essa diferença do volume de consumo de eletricidade por tipo de mina é grande: uma mina a céu aberto, por exemplo, consome cerca de 11.766 kWh/quilotonelada, uma mina subterrânea 10.241 kWh/quilotonelada e uma mina a céu aberto com refino (cominuição) consome 33.507 kWh/quilotonelada, ou seja, 3 vezes mais.

De forma simplista, pode-se afirmar que há apenas uma direção para a eficiência energética na indústria de mineração e processamento mineral, a qual busca melhoria da eficiência dos equipamentos para que realizem o mesmo processo com um consumo muito menor em termos energéticos. É preciso aprimorar os processos, se realmente o objetivo a ser alcançado seja o atendimento da crescente demanda com eficiência em termos de energia e custos.

REFERÊNCIAS

- ALIGLERI, Lilian et al. **Gestão industrial e produção sustentável**. São Paulo: Saraiva, 2016.
- CAPELLI, Alexandre. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Érica, 2013.
- CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem**. 5ª ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2018.
- EIA. Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2021**. EIA: Washington, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>. Acesso em 10 jan. 2022.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6a ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- HUMPHREYS, David. **The Remaking of the Mining Industry**. London: Palgrave Macmillan, 2015.
- IEA. International Energy Agency. **World Energy Statistics 2019**. Paris: IEA, 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1787/2e828dea-en>. Acesso em 15 jan. 2022.
- KAWATRA, S. Komar (editor). **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook**. Littleton: SME, 2019.
- LUZ, Adão Benvindo da. et al. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.
- NORGATE, Terry et al. Assessing the environmental Impact of metal production processes. **Journal of Cleaner Production** 15(8-9):838-848, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222402610_Assessing_the_environmental_Impact_of_metal_production_processes. Acesso em 21 jan. 2022.
- NRCAN; Natural Resources Canada. **Green Mining Initiative Energy Efficiency**. Ontário: NRCAN, 2015. Disponível em: <http://www.nrcan.gc.ca/miningmaterials/green-mining/8218>. Acesso em 21 abr. 2021.
- OKRUSCH Martin, FRIMMEL Hartwig E. **Mineralogy: An Introduction to Minerals, Rocks, and Mineral Deposits**. Heidelberg; Springer, 2020.
- QUADRAT-ULLAH, Hassan; PANTHALLOR, Pramela Nair. **Operational Sustainability in the Mining Industry: The Case of Large-Scale Open-Pit Mining (LSOPM) Operations**. Sigapore: Springer Singapore, 2020.
- REVUELTA, Manuel Bustillo. **Mineral Resources**. New York: Springer, 2018.
- ROONWAL, G.S. **Mineral Exploration: Practical Application**. Singapore: Springer,

2018.

ROSSITER, Alan P., JONES, Beth P. **Energy Management and Efficiency for the Process Industries**. Hoboken: Wiley, 2015.