

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS.**

**Energia nas operações de desmonte de rocha e suas influências na moagem de
minérios**

Porto Alegre

2017

Marcelo Ribeiro Carlos

Energia nas operações de desmonte de rocha e suas influências na moagem de minérios

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial a obtenção ao título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Porto Alegre

2017

MARCELO RIBEIRO CARLOS

**ENERGIA NAS OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHA E SUAS
INFLUÊNCIAS NA MOAGEM DE MINÉRIOS**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovado em: 19/12/2016

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Nome do Prof. Orientador

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Nome do Prof. Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Enrique Munaretti – DEMIN/UFRGS

Profa. Dra. Vlândia Cristina de Souza – PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Raul Oliveira Neto - UNIPAMPA

Dedico este trabalho a
minha família e amigos, base
de tudo, pela compreensão e
apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À minha família,

em todos os momentos de compreensão e parceria durante essa jornada.

Ao amigo André Vieira que viabilizou esse projeto e me ofereceu essa oportunidade.

Ao corpo docente do DEMIN, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho, em especial ao professor Jair Koppe e Enrique Munaretti pelo conhecimento e direcionamento ao longo do trabalho.

E, por fim, aos colegas de projeto que me ajudaram com informações, dados e experiência de campo desse mundo novo que conheci e aprendi a admirar.

RESUMO

Energia é um insumo estratégico na mineração, pois é fundamental na viabilidade das operações mineiras e importante na manutenção de custos operacionais baixos e competitivos. Por esse motivo, toda iniciativa que visa a busca por eficiência no consumo de energia é importante para a competitividade das mineradoras. Vários insumos energéticos são utilizados nas operações unitárias de mineração. Os exemplos mais comuns são diesel, eletricidade, gás natural, carvão e explosivos.

O objetivo desse trabalho é estudar, do ponto de vista energético, as atividades realizadas no processo de desmonte de rochas, em um complexo minerador de minério de ferro, visando a melhor utilização da energia no desmonte de rocha para aperfeiçoar as operações unitárias subsequentes de processamento de minérios. Um foco maior foi dado à economia de energia nas moagens de bolas da planta de beneficiamento e concentração, provocada pelas modificações e melhorias realizadas no desmonte de rocha.

A metodologia consistiu na análise de diversos desmontes de rocha variando a razão de carga de explosivos no complexo minerador alvo desse trabalho. Os produtos desses desmontes foram acompanhados até a sua entrada na planta de beneficiamento. Durante o processamento desses materiais nas moagens da planta, foram coletadas e analisadas as grandezas elétricas resultantes e comparadas com uma linha de base gerada antes do início do trabalho. Os dados foram analisados com o objetivo de visualizar a influência do aumento da razão de carga na performance energética da operação de moagem.

Em paralelo, também, foram analisadas as situações operacionais e dificuldades existentes nas medições de campo e nos acompanhamentos de consumos energéticos dos processos unitários, assim como a infraestrutura necessária para que uma variável tão importante como energia elétrica possa ser monitorada de forma adequada. Por fim, foi abordada a importância, a metodologia e os resultados da redução de emissões de CO₂ provenientes da economia de energia de todo o trabalho realizado em campo.

Os resultados apresentados mostram que mesmo com um aumento significativo da alimentação de material compacto (maior WI) nas moagens, o consumo energético total dessa operação unitária não aumentou. Isso gerou uma potencial economia específica de energia e a consequente redução de emissões de CO₂ na atmosfera, além de viabilizar o processamento de material mais compacto nas mesmas linhas de processo. Esse comportamento sugere que uma melhor energia gasta no desmonte de rocha pode impactar positivamente na produtividade e nos custos de produção do minério ao longo de sua cadeia produtiva.

Palavras-chave: Energia, Medições de Energia, Emissões de CO₂, Mineração, Minério de Ferro, Explosivos, Desmonte de Rocha, Moagem.

ABSTRACT

Energy is a mining strategic source, critical in mining operations feasibility and important to maintain low operational costs in a competitive level. For this reason, any initiative aimed at searching for energy efficiency is important for mining companies' competitiveness. Mining operations need several energy sources. Most common examples are diesel, electricity, natural gas, coal and explosives.

This text aims to address, from an energy perspective, a study carried out in an iron ore mining complex, which had as main objective to reach a better rock blasting energy utilization to improve subsequent mining operations. A greater focus was given to energy savings in ball mills operations of a beneficiation and concentration plant, impacted by modifications and improvements made in rock blasting.

Methodology consisted in monitoring several rock blasting, carried out in this mining complex, varying explosive charge ratio. Products of those rock blasting were monitored until they entered the processing plant. During ore processing in plant's ball mills, electrical variables were collected and analyzed, comparing to a baseline generated before the beginning of this research. All data were analyzed to show influence of explosive charge ratio increase on energy performance of the milling operation.

In parallel, operational issues and difficulties in field measurements of energy consumptions were described, as well as the necessary infrastructure that allows the variable electricity to be adequately monitored.

Besides, the methodology and results of CO₂ emissions reduction from energy savings of all fieldwork were discussed.

The research data shows that even with a significant increase in compact feed (higher Work Index), total energy consumption of mill operation did not increase. This scenario generate a potential specific energy savings and consequent reduction in CO₂ emissions in the atmosphere. In addition, enables more compact material to be processed in the same process lines. This behavior suggests that a better energy spent on rock blasting can positively affect productivity and ore production costs along its production chain.

Keywords: Energy, Power Measurements, CO₂ emissions reduction, Mining, Iron Ore, Explosives, Blasting Rock, Milling, Productivity .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Crescimento do consumo específico de energia elétrica e sua comparação com a produção | 13 |
| Figura 2 – Evolução de alguns países no uso de energia e o crescimento do Produto Interno Bruto | 18 |
| Figura 3 – Estequiometria e quantidade de energia liberada na reação de várias proporções de nitrato de amônia e diesel. | 23 |
| Figura 4 – Velocidades de detonação dos explosivos mais comuns encontrados no mercado | 24 |
| Figura 5 – Matriz Elétrica Brasileira | 25 |
| Figura 6 – Funcionamento do Sistema Interligado Nacional – Configurações .. | 26 |
| Figura 7 – Histórico do “Preço de Liquidação de Diferenças” (PLD) demonstrando a variação do preço médio de energia elétrica no Brasil | 27 |
| Figura 8 – Exemplo da composição do preço de energia elétrica no Brasil de um consumidor hipotético | 28 |
| Figura 9 – Subprodutos do desmonte de rocha | 30 |
| Figura 10 – Variação do Consumo de Energia de um Moinho SAG X razão de carga do desmonte em uma mina de minério de ouro | 32 |
| Figura 11 – Representação Gráfica de 5 anos de operação em Minério de Ferro em Minnessota, EUA..... | 33 |
| Figura 12 – Exemplo de britador de Mandíbulas | 35 |
| Figura 13 – Diagrama simplificado de um britador giratório | 35 |
| Figura 14 – Prédio da Moagem – Usina de Conceição 2 – Itabira..... | 38 |
| Figura 15 – Relação entre velocidade do moinho e consumo energético..... | 39 |
| Figura 16 – Work Index em função da razão de carga para Taconitos | 41 |
| Figura 17 – Diagrama das redes de medição de consumo de energia elétrica – Usina de concentração de Conceição 2..... | 43 |
| Figura 18 – Detalhamento do diagrama das redes de medição de consumo de energia evidenciando a medição individual de cada moinho da usina analisada | 44 |
| Figura 19 – Curva granulométrica com o resultado médio dos desmontes realizados em campo durante os testes | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 – Antes das implementações no desmonte (imagem superior) e depois (imagem inferior) ilustrando os resultados em campo ao utilizar as novas razões de carga e melhorias no desmonte | 47 |
| Figura 21 – Comparação do consumo específico das moagens com a razão de carga praticada em cada desmonte..... | 49 |
| Figura 22 – Consumo específico britagem e moagem, WI x razão de carga de explosivos..... | 51 |
| Figura 23 – Disponibilidade energética do ANFO de acordo com o conteúdo de óleo combustível na mistura..... | 55 |
| Figura 24 – Comparação entre países dos fatores de emissões de gases de efeito estufa | 58 |
| Figura 25 – Evolução do fator médio de emissões de CO ₂ do Brasil..... | 59 |
| Figura 26 – Emissões de CO ₂ para cada razão de carga..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Utilização de insumos energéticos no desmonte e na moagem de minérios de ferro | 12 |
| Tabela 2 – Utilização de insumos energéticos na cadeia de minério de ferro | 16 |
| Tabela 3 – Referências de granulometria e eficiência energética dos processos de redução de tamanho em minério de ferro..... | 40 |
| Tabela 4 – Parâmetros médios antes e depois dos testes realizados em campo.. | 45 |
| Tabela 5 – Resultados da redução do consumo específico de energia das moagens analisadas..... | 48 |
| Tabela 6 – Ganhos energéticos e financeiros nas moagens | 49 |
| Tabela 7 – Comparativo de preços da disponibilidade energética entre eletricidade e explosivos para o complexo minerador analisado | 53 |
| Tabela 8 – Comparativo de custos de energia considerando a qualidade de ANFO encontrada no complexo mineiro estudado | 56 |
| Tabela 9 – Números de redução de energia e emissões de CO2 na atmosfera ... | 61 |

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 – Introdução..... | 12 |
| 1.1 Motivação do Trabalho..... | 12 |
| 1.2 Meta e Objetivos Específicos | 13 |
| 1.3 Metodologia | 14 |
| Capítulo 2 –Revisão Bibliográfica..... | 16 |
| 2.1 Mineração e energia | 16 |
| 2.2 Insumos Energéticos – Explosivos e Energia Elétrica..... | 20 |
| 2.2.1 ANFO – Ammonium Nitrate Fuel Oil | 20 |
| 2.2.2 Energia Elétrica..... | 24 |
| 2.3 Energia e Desmonte de Rochas | 28 |
| 2.4 Britagem e Moagem de minérios..... | 34 |
| Capítulo 3 – Análises Energéticas dos dados de campo e resultados..... | 42 |
| 3.1 Contextualização..... | 42 |
| 3.2 Medição dos consumos de energia elétrica | 42 |
| 3.3 Desmontes testes e sua influência nas moagens | 44 |
| 3.4 Análise dos custos de energia..... | 52 |
| 3.5 Contabilização dos ganhos energéticos e de emissões de CO ₂ | 57 |
| Capítulo 4 – Recomendações finais para todo o processo analisado | 62 |
| Capítulo 5 – Conclusões e recomendações..... | 66 |

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Motivação do Trabalho

Energia é um insumo essencial para todos os processos de transformação industrial. Seu suprimento deve ser tratado de forma estratégica por todas as empresas, pois sua disponibilidade e custo podem ser determinantes na viabilidade técnica e econômica de qualquer empreendimento. O foco desse trabalho foi o estudo da etapa de desmonte e seus impactos na moagem dos minérios de ferro. Destacam-se na tabela 1, os insumos energéticos normalmente utilizados nessas duas operações.

Tabela 1 – Utilização de insumos energéticos no desmonte e na moagem de minérios de ferro

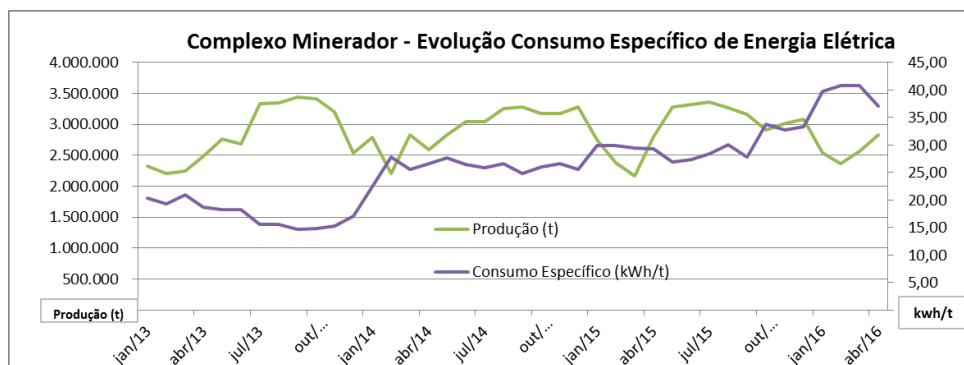
| Uso de Energéticos – Cadeia Produção Mina/Usina para Minério de Ferro | | | | | | |
|---|------------|----------|--------------|------------|----------|--------|
| | Perfuração | Desmonte | Carregamento | Transporte | Britagem | Moagem |
| Energia Elétrica | x | | x | | x | x |
| Diesel | x | x | x | x | | |
| Explosivos | | x | | | | |

Fonte: Próprio autor (2016)

O complexo minerador analisado está aumentando seu consumo de energia elétrica por conta do empobrecimento de seu minério e da dificuldade de se alcançar a liberação necessária devido às mineralogias que estão disponíveis para lavra. Grandes investimentos em novas instalações de suprimento de energia elétrica e de tratamento de minérios foram realizados no complexo para atender a essa nova realidade.

A Figura 1 mostra o aumento do consumo específico de energia do complexo nos últimos 3 anos. Apesar das variações mensais de produção, pode-se dizer que o volume médio de produção se manteve praticamente o mesmo. Já o consumo de energia subiu significativamente, chegando a um valor médio com 100% de aumento.

Figura 1 – Crescimento do consumo específico de energia elétrica e sua comparação com a produção



Fonte: Próprio Autor (2016)

Diante desse cenário, será necessária uma melhor gestão desse insumo estratégico para a operação mineira, uma vez que suas variações de preço e consumo irão impactar muito no custo total de produção. Uma das ações realizadas nesse complexo minerador e objeto desse estudo foi realizar testes de desmonte de rocha, variando a razão de carga de explosivos, e estudar qual o comportamento do consumo energético das moagens presentes nessa operação. O foco dado a moagem se justifica pelo percentual de importância que essa operação unitária tem no consumo total de energia elétrica do complexo.

1.2 Meta e Objetivos Específicos

A meta desse trabalho é mostrar que utilizando melhor a energia no processo de desmonte de rocha, pode-se alcançar melhorias ao longo de todo o processo produtivo de minério de ferro, principalmente nas operações de moagem.

Visando alcançar a meta estabelecida, esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Identificar as dificuldades existentes nas usinas de beneficiamento para a criação de uma sistemática de gestão do consumo de energia elétrica por processo unitário;

- Elaborar sistemática de comparação dos custos de energia dos explosivos x custos de energia elétrica utilizadas nessa operação;
- Explicar e quantificar os ganhos potenciais de redução de emissões de CO₂ obtidos nos testes de campo variando a razão de carga explosiva;
- Elaborar recomendações para viabilizar uma melhor gestão energética do processo produtivo analisado;

1.3 Metodologia

Para o alcance da meta e dos objetivos específicos, o trabalho foi elaborado seguindo a metodologia a seguir descrita:

1 - Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica tem como objetivo o aprimoramento da teoria relacionada aos assuntos mais pertinentes ao trabalho realizado. Foram abordados assuntos como qualidade de explosivos, sistemas de britagem e moagem, custos e suprimento de energia elétrica e desmonte de rocha. Estas informações estão distribuídas ao longo do capítulo 2.

2 - Acompanhamento das atividades de campo do projeto

Foram realizados vários desmontes de rocha variando a razão de carga, e todo o material desmontado foi acompanhado até a planta de beneficiamento de minério. Durante o processamento, foram medidos os consumos energéticos da operação de moagem da planta com a finalidade de identificar algum comportamento de redução do consumo de energia ou variação da produtividade dessa operação unitária. Após coletados, os dados foram analisados buscando identificar qual o comportamento da moagem para cada razão de carga utilizada no desmonte. Somado a essa análise, foram identificadas outras oportunidades de melhoria no processo, as quais foram descritas ao longo desse trabalho.

3 – Análise dos dados coletados em campo e das oportunidades de melhoria.

Foi feita a análise dos dados coletados em campo e a visualização das informações obtidas. Além disso, foram adicionadas outras análises pertinentes ao assunto, tais como: interferências de custo nos insumos energéticos e a contabilização dos ganhos potenciais com a redução de emissão de CO₂ na atmosfera. Estas informações estão distribuídas ao longo do capítulo 3.

4 – Elaboração de oportunidades de melhoria operacionais e de gestão energética

Diante dos dados apresentados, o capítulo 4 descreve oportunidades de melhoria identificados e visualizadas ao longo do trabalho.

Capítulo 2 –Revisão Bibliográfica

2.1 Mineração e energia

A utilização de insumos energéticos ocorre em praticamente todas as fases da mineração, desde a prospecção até a entrega do produto ao cliente.

Na Tabela 2 estão listados os principais insumos energéticos utilizados na cadeia de produção do minério de ferro.

Tabela 2 – Utilização de insumos energéticos na cadeia de minério de ferro

| Insumo | Principais Atividades |
|------------------|---|
| Energia Elétrica | Perfuração, carregamento, usinas de beneficiamento de minérios, correias transportadoras, operações portuárias. |
| Diesel | Perfuração, carregamento, transporte, operações ferroviárias. |
| Explosivos | Operações de desmonte de rocha |
| Antracito | Pelotização |
| Gás Natural | Fornos de pelotização |
| Óleo Combustível | Fornos de pelotização e navegação |

Fonte: Próprio Autor (2016)

Os principais insumos energéticos estudados nesse trabalho são: os explosivos, utilizados nas operações de desmonte de rocha e a energia elétrica utilizada nas operações de moagem de minérios friáveis e, principalmente, de compactos que serão processados na usina de beneficiamento de Conceição 2. Sendo insumos de importância estratégica para as operações mineiras, seus impactos nos custos de produção e na produtividade das operações unitárias não podem ser ignorados pelos gestores operacionais.

Realizar o trabalho de *benchmark* dos consumos energéticos em processos de mineração é desafiador. Existem muitas variáveis de processo que podem se diferenciar de mina para mina. As características físicas e químicas dos minérios variam muito em

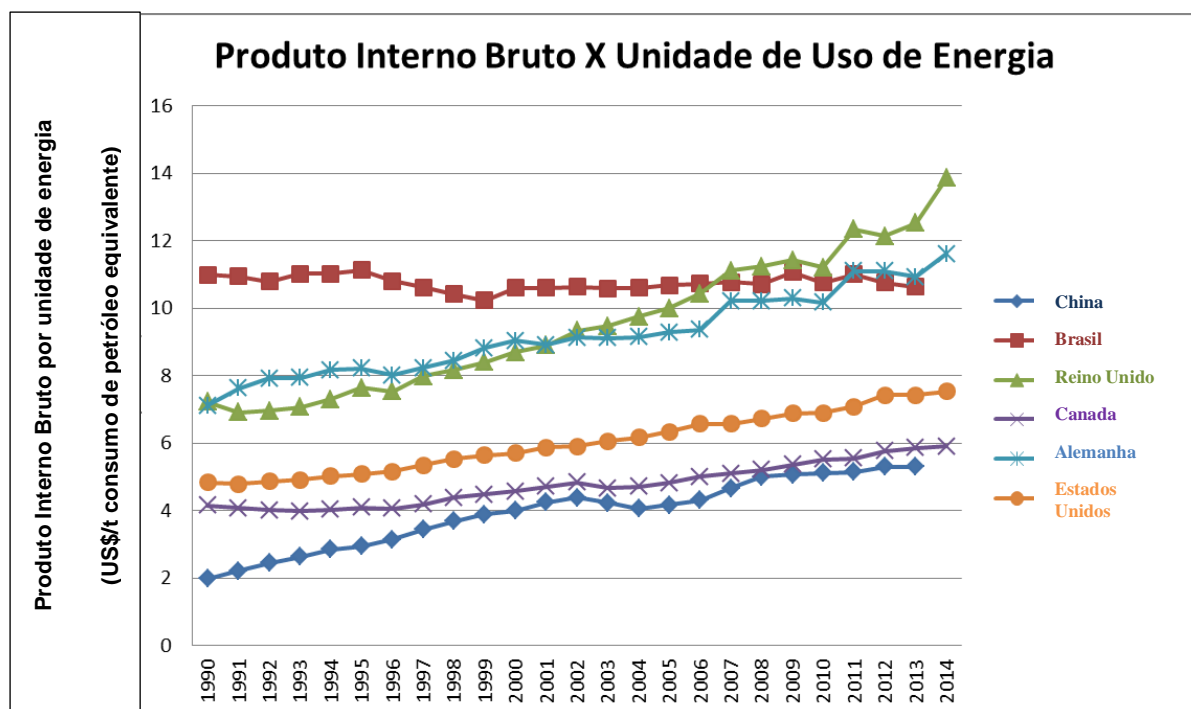
função da geometria do depósito, das litologias e respectivas mineralogias dos litotipos. Todas estas afetam muito a forma como o minério é manuseado e beneficiado nas plantas de concentração. Mesmo assim, realizar comparações entre processos minerais diferentes podem trazer muitas informações relevantes na busca pela melhoria de processos e redução de custos nas operações.

A preocupação das empresas de mineração com o uso e gestão de insumos energéticos tem aumentado nos últimos anos. Isto ocorreu devido à falta de oferta e o aumento dos custos de alguns desses insumos. Ainda, o aumento nos custos totais de produção tem feito as empresas investirem em energia renováveis, projetos de eficiência energética e sistemas de monitoramento de energia com a intenção de otimizar o seu uso final.

A utilização dessas ferramentas de monitoramento do consumo energético ajuda os engenheiros de processo a identificar gargalos e oportunidades de redução do custo de produção. Esses sistemas disponibilizam dados que serão base para a tomada de decisão dos níveis superiores da empresa, que com informações mais confiáveis, podem decidir com mais segurança sobre projetos de redução do consumo energético.

Segundo Gregg (2013), ao redor do mundo, diversos setores da indústria têm conseguido resultados consideráveis na gestão dos consumos energéticos. Com a necessidade de aumento da eficiência energética, as indústrias estão realizando projetos de racionalização do consumo energético nos seus processos internos. Para isto, elas vêm utilizando melhores tecnologias, implantando novos projetos de geração, com fontes renováveis, além de adotar melhores estratégias na compra de equipamentos e insumos. Países como Canadá, Alemanha e EUA possuem avanços significativos nessa área, quando se compara a utilização de energia em suas diversas fontes versus o crescimento de seu PIB. Isto demonstra uma tendência crescente na melhor utilização dos energéticos na geração de valor de suas indústrias conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Evolução de alguns países no uso de energia e o crescimento do Produto Interno Bruto



Fonte Dados: The World Bank (2014)

Apesar desses avanços, o setor mineiro e metalúrgico brasileiro tem sido relutante na adoção de algumas alternativas tecnológicas para melhoria de sua eficiência energética. As razões são diversas, mas em geral as principais são:

- a necessidade do consumo de energia intrínseca do processo de transformação de minerais que pode esconder oportunidades de racionalização.
- a complexidade e interdependências dos processos que dificulta a correta gestão dos consumos energéticos.
- que, apesar do custo de energia no Brasil ser considerado alto comparado aos demais países, existe um senso comum dominante no mercado de mineração de que a energia tem custo baixo em comparação a outros insumos.
- a falta de incentivos e políticas efetivas que suportem projetos de racionalização de consumos energéticos e, por fim,

- a ausência de políticas corporativas e de adoção de sistemas de gerenciamento do consumo energético eficiente, os quais possibilitem análises técnicas de qualidade na busca pelo consumo ideal.

Uma grande dificuldade no trabalho com projetos de gestão de energia e eficiência energética é a visão de curto prazo da indústria. Os resultados de projetos de otimização energética geralmente são de longo prazo e necessitam de outros projetos em paralelo para que ganhos de curto prazo aconteçam. Assim, projetos de eficiência e gestão de energia competem de igual para igual com projetos de produção direta. Ambos são igualmente avaliados por indicadores financeiros, tais como: valor presente líquido, taxa interna de retorno e tempo de *payback*. Como os projetos de produção direta costumam ter indicadores financeiros melhores no curto prazo, geralmente são os escolhidos nas rodadas de avaliação de investimento.

Uma alternativa para melhorar, mas não, necessariamente resolver esse cenário, seria a contabilização das emissões de carbono evitadas com a redução do consumo energético. Apesar das imensas dificuldades para transformar os créditos de carbono em resultados financeiros, tal medida pode ajudar muito grandes empresas a melhorar sua imagem de sustentabilidade no mercado.

Em diversas empresas de grande porte e de todos os setores, programas de eficiência energética e gestão de energia implantados ou em implantação. Empresas como Braskem, Petrobras, Copel, Cemig são referências na área de conservação de energia. No setor mineral, essa iniciativa, mesmo que tardia, está sendo adotada nos grandes players do mercado.

Pontos importantes precisam ser definidos em um bom programa de eficiência energética. O primeiro é a definição da política de energia da empresa e sua estratégia de conservação de energia. Essa estratégia deve ser definida e implementada em todos os níveis e áreas da empresa para que um objetivo em comum possa ser alcançado. Com isso, pode-se alcançar, em todos os níveis da corporação engajados e trabalhando de forma coordenada, melhores resultados. Os dados de campo dos consumos energéticos das unidades industriais devem estar disponíveis para análise e tomada de decisão. Geralmente a disponibilização dessas informações não costuma ser trivial na indústria,

pois, muitas instalações não possuem o nível adequado de medição e instrumentação. Essa condição, se não tratada no momento da construção do empreendimento, torna a instalação, a posteriori, bastante complexa e onerosa para qualquer empresa. Para mitigar essa dificuldade as empresas devem adotar, de forma escalonada e de acordo com o orçamento e necessidade, a implantação de redes de medição de consumos energéticos, pois sem dados não existe gestão.

Uma quantidade imensa de energia é necessária no processo de beneficiamento de minérios (Eloranta, 2015). Como essa energia é consumida em processos complexos e interdependentes, os projetos de eficiência energética devem dar especial atenção a essas variáveis. Assim, poderia ocorrer de forma efetiva melhorias no consumo, sem alterar outras variáveis, tais como: volume de produção, qualidade do produto final e rendimento operacional das instalações de produção.

Cada etapa do processo de produção mineral possuiu sua necessidade de energia. Como esses processos, geralmente, consomem muita energia surge, o interesse pela racionalização dos mesmos. Os projetos de eficiência energética e gerenciamento de energia devem focar nos desperdícios ou perdas do processo, pois são onde estão as maiores oportunidades.

2.2 Insumos Energéticos – Explosivos e Energia Elétrica

2.2.1 ANFO – Ammonium Nitrate Fuel Oil

Segundo Fordham (1980), Worsey (2015) e Munaretti (2015), o ANFO é considerado um explosivo simples e é resultante da mistura de nitrato de amônia e diesel. O nitrato de amônia é poroso e deve absorver o diesel aplicado na proporção ideal. Tanto o nitrato de amônia quanto o óleo diesel não são considerados explosivos quando estão separados e podem ser transportados separadamente sem a necessidade do cumprimento de regulamentação específica que é necessária para outros explosivos. Esse é um dos motivos que o ANFO é amplamente utilizado na área de mineração.

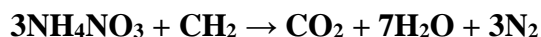
Os explosivos são materiais energéticos, pois possuem grandes quantidades de energia química armazenada. Essa energia é liberada por meio do processo de detonação

que é uma reação exotérmica rápida onde se libera uma onda de choque que se propagada e é suportada pela reação química desencadeada pelo processo inicial. Toda detonação de explosivo provoca uma onda de choque, calor e gases resultantes das reações químicas envolvidas. Quando essa energia é liberada da forma correta, produz fragmentação e fadiga no material a ser desmontado.

De acordo com Sen (1995), a energia liberada na maioria dos explosivos varia de 700 cal/g a 1500 cal/g. O quanto desta energia é liberada no desmonte depende de diversos fatores, tais como: fabricação, forma de armazenamento, além das técnicas adotadas no planejamento e execução. Assim, o desempenho de um explosivo não é determinado apenas pelo conhecimento da energia total liberada por ele. Este depende da eficiência de liberação da energia, da quantidade utilizada exclusivamente para fragmentação de rocha, assim como do material fragmentado.

O exemplo a seguir, retirado do livro Blasters Handbook (ISEE, 1999), mostra o cálculo da energia calorífica de reação liberada para o ANFO. Algumas simplificações nas fórmulas foram realizadas sem prejuízo do entendimento final do exercício que é calcular a energia disponível na detonação desse explosivo.

Reação de detonação:



Onde:

Reagentes:

$3\text{NH}_4\text{NO}_3$ (Nitrato de amônia)

CH_2 (Óleo Diesel)

Produtos da reação:

CO_2 (Dióxido de carbono)

$7\text{H}_2\text{O}$ (Água)

3N_2 (Nitrogênio)

Energia na formação dos reagentes:

$$QR = 3 \times (-87,3) + (-13) = -274,9 \text{ kcal}$$

Energia na formação dos produtos:

$$(QP) = (-94,1) + 7 \times (-57,8) + 3 \times (0) = -498,7 \text{ kcal}$$

$$\text{Calor da reação } (QP - QR) = -498,7 - (-274,9) = -223,8 \text{ kcal}$$

Peso molecular do composto:

$$3 (\text{Nitrato Amônia}) + 1 (\text{Óleo Diesel}) = 3 \times (80,1) + 1 \times (14) = 254,3 \text{ g.}$$

A energia disponível em 1kg de ANFO, considerando a proporção ideal dos compostos seria:

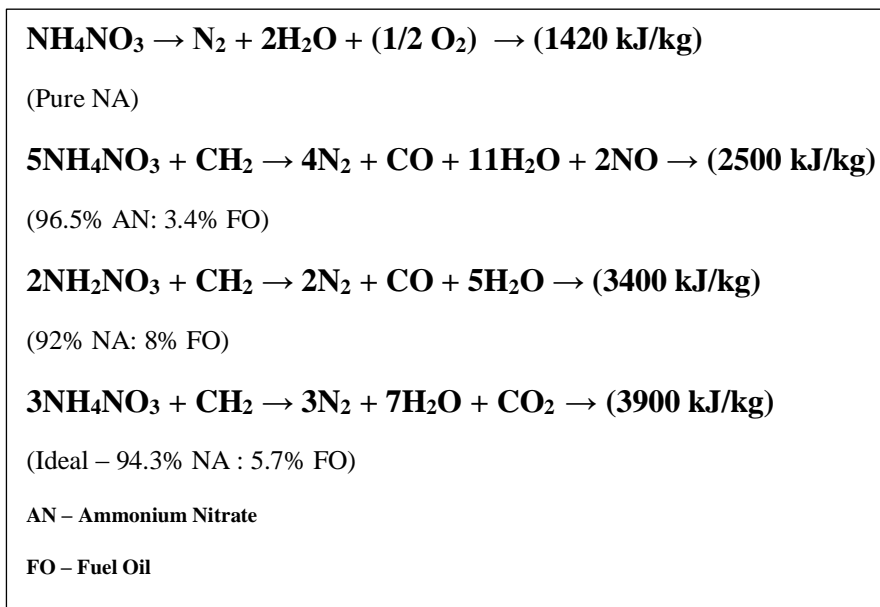
$$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = \frac{-223,8 \text{ kcal}}{254,3 \text{ g}} \times \frac{1,000 \text{ g}}{\text{kg}} = -880,0 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = -880 \text{ cal/g}$$

Fonte: ISEE (1999) Blasters Handbook.

O ANFO é o explosivo que possui a maior quantidade de energia por quilograma. Na sua reação ideal, ele é convertido em gases e água, não deixando resíduos sólidos. Para que essa energia seja liberada em sua totalidade, a proporção ideal entre nitrato de amônia e óleo diesel deve ser sempre respeitada (Munaretti, 2002). Normalmente, utiliza-se um percentual entre 2% a 8% de óleo diesel na mistura com nitrato. Uma porcentagem baixa de óleo diesel (abaixo de 5,5%) reduz a energia de trabalho do explosivo e favorece a liberação de óxidos de nitrogênio (NOx) no meio ambiente. Em contrapartida, uma porcentagem alta de óleo (acima de 5,7%), além de desperdiçar o energético, reduz a sensibilidade do ANFO e o processo de detonação irá produzir monóxido de carbono (CO) reduzindo assim a energia disponível no desmonte.

A Figura 3 mostra alguns exemplos de proporções de misturas de nitrato de amônia e óleo diesel. Vale enfatizar a diferença de energia química total entre as misturas. Segundo Sen (1995), uma proporção fora do ideal (em torno de 5,7% de óleo diesel) pode significar uma performance muito abaixo do esperado ou um possível aumento de custos com explosivos uma vez que a utilização de explosivos menos energéticos provoca a necessidade de maiores quantidades do mesmo.

Figura 3 – Estequiometria e quantidade de energia liberada na reação de várias proporções de nitrato de amônia e diesel.



Fonte: Blasting Technology, Sen. (1995)

A presença de água nos furos de carga pode ser um grande problema para a utilização do ANFO. A água dissolve rapidamente as partículas de nitrato de amônia, dessensibilizando o explosivo e dificultando uma fragmentação adequada das rochas no desmonte. Segundo Worsey (2014), a solução para evitar o contato com a água em excesso seria utilizar uma mistura com emulsões explosivas ou apenas emulsões. Isto, também, traria benefícios para o meio ambiente.

A densidade média do ANFO pode variar de 0,77 a 1,1 g/cm³. Ela pode ser modificada com a deposição pneumática do nitrato de amônia ou em casos mais extremos com a quebra das partículas aglomeradas via pequenas moagens. O aumento de densidade possibilitaria o aumento das velocidades de detonação e de energia disponível para desmonte. A variação da densidade do ANFO deve ser controlada, pois quando próxima à 1,2g/cm³, o explosivo corre o risco de não detonar pela perda de sensibilidade.

A velocidade de detonação é a grandeza que mede a velocidade da onda de choque no momento da detonação de terminado explosivo. Está muito relacionada à forma de carregamento do explosivo assim como suas características químicas. A densidade da carga, confinamento do explosivo e o diâmetro do furo são variáveis que precisam ser levadas em consideração para se conseguir o desempenho desejado. Velocidades mais altas são necessárias para o atingimento de melhores resultados de fragmentação de rocha segundo Sen (1995). A Figura 4 mostra a comparação da velocidade de detonação do ANFO com outros tipos de explosivos disponíveis no mercado.

Figura 4 – Velocidades de detonação dos explosivos mais comuns encontrados no mercado

| | | |
|---|---|-------------------------------------|
| 1. ANFO | → | 2200 – 4000 m s⁻¹ |
| 2. Watergels | → | 3500 – 5000 m s⁻¹ |
| 3. Emulsions | → | 4500 – 6100 m s⁻¹ |
| 4. Nitroglycerine-based explosives | → | 3500 – 5500 m s⁻¹ |

Fonte: Blasting Technology, Gour C. Sen (1995)

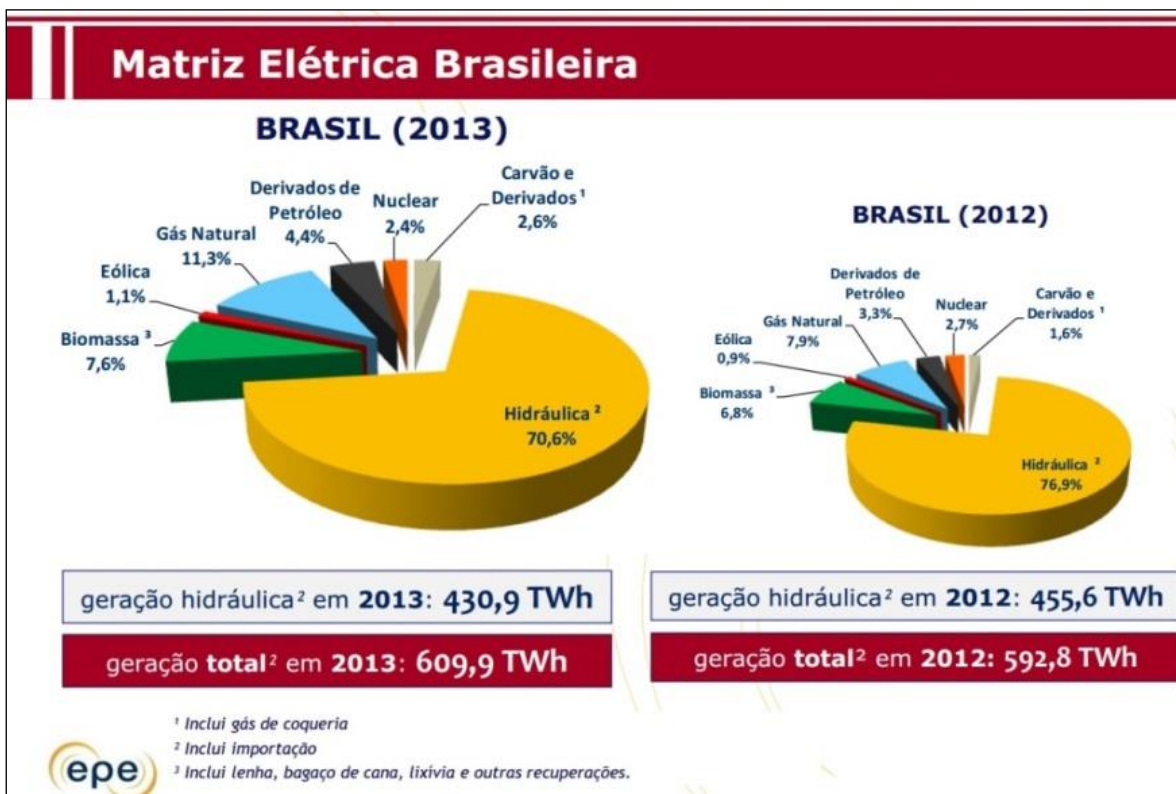
Como se pode observar, o ANFO possuiu velocidade média de detonação menor comparada aos outros explosivos. Mesmo assim, ele é, ainda hoje, o explosivo mais utilizado na mineração. Isto ocorre devido à possibilidade de fabricação própria, à razão custo/benefício (em termos energéticos) e à facilidade de manipulação em separado de seus componentes. Assim, este ainda é altamente competitivo, do ponto de vista financeiro e operacional nas operações mineiras.

2.2.2 Energia Elétrica

A Energia elétrica pode ser obtida pela conversão de diversos tipos de energia. De origem hidráulica, mecânica ou química, a geração de energia elétrica é hoje responsável por viabilizar milhares de empreendimentos mineiros ao redor do mundo. Juntamente com o diesel, a eletricidade é um insumo energético de extrema importância na cadeia produtiva do minério de ferro e seu suprimento é tratado como estratégico por todas as grandes mineradoras de classe mundial.

A Figura 5 mostra como a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável sendo a energia hidráulica e a biomassa responsável por quase 80% de toda a geração de eletricidade do país.

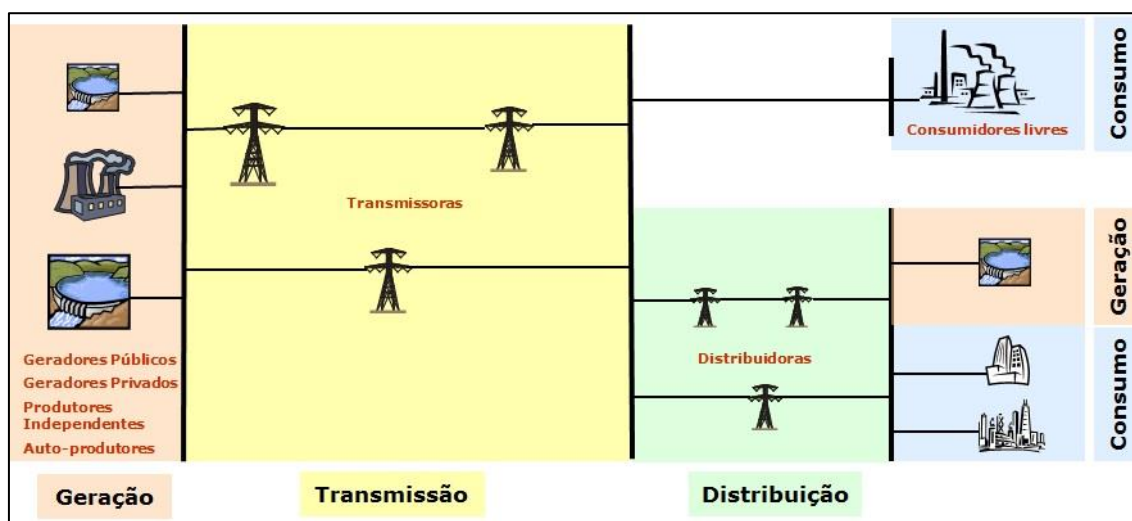
Figura 5 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética) – Ano: 2013

Segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), quase 100% da eletricidade brasileira é transmitida aos consumidores finais através do Sistema Interligado Nacional. Esse sistema é composto por empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que possuem ativos de geração e transmissão espalhados por todo o território nacional. A Figura 6 ilustra o funcionamento do Sistema Interligado Nacional e todos os agentes que fazem parte dessa estrutura.

Figura 6 – Funcionamento do Sistema Interligado Nacional – Configurações



Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética) - 2013

Todos os grandes consumidores de energia, incluindo as mineradoras, podem receber energia elétrica por meio das empresas transmissoras ou distribuidoras de energia. Essa escolha envolve variáveis como a quantidade de energia consumida, a capacidade de investimentos em infraestrutura por parte do usuário e concessionárias, questões fiscais para recolhimento de impostos, isenções de impostos e encargos dentre outras considerações. Todas essas análises devem ser feitas por pessoal qualificado pois a redução de custos com esse insumo pode ser significativa para o negócio.

Grandes consumidores de eletricidade podem realizar a compra de energia elétrica em ambiente de contratação livre. Esse ambiente permite a essas empresas a gestão de toda a cadeia de suprimento de energia elétrica, da geração ao consumo final de suas instalações. Essa gestão visa promover a melhor alocação de energia possível aos consumidores de determinada empresa, buscando os menores custos de energia possível para aquele determinado momento da atividade econômica. Essa flexibilidade dos grandes consumidores gera redução de custos significativa na aquisição desse insumo.

Uma importante estratégia na busca por redução de custos é possuir ativos para geração própria de energia. Esses ativos são peças chave para a redução do custo com energia elétrica nos ambientes de produção. Geralmente são pequenas e médias

hidroelétricas que exigem altos valores de investimento na sua construção, mas que garante energia a preços muito competitivos por um longo período, além de protegerem essas grandes empresas nos momentos de grandes oscilações de preço desse insumo muito comuns no país.

No Brasil, onde essas oscilações acontecem com grande frequência e em amplitudes muitas vezes difíceis de serem previstas, essa proteção contra oscilações se torna um diferencial competitivo importante na viabilidade de operações e em muitos mercados é um fator de sobrevivência do negócio no curto, médio e longo prazo. A Figura 7 mostra o histórico dessas oscilações de preço no país de 2003 a 2015.

Figura 7 – Histórico do “Preço de Liquidação de Diferenças” (PLD) demonstrando a variação do preço médio de energia elétrica no Brasil

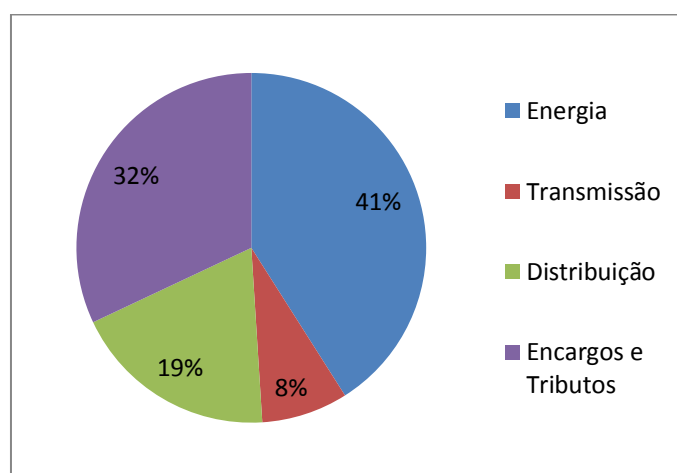


Fonte: CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica)

De acordo com a CCEE, outra vantagem de possuir ativos de geração própria de energia elétrica é a eliminação do custo com encargos e tributos embutidos na tarifa cheia

de energia cobrada dos consumidores. No Brasil, essa componente pode chegar a 32% do custo total do suprimento de energia elétrica conforme evidenciado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplo da composição do preço de energia elétrica no Brasil de um consumidor hipotético



Fonte: Abradee (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica) – Ano 2012

A utilização de energia gerada por fontes renováveis também pode trazer vantagens competitivas para as operações mineiras. Existem incentivos na redução de encargos para empresas que utilizam tais fontes de energia.

A legislação sobre encargos e tributos do setor elétrico é antiga e bastante complexa. Existem várias possibilidades de se conseguir descontos, mas muitos delas exigem investimentos consideráveis e de retorno a longo prazo. De qualquer forma, como essa parcela é considerável no custo de energia elétrica, grandes empresas deveriam elaborar estratégias para conseguir capturar essas possibilidades de redução de custos.

2.3 Energia e Desmonte de Rochas

Na cadeia de produção do minério de ferro, o desmonte é a operação unitária posterior a perfuração de rocha. Seus objetivos principais são a fragmentação e disponibilização de material para o carregamento (liberando o material que se encontra em seu estado natural), além de reduzir a granulometria a uma faixa de tamanhos

adequada para alimentar uma usina de beneficiamento. Por isso, a energia fornecida pelos explosivos, nesta etapa, deve ser bem planejada, visando ao menor custo e a maior produtividade das operações posteriores.

As equações de Ash (1963) possibilitam a elaboração de um *layout* inicial da malha de perfuração, dentro outros parâmetros, mas não podem ser considerados como um *design* otimizado. Existem muitas interações empíricas nessas metodologias que são importantes, pois produzem resultados satisfatórios em uma variedade muito grande de aplicações. Assim, seria adequado afirmar que estas equações produzem um *layout* básico e mínimo.

De acordo com Worsey (2014), a escolha do explosivo a ser utilizado depende de uma série de fatores a ser analisados no momento do planejamento do desmonte. Variáveis técnicas como dureza da rocha, presença de água, intensidade de faturamento da rocha, máquina de escavação e carregamento disponível, estabilidade dos taludes e maciços adjacentes, localização próxima de centros urbanos, logística de transporte e manuseio em campo são algumas das considerações para a escolha do explosivo mais adequado. Aspectos econômicos, também, devem ser considerados como preço dos explosivos, custo do frete, disponibilidade do explosivo nas quantidades necessárias as demandas da mina e o custo e disponibilidade de estrutura para armazenamento desses insumos.

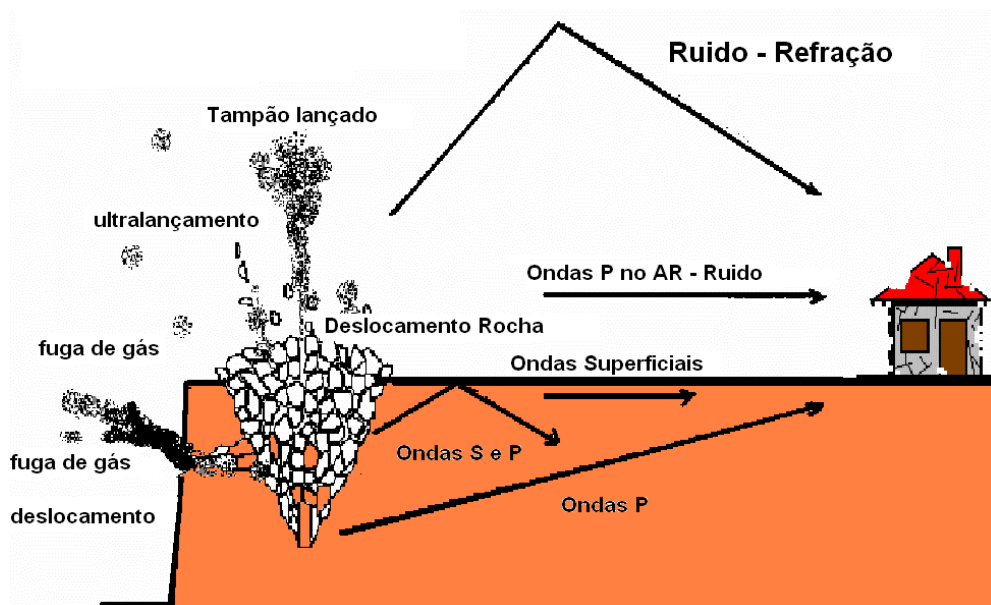
Segundo Konya (1995) duas formas básicas de energia são criadas pela reação explosiva: energia de choque e de gás. No momento da detonação há liberação de uma energia de choque, produto da pressão de detonação, a qual é liberada em forma de onda transitória. Esta energia será transmitida ao maciço pelo contato entre a coluna de carga e a rocha, sendo que a maior parte de energia útil será desperdiçada em forma de deslocamento de ar. A energia de choque é uma das responsáveis pela quebra do maciço rochoso, no entanto, é o fator de menor influência, sendo responsável apenas por microfissuras em torno do furo e das descontinuidades.

A energia do gás liberada será a responsável pela maior parte da fragmentação em desmontes confinados. Esta energia é gerada na expansão de gases quando a reação química do explosivo está completa. Esses gases exercem pressão sobre as paredes do

furo decorrentes de sua expansão. Imediatamente após a detonação, há uma pressão excessiva sobre as paredes do furo, a qual irá se fraturar em diversas direções. Essas direções e a extensão das fraturas podem ser controladas pela escolha de uma distância adequada entre o furo e a face livre, denominada afastamento ou “burden” (Konya, 1995; Scott et al, 1996; Bozic, 1998).

O planejamento do desmonte de rochas deve considerar diversas variáveis em seu dimensionamento. Distância entre linhas de furos, espaçamento entre furos, tamanho e material utilizado no tampão, altura do furo, subperfuração, geometria da malha de perfuração, escolha do explosivo e acessórios de detonação, temporização, logística de cerco e paradas operacionais para desmontes são as principais. O correto planejamento do desmonte visa o melhor aproveitamento possível da energia proveniente do explosivo (Worsey, 2014). Em média, 96% da energia oriunda dos explosivos deveria ser utilizada na fragmentação e deslocamento do material a ser desmontado. O restante é perdido na forma de calor, vibração, fuga de gás no tampão e fissuras e em ultra lançamentos (Munaretti, 2014). A Figura 9 ilustra as principais perdas de energia que acontecem no desmonte de rocha.

Figura 9 – Subprodutos do desmonte de rocha



Fonte: Aula “Desmonte Controlado” – Munaretti (2014)

A perda de energia no desmonte pode ser evitada com algumas ações de planejamento do desmonte e questões operacionais. A seguir alguns exemplos de como evitar essas perdas:

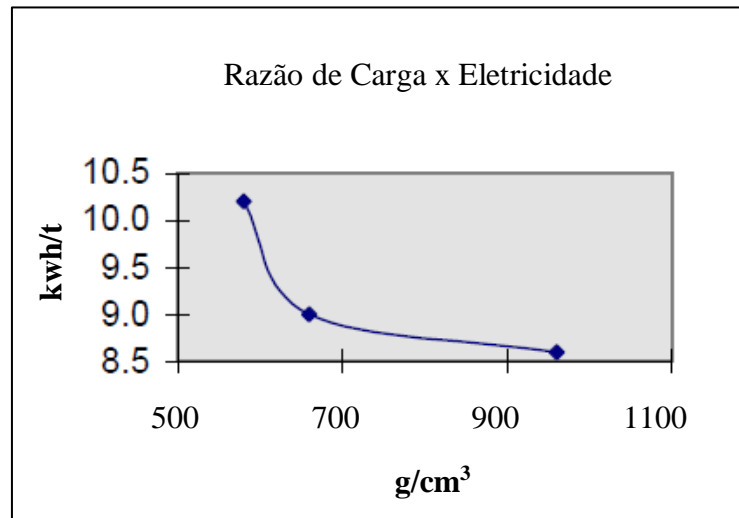
- Ultra lançamentos: pode ser decorrência de um tampão com tamanho insuficiente e/ou com material utilizado para tampão inadequado.

- Promover o máximo alívio entre as detonações para reduzir as altas pressões e velocidades de detonação, por meio da escolha da malha de perfuração e do diâmetro de perfuração ideal. Bastante atenção deve ser prestada ao afastamento.

- Vibração: para diminuir a energia perdida em vibrações, buscar conhecer o material a ser desmontado, impedância, a presença de água, espessura de solo, presença de fissuramentos, controlando com temporização adequada os efeitos de vibrações no terreno ou para melhorar a fragmentação.

A determinação da razão de carga correta para o volume a ser desmontado e para o tipo de rocha alvo do desmonte é primordial para obter uma boa fragmentação e evitar a perda de energia. Existem vários estudos que evidenciam que o aumento da razão de carga pode promover uma menor necessidade energética principalmente nas operações de britagem e moagem de minérios (Eloranta, 1999). Esse aumento pode ser implementado com o aumento do comprimento da coluna de explosivos e pelo estreitamento das malhas de perfuração. A Figura 10 mostra um exemplo dos impactos no consumo de energia elétrica com o aumento da razão de carga em uma operação de moagem em moinho SAG.

Figura 10 – Variação do Consumo de Energia de um Moinho SAG X razão de carga do desmonte em uma mina de minério de ouro

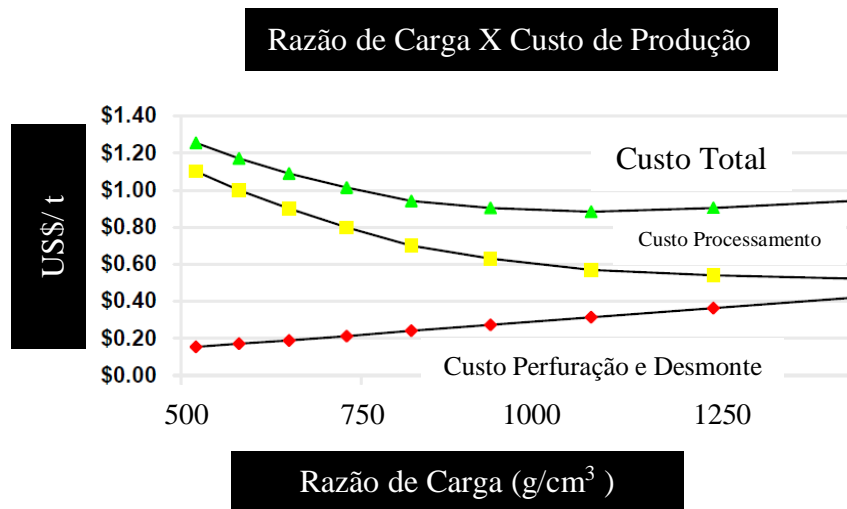


Fonte: (Eloranta, 1999) e (Kanchibotla, 1998)

A Figura 10 evidencia a redução do consumo específico do moinho com o aumento da razão de carga utilizada no desmonte. Importante perceber que essa redução possuiu um ponto ótimo onde se encontra um melhor custo benefício entre um maior consumo de explosivos e a redução de energia elétrica. O aumento da razão de carga aumenta os custos de produção na fase de desmonte e a relação entre redução do consumo específico de energia e o aumento da razão de carga não é linear.

O gráfico na Figura 11 mostra o comportamento dos custos em operações de minério de ferro quando o foco é o aumento do fator de carga buscando uma melhoria na fragmentação (Eloranta, 1999). Esta Figura mostra os resultados de 5 anos de operação em Minério de Ferro em Minnessota, EUA. Mais uma vez existe um ponto de equilíbrio onde se tem uma redução considerável no custo total de operação apesar do aumento dos custos nas operações de perfuração e desmonte. Esse ponto deve ser observado para que os investimentos necessários tragam retorno positivo para a empresa.

Figura 11 – Representação Gráfica de 5 anos de operação em Minério de Ferro em Minnessota, EUA



Fonte: Eloranta, 1999

O consumo de energia para a redução do tamanho de partículas na moagem pode ser calculada pela equação de Bond (Bond, 1952). Existem evidências que o índice de trabalho (work index) de Bond dos minérios é significativamente reduzido por desmontes com maiores razões de carga (Eloranta, 1999). Estudos deste tipo, porém, não provam que o uso de maior razão de carga possa proporcionar um maior grau de microfissuramento dos grãos minerais. As microfissuras aumentariam a superfície específica dos grãos de minério, no nível microscópico, fazendo com que a necessidade energética para redução de tamanho desses grãos nas britagens e moagens fosse menor. Somente tal processo promoveria de fato o aumento da produtividade, a redução do consumo de energia ou o menor desgaste dos componentes dos equipamentos de mina e de beneficiamento. Ainda, por outro lado, isto tudo depende também da natureza, mineralogia dos minérios, os quais podem ser muito abrasivos, tais como os minérios de ferro que contém muita sílica (quartzo), em especial os compactos (mais pobres em ferro).

O preço do explosivo é importantíssimo para a tomada de decisão de sua utilização nas operações mineiras. O custo com explosivo é significativo nas áreas de desmonte de rocha e frequentemente são afetadas por momentos de baixa na rentabilidade da venda de minérios. Essa importância faz com que a fabricação própria de explosivos seja cogitada em algumas empresas que possuem estrutura para tal, pois o custo final pode ficar muito

abaixo do praticado no mercado. Em contrapartida, deve-se observar que essa fabricação não é trivial, principalmente se todos os requisitos de qualidade e segurança forem seguidos.

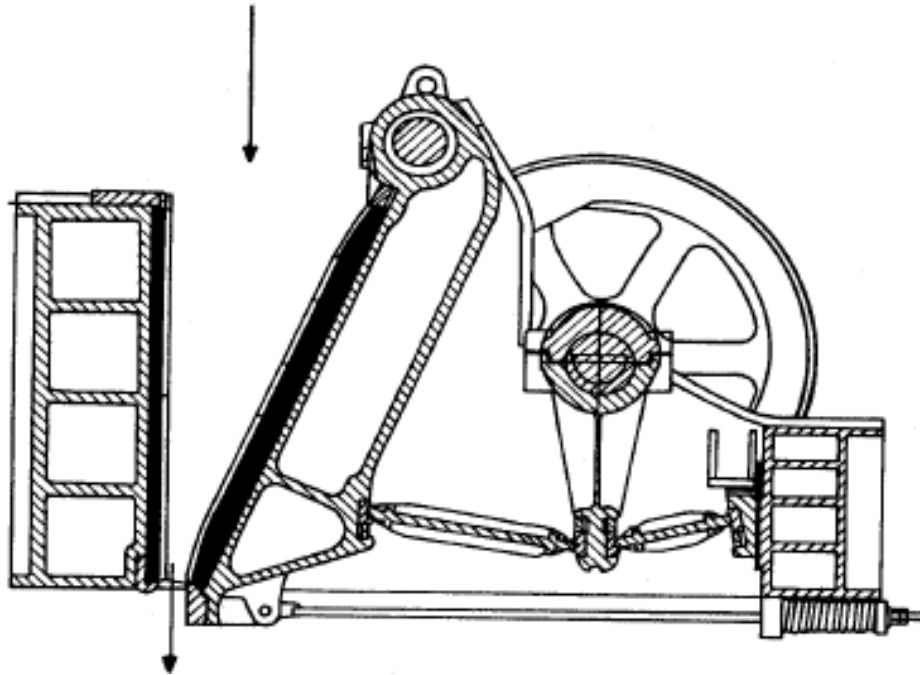
2.4 Britagem e Moagem de minérios

O processo de cominuição de minérios consiste no conjunto de operações realizadas para redução do tamanho das partículas minerais. Esse processo é executado aportando energia de forma controlada, de modo a alcançar a granulometria exigida na saída de cada operação unitária. No minério de ferro, deve-se buscar sempre a granulometria ideal para o processo evitando a formação excessiva de finos. A moagem será a operação unitária foco desse estudo, principalmente pela sua importância no processo de beneficiamento de minérios de ferro, mas também pela sua relevância quanto ao consumo de energia elétrica.

A britagem é geralmente empregada para partículas mais grosseiras exercendo forças de compressão e impacto. Possui relação de redução pequena mesmo exercendo forças elevadas e a geometria do equipamento é muito importante no processo. Normalmente são empregados estágios para escalonamento da redução de tamanhos sendo utilizados até 4 estágios de redução antes da entrada do material nas moagens (Chaves, 2002).

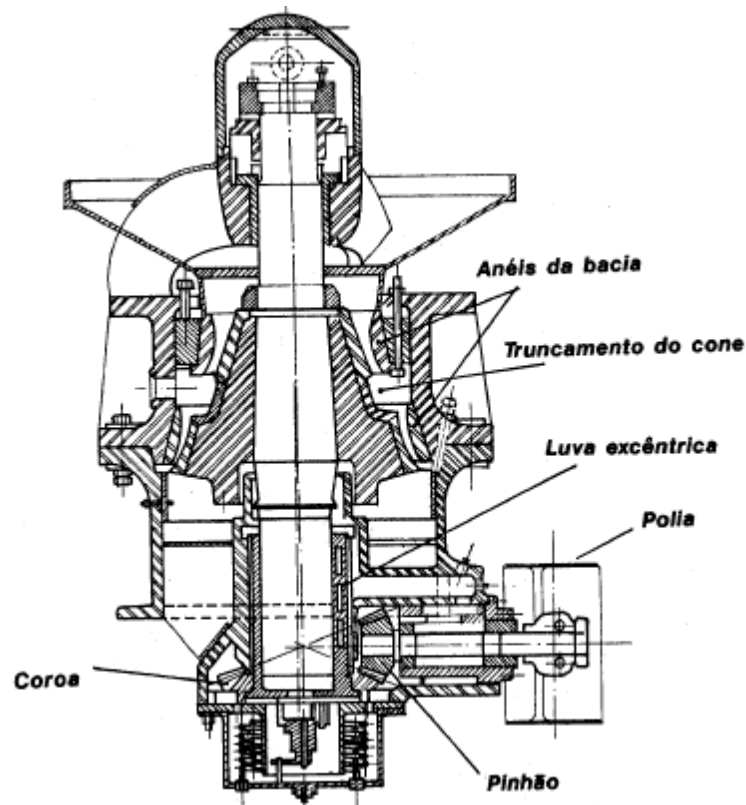
Os equipamentos de britagem mais utilizados na mineração são os giratórios, de mandíbulas, de impacto e os de rolos. Nas operações de minério de ferro os britadores de mandíbulas e giratórios são os mais facilmente encontrados e estão ilustrados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 – Exemplo de britador de Mandíbulas



Fonte: CETEM - Luz (2010)

Figura 13 – Diagrama simplificado de um britador giratório



Fonte: CETEM - Luz (2010)

As operações de cominuição podem ser a úmido ou a seco. A úmido significa que o processo é feito com água suficiente para o transporte das partículas. A seco significa o processamento que utiliza a umidade natural do material. Geralmente, encontramos processos de britagem a seco e moagem a úmido.

Comparando-se os dois processos do ponto de vista energético o processo a úmido tende a um consumo específico menor de energia elétrica (kWh/t) do que os processos a seco, pois a utilização de água facilita o transporte do material no processo. Assim, as operações de moagem ocorrem predominantemente a úmido.

A água é um importante componente nesse processo por ser um ótimo agente transportador do material e, também, auxilia na dissipação de calor gerado pelo movimento do moinho e sua carga circulante. A moagem a seco é raramente utilizada e sua aplicação acontece em regiões com escassez de água ou quando o material a ser moído reage com a água. A moagem a úmido consome em média 25% menos energia que a

moagem a seco, dissipando melhor o calor gerado e ajuda a controlar a poeira gerada na operação (Chaves, 2002).

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), a moagem é normalmente empregada em frações mais finas e aplica forças de impacto e abrasão para a redução de partículas. Além da redução de tamanho, as moagens possuem outras finalidades como a liberação de partículas minerais visando concentração do mineral alvo do processo, adequação granulométrica mais controlada e aumento da superfície específica das partículas minerais. O processo apresenta um elevado custo operacional comparado às outras etapas de concentração no beneficiamento. Isto se deve a maior taxa de redução de tamanho, aos mecanismos de fragmentação, ao consumo de bolas (corpos moedores)/revestimento e, por sua vez, também, de energia.

Dentre os moinhos utilizados na indústria mineral, estão os equipamentos de barras e de bolas. Os de bolas podem ser também do tipo semi-autogênos (SAG), sendo que uma parte destas é substituída pelo próprio minério, que é usado como corpo moedor por ser uma rocha mais competente e/ou abrasiva. A quantidade de corpos moedores é expressa pela porcentagem do volume interno utilizado ou grau de enchimento (ficando geralmente em torno de 30 a 40%). Outras variáveis operacionais, também, precisam ser monitoradas durante a moagem como a velocidade de rotação que é afetada pela porcentagem volumétrica da carga e de sólidos da polpa alimentada.

A Figura 14 mostra o prédio da Moagem da usina de beneficiamento de minério de Ferro em Itabira, MG.

Figura 14 – Prédio da Moagem – Usina de Conceição 2 – Itabira



Fonte: Próprio autor (2012)

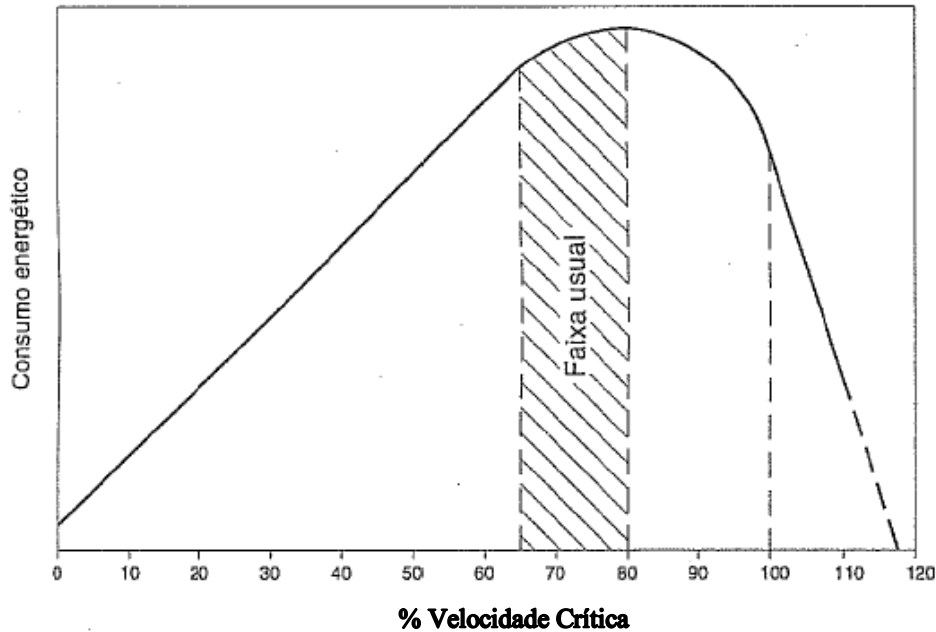
A quantidade de água no processo deve ser cuidadosamente controlada. Essa variável afeta significativamente o desempenho da moagem, pois altera a viscosidade da polpa, o que impacta na ação mecânica dos corpos moedores. Além disso, afeta também a velocidade e o tempo em que a partícula mineral fica dentro do moinho, impactando na qualidade do processo.

A velocidade de rotação, também, é uma variável importante. Deve-se perseguir a velocidade ótima na qual o material residente dentro do moinho e os corpos moedores passam a ser lançados, percorrendo uma trajetória parabólica e caindo sobre o restante do material. Esse processo promove a melhor redução de tamanho e liberação de partículas e é conhecido operacionalmente como cascateamento. Velocidades muito altas ou muito baixas provocam desgaste prematuro dos revestimentos do moinho, ruído excessivo e consumo de energia além do necessário (Chaves, 2002).

A Figura 15 mostra uma relação usual entre a velocidade do moinho e seu consumo de energia. Pode-se concluir que, além da preocupação com a correta configuração da velocidade de rotação, deve-se buscar a faixa de velocidade onde essa

operação é realizada da forma mais eficiente do ponto de vista energético para se ter a melhor eficiência na cominuição do minério.

Figura 15 – Relação entre velocidade do moinho e consumo energético



Fonte: Chaves (2002)

Outra variável que precisa ser constantemente monitorada é o consumo energético dos moinhos. Sendo geralmente um dos maiores consumidores de energia no beneficiamento de minérios, a operação deve ser olhada de perto. Segundo Hukki (1975) e Willis (1988), a eficiência energética de um processo de moagem é estimada em apenas 1%, ou seja, 1% da energia gasta no processo é utilizada para a redução de tamanho e liberação dos grãos de minério. O restante da energia é perdido na forma de calor, ruído e nos sistemas mecânicos e elétricos necessários ao processo.

Diversos fatores são conhecidos por impactar no consumo de energia do processo de moagem. Alguns deles são:

- Características dos minérios;
- Vida útil e performance dos equipamentos de moagem;
- Variações de temperatura e umidade do minério;
- Configurações de parâmetros operacionais;
- Qualidade da manutenção dos ativos de moagem;

- Ausência de instrumentação e controle no processo.

Estudos publicados ao redor do mundo (Eloranta, 1999; Scott, 2012) ; Nielsen and Kristiansen, 1996) defendem a ideia de aumento da utilização de energia no desmonte para promover a redução da necessidade de aporte energético ou o aumento da produtividade nas moagens de minérios. Essa relação é ainda muito pouco conhecida no meio operacional e deveria ser mais testada em campo para confirmação, principalmente em períodos onde qualquer centavo de redução do custo faz a diferença.

A Tabela 3 possui referências de dados de granulometria de alimentação e produto final das operações unitárias responsáveis pela redução de tamanho de minérios em operações de ferro nos Estados Unidos com Taconitos (Nielsen & Kristiansen, 1996). O maior aporte de energia é realizado na moagem onde o fator de redução das partículas é de 360 vezes. Esse é um indício importante de que uma melhor qualidade no desmonte poderá impactar significativamente nos números de consumo de energia elétrica nos moinhos.

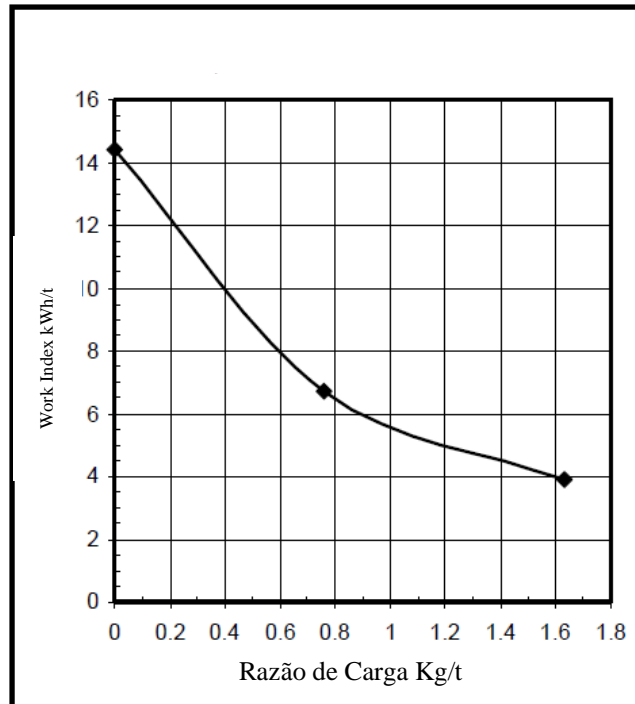
Tabela 3 – Referências de granulometria e eficiência energética dos processos de redução de tamanho em minério de ferro

| Energia e redução de tamanho por operação unitária | Alimentação (cm) | Produto (cm) | Energia Necessária (kWh/t) |
|---|-------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Explosivos | ∞ | 40 | 0,24 |
| Britagem Primária | 40 | 10,2 | 0,23 |
| Britagem Secundária | 10,2 | 1,91 | 0,61 |
| Moagem | 1,91 | 0,0053 | 19,35 |

Fonte: Nielsen and Kristiansen (1996)

A Figura 16 mostra as relações da razão de carga (kg/t) x kWh/t (Work Index) para Taconitos (Nielsen & Kristiansen, 1996).

Figura 16 – Work Index em função da razão de carga para Taconitos



Fonte: Nielsen and Kristiansen (1996)

De acordo com a figura 16, fica claro o comportamento de queda do “Work Index” do material com o aumento da razão de carga de explosivos no caso analisado. Esse comportamento deve ser verificado caso a caso, pois sua resposta depende de diversos fatores naturais e operacionais. A queda do consumo específico na moagem poderia ocorrer, desde que existisse melhor utilização de energia no desmonte de rocha e, com isso, uma redução da granulometria do material fragmentado. Por outro lado, isto ainda vai depender, como comentado anteriormente dos parâmetros físicos e operacionais destes equipamentos).

Capítulo 3 – Análises Energéticas dos dados de campo e resultados

3.1 Contextualização

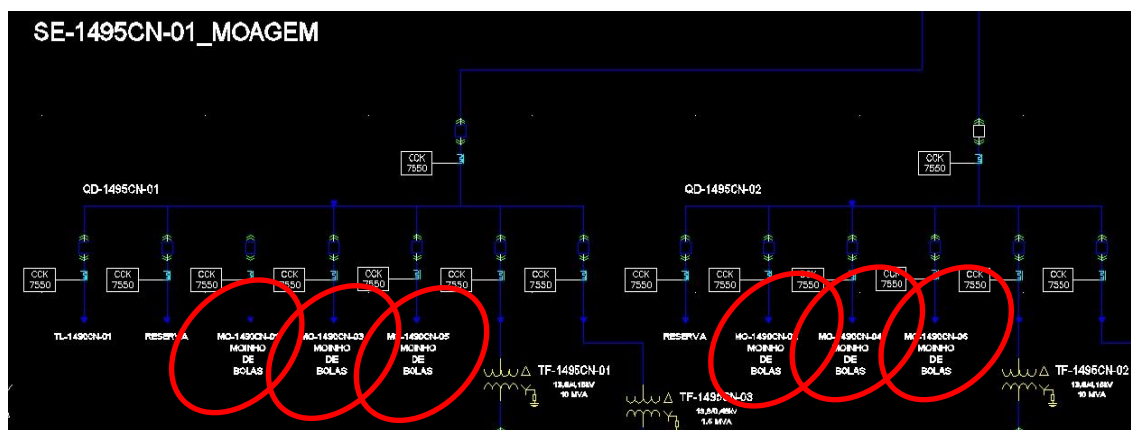
Os trabalhos de campo fizeram parte do projeto Fragcom Vale/UFRGS que teve como objetivo melhorar a utilização de energia nas diversas operações unitárias da produção de minério de ferro do complexo analisado. No desmonte, o foco foi melhorar a fragmentação de rocha por meio do aumento da razão de carga e a melhor utilização dessa energia na fragmentação de rocha, reduzindo as perdas energéticas melhorando as formas de se planejar e executar a operação de desmonte. Na moagem, a ideia principal é entender os impactos dessa melhor fragmentação de rocha nos moinhos de bolas presentes na unidade operacional e medir os ganhos em produtividade e redução de custo do sistema.

3.2 Medição dos consumos de energia elétrica

Para realizar esse trabalho, foi necessário o estudo das redes de medição de consumo de energia da Usina 2 de Conceição. Como a usina analisada é um ativo novo implantado nos últimos 3 anos e iniciando sua operação no momento dos testes de campo, o seu projeto de engenharia contemplou uma ampla rede de medições de consumo de energia elétrica individualizadas em suas cargas principais como moinhos e britadores e cargas secundárias como grandes motores, bombas e correias transportadoras. A separação dessas medições elétricas por operação unitária da usina (britagem, moagem, concentração, flotação...), foi possível pela grande quantidade de medidores presentes na planta.

A Figura 17 mostra um diagrama elétrico onde se observa a estratificação dos pontos de medição de consumo de energia e a localização das medições das moagens da usina.

Figura 18 – Detalhamento do diagrama das redes de medição de consumo de energia evidenciando a medição individual de cada moinho da usina analisada



Fonte: Documentação de projeto Vale S.A. (2012)

Em linhas gerais, os instrumentos de medição de campo são conectados às redes de tráfego de dados de automação que possibilitam o envio destes dados para servidores de bancos de dados centralizados. Com os dados gravados nos historiadores operacionais, eles podem ser tratados e analisados da forma como o responsável técnico precisar. Essas análises podem ser feitas por meio de supervisórios (sistemas utilizados na indústria para supervisão e controle de ambientes de automação) em tempo real ou em sistemas de relatórios históricos onde análises de tendências e comportamentais são realizadas e desvios detectados e corrigidos na medida do possível.

Para esse trabalho, os dados brutos foram adquiridos e analisados, com esses sistemas de automação, e comparados com os controles internos utilizados pelas equipes de análise de processos e operação da planta de moagem. Alguns pontos de divergência foram encontrados, mas se devem principalmente à algumas pequenas inconsistências de medição de campo, que são consideradas normais no dia a dia. Esses eventos foram relatados à equipe de manutenção elétrica e automação do complexo que estão corrigindo os problemas. Nas análises realizadas nesse trabalho, esses pontos foram desconsiderados para não poluir os dados.

3.3 Desmontes testes e sua influência nas moagens

Na mina, foram realizados sucessivos desmontes de rocha variando a razão de carga, modificando o tamponamento dos furos, alterando as malhas de perfuração e modificando os acessórios para espoleta eletrônica, com o objetivo de reduzir as perdas de energia e melhorar a fragmentação de rocha resultante. A Tabela 4 enumera algumas modificações que foram realizadas nas operações de desmonte durante os testes realizados. Esses parâmetros foram alterados para promover uma melhor disponibilidade e distribuição energética do explosivo no desmonte.

Tabela 4 – Parâmetros médios antes e depois dos testes realizados em campo

| Parâmetros Médios dos Desmontes | Antes | Testes |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Temporização | Linear | “V” ou diagonal |
| Acessórios | Espoleta Convencional | Espoleta eletrônica |
| Afastamento (m) | 5.00 | 4.00 |
| Espaçamento (m) | 8.00 | 7.00 |
| Profundidade do furo (m) | 16.00 | 16.00 |
| Altura da bancada (m) | 15.00 | 15.00 |
| Altura da coluna do tampão (m) | 6.00 | 5.00 |
| Razão de carga (g/t) | 200 | 400 |
| % Itabirito Compacto | 8 | 30 |

Fonte: Projeto Fragcom – Vale S.A / UFRGS (2015)

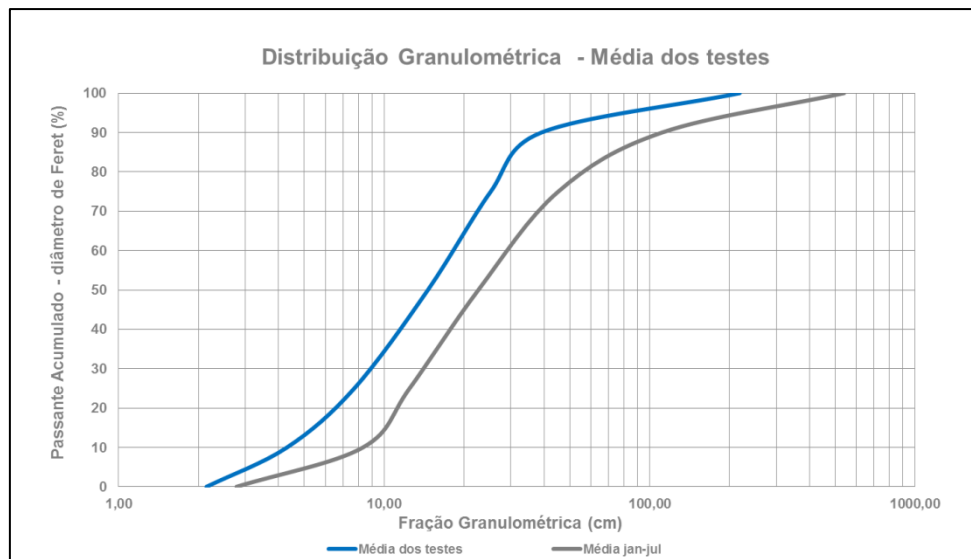
Todas as modificações realizadas durante os desmontes testes em campo tiveram como objetivo o melhor aproveitamento energético dos explosivos na fragmentação de rocha. O fechamento da malha e a redução da coluna de tamponamento tiveram como principal objetivo o aumento da quantidade de explosivos no desmonte. A mudança dos acessórios para espoleta eletrônica visaram melhorias na execução dos tempos de retardo.

O aumento da quantidade de furos por desmonte trouxe muitos ganhos operacionais, porque reduziu o número de horas de outros equipamentos parados aguardando desmonte de rocha. Houve, também, a redução do número de furos perdidos devido a necessidades emergenciais, pois mais massa desmontada ficou disponível para as operações de carga de transporte. Uma atenção especial foi dada ao aumento significativo no percentual de Itabiritos compactos que surgiram ao longo dos testes. Esse aumento teve impacto significativo nas análises energéticas desse trabalho.

As Figuras 19 e 20 ilustram os resultados em fragmentação de rocha dos desmontes testes, aumentando a razão de carga em comparação ao que era praticado em campo anteriormente.

Nos testes realizados foi observada a redução granulométrica média em todas as faixas de análise do material nas frentes de lavra, provocando uma melhoria considerável na fragmentação de rocha compacta, objeto dos desmontes de rocha. Essa melhoria na granulometria em todas as faixas granulométricas provocou ganhos operacionais consideráveis, como o aumento da disponibilidade física dos britadores, redução dos tempos fixos de transporte e a mais importante de todas, que foi a viabilidade da utilização dos Itabiritos compactos em maiores quantidades nas usinas de beneficiamento do complexo.

Figura 19 – Curva granulométrica com o resultado médio dos desmontes realizados em campo durante os testes



Fonte: Projeto Fragcom

Figura 20 – Antes das implementações no desmonte (imagem superior) e depois (imagem inferior) ilustrando os resultados em campo ao utilizar as novas razões de carga e melhorias no desmonte



Fonte: Projeto Fragcom

Essa alteração no percentual de Itabiritos compactos no desmonte e no material que alimentou as usinas de concentração durante os testes é uma variável que precisa ser analisada com atenção. Como esse material tem um WI (work index) maior que os itabiritos friáveis já costumeiros nessa operação, a necessidade de energia para se conseguir granulometrias adequadas desse material é muito maior, seja no desmonte quanto nas moagens.

O aumento de compactos acabou refletindo no resultado final da apuração do consumo específico de energia das moagens antes de depois dos testes. Antes dos testes de campo, o percentual de compactos na usina era, em média, 8% do total alimentado na planta. Ao final dos desmontes de teste, a alimentação das usinas de concentração cresceu para 30% de compactos em média, sem alterações significativas na produtividade da planta e no consumo energético dos moinhos de bola.

Diante do cenário descrito acima, um considerável ganho na redução do consumo energético nas moagens se apresenta com a possibilidade de utilização de maiores percentuais de minérios compactos na usina sem alterações no consumo de energia. Como esse material possui maior “Work Index”, a tendência seria um acréscimo no consumo energético e redução da produtividade da usina, o que na prática não aconteceu. Esse ganho não pôde ser quantificado em números durante os testes, uma vez que ensaios de WI dos materiais processados não foram realizados. Essas medições podem ser alvo de estudos futuros para aprofundar o tema.

Utilizando as medições de consumo de energia elétrica das moagens durante o processamento do material desmontado em teste com crescentes razões de carga, chegou-se aos seguintes números de redução do consumo específico de energia, evidenciados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da redução do consumo específico de energia das moagens analisadas

| Parâmetros | Jan-Jul | 48h antes/depois | Fragcom |
|----------------------------|---------|------------------|---------|
| Consumo de Energia (Kwh/t) | 7.58 | 6.84 | 6.81 |

Fonte: Projeto Fragcom (2015)

O período de Janeiro a Julho foi utilizado como linha de base para as comparações dos consumo energéticos. Durante esse período nenhuma alteração significativa na razão de carga de explosivos foi realizada. Foi utilizado também como referência uma medição 48 horas antes e depois do processamento do material para reduzirmos as variações de alimentação que estava acontecendo na usina. Por fim, o valor sinalizado como “fragcom” são a média do consumo energético das moagens durante o período de processamento dos materiais desmontados já com as razões de carga ajustadas.

Os ganhos financeiros com a redução do consumo de energia das moagens durante os testes estão mostrados na tabela 6.

Os ganhos absolutos de redução do consumo de energia foram pequenos, mas trouxeram ganhos financeiros. Esse resultado se deve principalmente ao processamento de um material com *Work Index* maior nas moagens. Por outro lado, quando somados os

outros ganhos operacionais e os ganhos intangíveis provocados por uma curva granulométrica mais adequada na saída do desmante, não há dúvida que o aumento da razão de carga traz ganhos operacionais para a maioria das operações unitárias do processo produtivo.

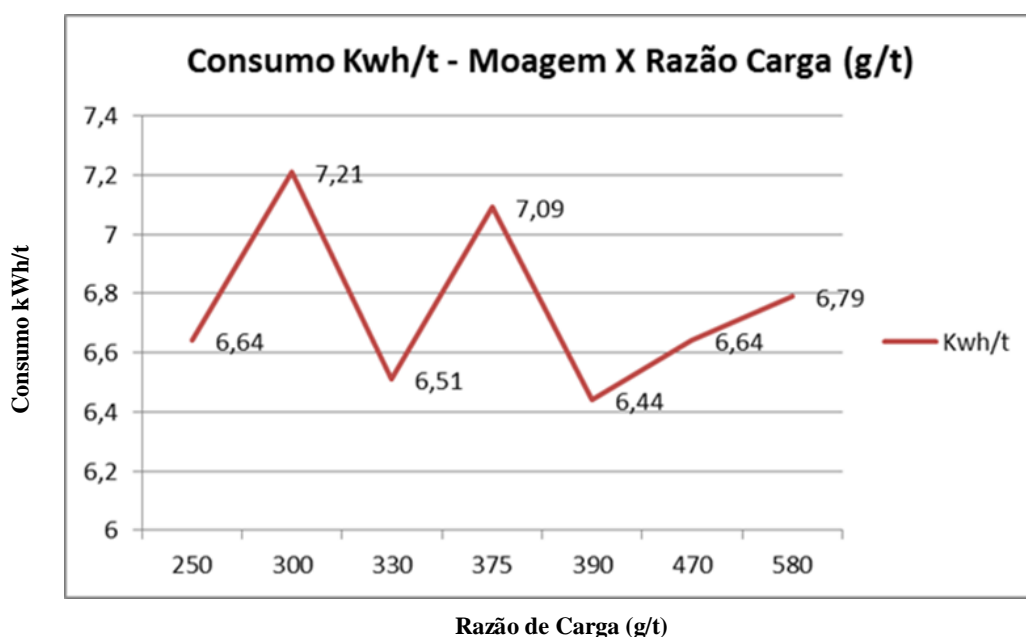
Tabela 6 – Ganhos energéticos e financeiros nas moagens

| Ganhos Financeiros Potenciais | |
|--|------------------|
| Redução desde Início do período (Kwh/t) | 0,77 |
| Redução Momento Anterior (kwh/t) | 0,03 |
| Redução Potencial Energia Elétrica Início | R\$ 3.182.087,46 |
| Redução Potencial Energia Elétrica Efetiva | R\$ 123.977,43 |

Fonte: Próprio Autor (2016)

Relacionando os consumos específicos de energia das moagens que foram medidos a cada desmante com razões de carga diferentes e o processamento do respectivo material na usina, tem-se o seguinte comportamento, registrado na Figura 21.

Figura 21 – Comparação do consumo específico das moagens com a razão de carga praticada em cada desmante



Fonte: Próprio Autor (2016)

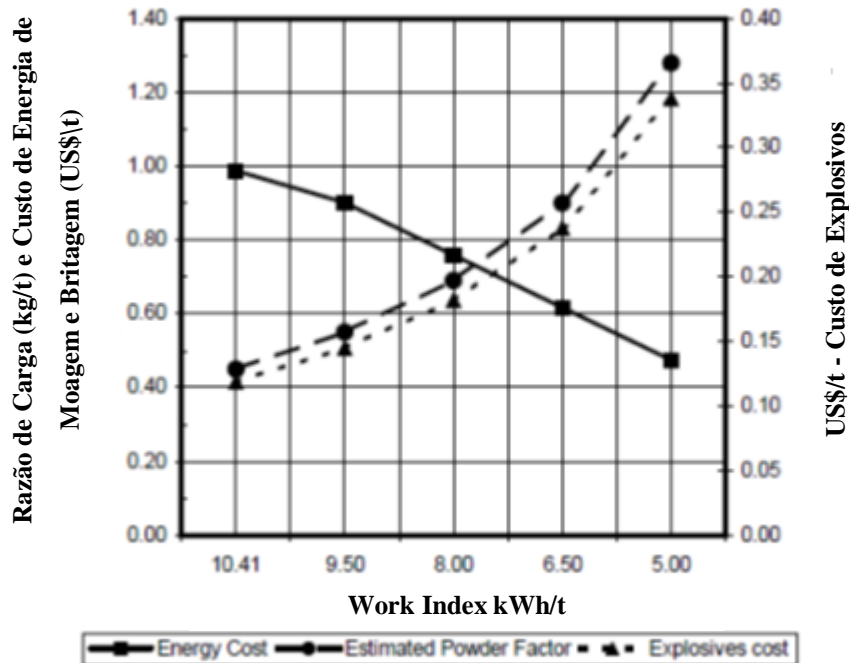
As variações no consumo específico da moagem já eram esperadas devido ao grande número de variáveis que não puderam ser controladas durante o processamento dos materiais na usina. As variações de qualidade e litologia na alimentação, a baixa disponibilidade de algumas linhas de operação e modificações no processo devido a necessidades pontuais da produção foram as que mais impactaram nos dados durante os períodos de teste.

Um ponto relevante e que possui relação direta com o consumo de energia das moagens é o procedimento de recarga de corpos moedores nos moinhos analisados. Ao longo dos testes não foram observadas grandes variações no procedimento de recarga de corpos moedores que poderiam causar impactos nas análises energéticas. Como esse processo é controlado de forma manual, seus dados não foram considerados nas análises expostas nesse trabalho uma vez que sua confiabilidade não pode ser comprovada.

Um ponto importante na análise do consumo energético da moagem é a tendência de queda no consumo específico com o aumento da razão de carga até o valor de 390 g/t. Como já foi dito anteriormente, essas reduções de consumo específico poderiam ser maiores e a curva de tendência de queda mais evidente, se não houvesse aumento do percentual de compactos na alimentação da usina em relação ao que era praticado antes dos testes. Entretanto, os dados mostram o potencial de redução energética que poderá acontecer com o aumento das razões de carga no desmonte e a melhor utilização da energia com de um melhor planejamento de desmonte e execução do mesmo.

Em outros trabalhos publicados (Eloranta, 1999), o comportamento dessa comparação entre consumo específico de energia e aumento da razão de carga de explosivos são similares ao exemplo abaixo, ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Consumo específico britagem e moagem, WI x razão de carga de explosivos



Fonte: Eloranta. Workman (1999)

Os dados com os resultados do consumo de energia na moagem em relação ao aumento da razão de carga expostos na figura 21 não são conclusivos para a redução de consumo real, como explicado anteriormente. Testes mais prologandos e sem variações de qualidade na alimentação devem ser conduzidos para que se tenha maior segurança nas análises. Além disso, deve ser pontuado a questão da qualidade do explosivo analisado pois uma mistura de nitrato de amônia e diesel em uma proporção diferente de 5,7% pode proporcionar energia abaixo do esperado no desmonte mascarando a determinação da melhor razão de carga a ser utilizada.

Entretando, a viabilidade de processamento de um percentual maior de material compacto na usina sem aumento do consumo energético, principalmente nas moagens,

evidencia que houve ganho energético durante os testes de campo, mas que não pôde ser quantificado ao longo dos testes analisados.

3.4 Análise dos custos de energia

Sendo energia um insumo estratégico, seu custo deve ser controlado com rigidez. Uma das alternativas para gerenciar o custo e reduzir o risco do suprimento energético é produzi-lo internamente dentro de suas operações. Para energia elétrica uma das alternativas comuns no Brasil é o investimento em ativos de geração de energia como PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas) ou hidroelétricas de maior porte. Para explosivos, a alternativa seria a produção do insumo no local de operação com ativos de fabricação própria de ANFO e emulsões.

Ao redor do mundo, a energia elétrica pode ser, em média, 5 vezes mais barata que a energia proveniente de explosivos (Eloranta, 1999; Scott, 2012). Essa média pode variar de acordo com vários fatores como disponibilidade de fontes energéticas no país e na região de operação, logística de transporte, investimentos realizados pela indústria para acesso a essas fontes, dentre outros fatores. A comparação entre eletricidade e explosivos é interessante porque mesmo a eletricidade sendo mais barata que o explosivo, os processos de redução de tamanho das partículas de minérios que utilizam esse insumo são muito menos eficientes que a utilização de explosivos. Por essa razão, deve-se sempre reavaliar a utilização desses insumos.

Para a operação analisada foram realizadas algumas comparações dos custos de eletricidade e explosivos. Esses custos impactam diretamente no custo total de produção do complexo. O preço da eletricidade é gerenciada por meio de uma central da companhia que aloca os custos de energia elétrica buscando o melhor resultado para a empresa. A Vale, empresa onde foi realizado esse estudo, possui geração própria de eletricidade por meio de investimentos em hidroelétricas espalhadas pelo país assim como investiu em conexões na rede básica de energia e em contratos de médio e longo prazo de fornecimento desse insumo. Essas ações asseguram preços de energia muito competitivos quando comparados com o mercado e empresas que não possuem as mesmas estratégias.

O explosivo, no caso analisado o ANFO, é produzido em uma fábrica de explosivos dentro do complexo minerador em estudo. Essa fabricação assegura preços competitivos quando se comparados com os preços praticados pelo mercado.

A Tabela 7 mostra a comparação entre os custos de energia desses dois insumos energéticos. A disponibilidade energética de cada insumo foi convertida em kJ (kilojoules) para comparação da eletricidade com a energia térmica dos explosivos na mesma unidade de medida. Os preços de eletricidade considerados foram baseados no custo de energia elétrica que a empresa pratica dentro da estratégia de otimização de custos já explicada e os preços médios do mercado brasileiro nos últimos 3 anos. Os preços de energia provenientes de explosivos são os praticados no mercado brasileiro para ANFO e os custos de produção do ANFO fabricado internamente no complexo minerador.

Tabela 7 – Comparativo de preços da disponibilidade energética entre eletricidade e explosivos para o complexo minerador analisado

| Comparativo de custos entre Energia Elétrica x Energia de Explosivos (Qualidade de explosivos padrão de Mercado) | |
|--|--------------|
| Energia Eletrica Mercado X Explosivo Mercado | 9,37 |
| Energia Eletrica Mercado X Explosivo empresa | 4,85 |
| Energia Eletrica empresa X Explosivo Mercado | 22,95 |
| Energia Eletrica empresa X Explosivo empresa | 11,87 |

Fonte: Próprio Autor (2016)

Foram simulados alguns cenários possíveis com os preços de mercado e de produção interna das duas fontes de energia. O caso mais comum do complexo minerador analisado é o cenário onde se tem energia elétrica administrada pela empresa e o explosivo, também, produzido internamente em suas instalações. Nesse cenário a energia elétrica é 11,87 vezes mais barata que a energia do explosivo, realidade muito diferente da média mundial onde a eletricidade é apenas, aproximadamente, 5 vezes mais barata.

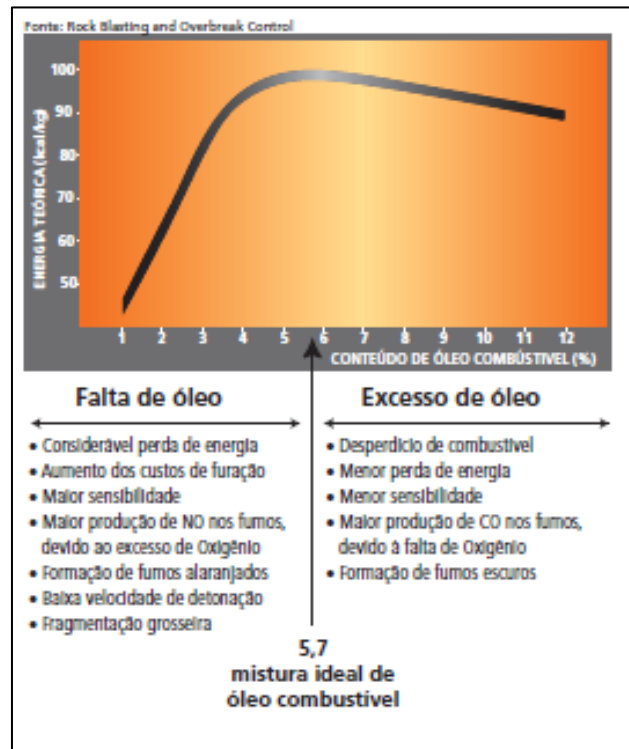
Do ponto de vista do negócio, ter o insumo energético a preços menores que os praticados no mercado mundial é um diferencial competitivo inquestionável. O problema

aparece quando a percepção que energia é um insumo barato permeia as operações, promovendo o desperdício de energia e a ineficiência no processo produtivo. O preço da energia em patamares muito inferiores pode inviabilizar melhorias de processos ou projetos para melhoria da eficiência energética que exigem investimentos, pelo simples fato de não serem viáveis economicamente. Cabe aos líderes das operações, não permitir que esse diferencial competitivo seja perdido por conta de ineficiências e desperdícios que costumam aparecer nesse cenário.

Outro ponto importante é a qualidade do explosivo utilizado na operação de desmonte. O explosivo produzido internamente precisa possuir um controle de qualidade rígido para que seu conteúdo energético seja garantido no momento do desmonte de rocha. A fabricação própria desse insumo energético tem como foco a redução de custos de operação e a garantia da disponibilidade do explosivo. Essa redução de custos pode ser integralmente perdida se o conteúdo energético do ANFO fabricado internamente não for garantido.

Um dos fatores mais importantes na garantia dessa qualidade é a proporção de nitrato de amônia e óleo combustível na mistura do ANFO. A Figura 23 mostra esse relacionamento e as consequências de cada cenário na disponibilidade energética do explosivo.

Figura 23 – Disponibilidade energética do ANFO de acordo com o conteúdo de óleo combustível na mistura



Fonte: Manual Ultrapill – Fosfertil baseado em Rock Blasting and Overbreak Control, Calvin J. Konya) - 1995

A mistura recomendada para que se tenha balanço zero de oxigênio na reação do ANFO é uma proporção de 5.7% de óleo combustível. No site onde foram conduzidos os testes de campo, encontrou-se variações nessa proporção que comprometem a qualidade do explosivo.

Para efeitos de comparação foi feita uma simulação utilizando uma proporção de aproximadamente 3,5% dessa mistura. Nesses casos, temos uma redução considerável no conteúdo energético do explosivo assim como a redução na velocidade de detonação e um maior aumento da emissão de gases nitrosos. A Tabela 8 mostra os resultados da comparação entre os custos de eletricidade e do ANFO agora com os dados da disponibilidade energética provocada pelo desvio na mistura de nitrato de amônia e óleo combustível. Para efeito de cálculo foi considerado a proporção de 3,5% na mistura, situação que pode ser encontrada em operações mineiras no dia a dia.

Tabela 8 – Comparativo de custos de energia considerando a qualidade de ANFO encontrada no complexo mineiro estudado

| Comparativo Energia Elétrica x Energia Explosivos (provável mistura encontrada no site) | |
|--|-------|
| Energia Eletrica Mercado X Explosivo empresa | 7,4 |
| Energia Eletrica empresa X Explosivo empresa | 18,11 |

Fonte: Próprio Autor (2016)

Quando a qualidade energética do explosivo diminui a distância do custo para a energia elétrica disponível aumenta. No caso analisado, considerando a qualidade energética do ANFO fabricado no site, a energia elétrica fica 18,11 vezes mais barata que a energia dos explosivos. Além da perda de energia por quilo de explosivo, a distância de custos entre explosivo e eletricidade gera diversas distorções nas tomadas de decisão operacional. A redução de custos com explosivos se reduz substancialmente uma vez que um material com menor disponibilidade energética está sendo utilizada no desmonte. A percepção que o custo da eletricidade é ainda menor faz com que ineficiências nos processos de britagem e moagem apareçam, já que um “insumo muito barato” está sendo utilizado nessa operação unitária.

Essas comparações mostram oportunidades que podem ser exploradas no site analisado. As principais são:

1 - Os explosivos produzidos internamente exigem controle rígido de qualidade da sua disponibilidade energética. Caso contrário, a redução de custos promovida pela fabricação própria do explosivo desaparece com a fabricação de um insumo de menor conteúdo energético.

2 - A utilização de energia na forma de eletricidade na redução de tamanho das partículas de minério, através das britagens e moagens, é muito menos eficiente que a utilização de explosivos para o mesmo propósito. A ineficiência provoca maior necessidade do insumo para se alcançar os parâmetros de granulometria esperados pelo processo, o que faz seu consumo muito relevante nas usinas de beneficiamento de minérios.

3 – Energia elétrica não é um insumo barato. Mesmo sendo mais barato que a energia disponível nos explosivos a eletricidade é utilizada em grandes quantidades na mineração e necessita ser controlada e gerenciada para evitar desperdício e ineficiências.

4 – A mistura incorreta de nitrato de amônia e diesel além de fornecer menos energia para o desmonte é responsável pela geração de gases tóxicos ao meio ambiente e deve ser tratada com todo o cuidado necessário.

3.5 Contabilização dos ganhos energéticos e de emissões de CO₂

Os ganhos dos projetos que tem como resultado a economia de energia, também, podem ser demonstrados como redução de emissões de carbono na atmosfera. A preocupação da indústria com as medições e controle das emissões de carbono de suas operações aumentou após os diversos acordos ambientais internacionais que visam a sua redução, mitigando assim os impactos das mudanças climáticas no planeta. A percepção, por parte das empresas, que o mercado valoriza as companhias que se preocupam com o meio ambiente impulsionou as ações de preservação, dentre elas o controle e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

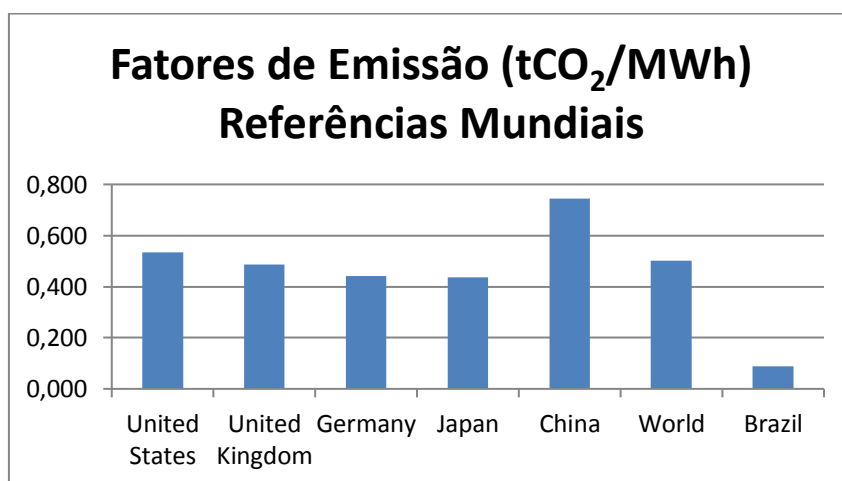
Alguns desses acordos previam a conversão e a venda de créditos provenientes dessas reduções de emissões de carbono e eram vistas pela indústria como uma possibilidade alternativa de aumento em seu faturamento. Na prática, a contabilização e a efetivação desses créditos de carbono se mostraram extremamente complexas, burocráticas e muitas vezes não viáveis, provocando o desinteresse do mercado. De qualquer forma, o desafio de reduzir as emissões de carbono para preservar o meio ambiente permanece ativo, principalmente nas empresas que possuem como valor a sustentabilidade de suas operações industriais.

No processo de produção do minério de ferro, pode-se identificar várias oportunidades de redução de emissões de carbono. Um excelente caminho para mapear essas oportunidades é entender como são consumidos os insumos energéticos necessários em suas operações unitárias e mensurar a redução de emissões pela economia de energia que pode ser conseguida com melhorias de processo ou projetos de grande relevância.

Para converter em emissões de carbono os ganhos de redução de consumo de energia elétrica, deve-se levar em consideração a matriz energética do país ou região onde aquela energia foi gerada. Matrizes energéticas de países onde suas fontes são em sua maioria de origem fóssil (ex. petróleo, gás e carvão), possuem potencial de redução de emissões de carbono muito maiores do que em países com predomínio de fontes renováveis como hidroeletricidade, energia eólica ou solar.

A Figura 24 mostra a comparação dos índices anuais de emissões de CO₂ entre alguns países. Destaque para o Brasil onde o índice de emissão é menor que a média mundial.

Figura 24 – Comparação entre países dos fatores de emissões de gases de efeito estufa



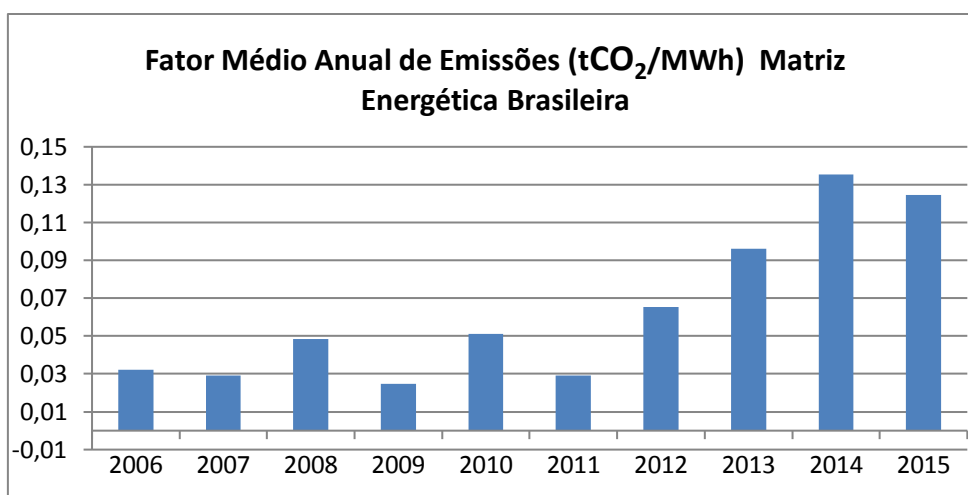
Fonte de dados: <http://emissionfactors.com>

Geralmente, são considerados os dados médios das matrizes energéticas do país onde aquela indústria opera, pois muitos desses países operam em sistemas integrados de geração, transmissão e distribuição de energia. Nesses sistemas de transmissão e distribuição, é impossível determinar onde determinada energia consumida foi gerada. A exceção a esse caso acontece quando determinada operação possui infraestrutura própria e dedicada de geração de energia. Nesse caso, a contabilização das emissões de carbono é relacionada à fonte energética utilizada.

Para esse trabalho foi utilizado o índice determinado e controlado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, denominado Fator Médio Anual de Emissões de Carbono (tCO₂/MWh). Esse indicador, ilustrado na Figura 25, utiliza como base a matriz

energética brasileira e é publicado mensalmente no site do ministério. Esse índice é utilizado como referência na maioria dos cálculos de emissões de carbono brasileiras. Como a matriz energética brasileira é baseada em fontes renováveis de energia, esse indicador é muito menos impactante do que em países com matrizes energéticas com predominância de fontes fósseis.

Figura 25 – Evolução do fator médio de emissões de CO₂ do Brasil



Fonte: Site MCT / 2016

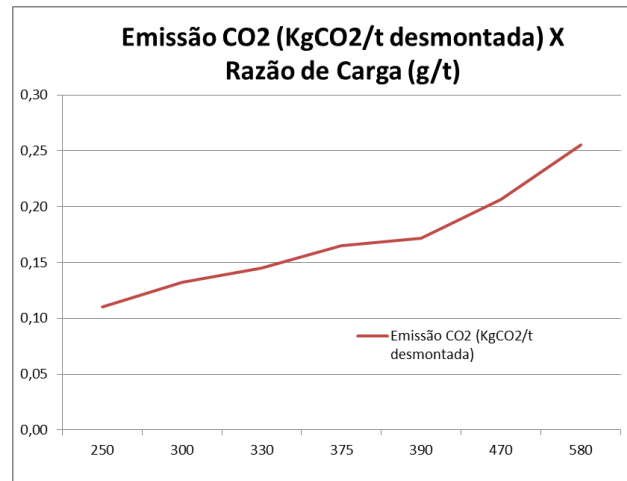
Conforme evidenciado na Figura 25, o fator de emissões brasileiro cresceu muito nos últimos anos. Essa mudança aconteceu com a entrada de várias usinas de geração de energia por combustíveis fósseis na matriz energética. Mesmo assim, o índice brasileiro é um dos menores do mundo, o que reduz muito os números de redução de emissões de carbono nos projetos de redução de energia por aqui.

O aumento da razão de carga nos desmontes provoca, também, um aumento das emissões de carbono na atmosfera, uma vez que estaremos utilizando mais explosivos no processo. Essas emissões dependem das características do explosivo utilizado no processo de desmonte. Nos testes de campo, o explosivo utilizado é o ANFO e está sendo considerada a mistura ideal de 5,7% de diesel no explosivo para o cálculo das emissões equivalentes.

Considerando o aumento da utilização de explosivos nessa operação com a mudança da razão média de carga de 200g para 400g por tonelada, o valor adicional de explosivos a ser utilizado por ano nessa operação será de 1.600.000 kg, aproximadamente.

Esse valor equivale a emissões adicionais de carbono de 700.000 kg de CO₂ na atmosfera considerando o valor adicional de explosivos para aumento da razão de carga multiplicado pelo fator de conversão entre massa de ANFO e emissão média de CO₂ (Turner, Collins, 2013). A Figura 26 mostra o crescimento das emissões de CO₂ de acordo com o aumento da razão de carga explosiva.

Figura 26 – Emissões de CO₂ para cada razão de carga



Ref. = 0.44 kg CO₂ por kg de explosivos (ANFO)

Fonte: Próprio Autor (2016)

Considerando a redução potencial do consumo específico médio de energia das moagens provocada pela melhoria no desmonte do caso apresentado e a quantidade de massa processada anualmente nessa operação, a redução potencial das emissões de CO₂ está demonstrada na tabela 9.

Pelos números apresentados na Tabela 9, observa-se que o potencial de emissões de CO₂, mesmo em uma matriz energética limpa como a brasileira, é significativo porque o consumo energético do processo moagem é considerável. Qualquer melhoria nessa operação unitária que reflita na redução do consumo energético, também, trará ganhos importantes na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 9 – Números de redução de energia e emissões de CO₂ na atmosfera

| | |
|--|--|
| Redução potencial do Consumo Específico de Energia (kWh/t) | 0,77 |
| Potencial redução de energia anual (MWh) | 20.401,92 ³ |
| Redução de emissões com economia de energia nas moagens (KgCO ₂) | = (20.401,92 x 0,1244 ¹) = 2.538.990,00 |
| Emissões CO ₂ adicionais pelo aumento da razão de carga no desmonte de rocha (KgCO ₂) | 699.494,40 ² |
| Redução potencial Total de emissões de CO ₂ com as melhorias no desmonte por ano (KgCO ₂) | 2.538.990 – 699.494,40 = <u>1.838.504,45</u> |

1. *Brazilian Emission Factor 2015 (tCO₂/MWh) – Site Ministério da Ciência e Tecnologia*
2. *Ref. - 0.44 KgCO₂ per Kg ANFO (Turner, Collins, 2013)*
3. *Considerando média de horas trabalhadas da moagem x média t/h na moagem x redução em kwh/t*

Fonte: Próprio Autor (2016)

Capítulo 4 – Recomendações finais para todo o processo analisado

Em muitos ambientes operacionais de mineração de grande porte, as operações unitárias de perfuração e desmonte costumam ser despriorizadas em comparação a outras operações unitárias como carga e transporte de minérios. Por serem operações que estão no início do processo produtivo, ganhos operacionais nessa fase podem refletir em todas as outras operações unitárias da cadeia de minério de ferro. Por essa razão, essas operações devem ter uma atenção especial por parte de seus responsáveis.

Esse trabalho teve como objetivo mostrar os ganhos energéticos nas operações de beneficiamento com uma melhor utilização de energia no desmonte. De qualquer forma, outras oportunidades foram identificadas ao longo das observações de campo e estão relacionadas abaixo, divididas nas categorias produtividade, redução de custo, meio ambiente, tecnologia e gestão de processos operacionais.

Produtividade

- Redução de paradas de manutenção e operação dos equipamentos por problemas de sobre tamanho (britadores, escavadeiras, caminhões).
- Maior disponibilidade física dos equipamentos de carga e transporte evitando sobrecargas e acidentes operacionais.
- Aumento/manutenção das taxas de produção na moagem no processamento de materiais compactos.
- Possibilidade de processamento de minérios com maior dureza sem perda de produtividade.

Redução de Custo

- Redução de retrabalhos e operações secundárias de desmonte.
- Redução de custos de manutenção com a redução de sobrecargas e acidentes operacionais.

- Redução do consumo de energia na britagem e moagem com a maior presença de micro fissuramentos nas partículas de minério.

- Redução dos investimentos em ativos de suprimento de energia elétrica com a redução do consumo (subestações, linhas, transformadores).

Meio Ambiente

- Redução das emissões de gases de efeito estufa (CO e NO_x) com a redução do consumo de energia.

Para que esses e outros ganhos possam ser capturados, várias ações nas áreas tecnológicas, de gestão e de processo podem ser implantadas. Essas áreas devem ser tratadas em conjunto, como um grande plano de melhorias do processo produtivo e devem abranger sempre tecnologia, processos e pessoas.

Muitos avanços na área tecnológica estão disponíveis no mercado para utilização pelas equipes de desmonte de rocha e de moagem de minérios. A utilização de muitas delas pode parecer trivial, mas quando se vai ao campo nota-se que muitas operações ainda trabalham da mesma forma há anos. Abaixo, algumas sugestões de tecnologias e processos disponíveis no mercado e de fácil implantação para utilização nas operações de desmonte e moagem;

Tecnologia

- Aumentar a estratificação das redes de medição de consumo de energia elétrica nas plantas de beneficiamento. Elaborar novos projetos com visão de separação de consumo energético por processo para facilitar as análises dos especialistas.

- Utilização de sistemas e malhas de controle nas britagens para evitar operações a vazio.

- Melhoria da instrumentação e controle de processo na moagem evitando aumento de carga circulante e maior controle do consumo de energia e produtividade.

- Sistemas de monitoramento das variáveis operacionais de perfuração (torque, pulldown, RPM, energia) para previsão da quantidade e qualidade do explosivo a ser

utilizado em cada furo de acordo com os dados de dureza das rochas. Perfuratrizes autônomas já possuem essa tecnologia embarcada.

- Utilização de detonadores eletrônicos e GPS de alta precisão para garantir a aderência ao planejamento da execução dos planos de fogo em campo.

- Utilização de sistemas de análise de imagens para verificação da fragmentação resultante de cada desmonte para correções no fator de carga e elaboração das malhas de perfuração.

- Utilização de softwares para modelagem computadorizada do planejamento de fogo. Essa tecnologia poderá ser utilizada para melhor dimensionamento e posicionamento das malhas de perfuração e suas respectivas quantidades de explosivo. Com esses sistemas pode-se mapear onde estão os pontos de fraqueza da rocha e posicionar os furos em regiões onde após o desmonte teremos a melhor formação de fraturas e conseqüente enfraquecimento da rocha.

Muitas tecnologias estão disponíveis no mercado há mais de 2 décadas, mas permanecem sendo pouco utilizadas. As variações bruscas nos preços dos minérios provocam dificuldades de um plano de investimentos em melhorias tecnológicas de longo prazo. Além disso, a falta de padronização na utilização de sistemas e componentes e a ausência de equipes qualificadas em campo são algumas das razões da incipiência na utilização dessas e outras tecnologias nas operações. Por esses motivos, as próprias tecnologias permanecem sem um desenvolvimento completo forçando os próprios clientes a participar de desenvolvimentos dos produtos e sistemas, muitas vezes, em ambientes de produção. Essa situação não é a mais adequada.

Gestão e Processos operacionais

Melhorias nos processos e na gestão operacional, também, podem trazer resultados significativos para as operações.

- Maior integração das equipes de perfuração e desmonte de rocha com o restante das operações unitárias de mina, facilitando a medição dos impactos da fragmentação de rocha nas operações de carga e transporte.

- Aumentar a integração entre as equipes de desmonte, beneficiamento e processo mineral. Esse trabalho integrado e constante pode trazer oportunidades de economia de energia e redução de custo uma vez que os processos estão interligados energeticamente. O resultado do desmonte irá afetar significativamente o resultado das operações subsequentes, principalmente a moagem. O acompanhamento de informações como granulometria do desmonte e índices de compressão e moabilidade dos minérios pode ser considerado para trazer maiores ganhos nas operações de redução de tamanho nas usinas de concentração.

- Sendo o orçamento para explosivos significativo nas áreas de desmonte, evitar os cortes lineares de orçamento sem a devida análise da melhor razão de carga a ser utilizada para aquele determinado material a ser desmontado.

- Melhorar o planejamento de lavra para viabilizar perfurações e desmontes mais extensos, reduzindo assim as horas improdutivas e a melhor utilização dos explosivos. Sempre trabalhar com uma quantidade de massa desmontada satisfatória para a operação da usina evitando assim desmontes de “emergência”.

- Implantar o controle de qualidade e acompanhamento da qualidade energética do ANFO fabricado nas minas e comprado do fornecedor. Verificar se a mistura de nitrato de amônia e óleo diesel está na proporção que viabiliza a melhor disponibilidade energética do explosivo.

Os maiores consumos de energia das fases mina e usina, na produção do minério de ferro, estão nas operações unitárias responsáveis pela redução de tamanho dos grãos de minério. As principais são o desmonte de rocha e as moagens. Uma boa prática seria compartilhar a responsabilidade do consumo de energia das moagens com a operação de desmonte de rocha, uma vez que essas operações estão conectadas energeticamente. Isso seria uma quebra de paradigma na gestão de grandes empreendimentos de mineração e seria um passo importante para a integração dessas equipes na busca por melhores resultados.

Capítulo 5 – Conclusões e recomendações

O trabalho descrito nesse texto possibilitou alcançar as metas e objetivos traçados. A meta de demonstrar que a melhor utilização de energia no desmonte provocaria melhorias ao longo do processo de produção pode ser demonstrada pela viabilização do processamento de maiores quantidades de material compacto nas usinas de beneficiamento (aproximadamente 30% da alimentação da usina contra uma média de 8%), mantendo-se os volumes de produção e consumo de energia estáveis no período analisado. A viabilidade desse processamento em uma quantidade acima do considerado normal nas britagens e moagens da usina, evidencia que esse projeto obteve ganho energético.

Mesmo com todas as variações encontradas, uma redução potencial de 0,77 kwh/t pôde ser medida e comprovada, o que possibilita uma economia de aproximadamente R\$ 3 milhões de reais por ano em energia nessa operação. Considerando que esse potencial é bastante conservador, uma eventual replicação dessa metodologia nas demais unidades operacionais da empresa, poderia alavancar ganhos maiores que os comprovados por esse trabalho. Esse ganho financeiro oriundo da redução do consumo de energia elétrica na moagem poderia, por exemplo, ser utilizado para uma melhor gestão dos orçamentos de corpos moedores na usina ou de explosivos na mina proporcionando ganhos em todas as operações unitárias foco desse trabalho.

Além da meta, os objetivos específicos, também, foram alcançados. São eles:

1. Foram identificadas dificuldades e oportunidades de melhoria nos sistemas de medição de consumo de energia elétrica da usina avaliada. Medidas de correção das inconsistências de dados e de falhas de medição foram discutidas com a operação e ações já estão em andamento para correção dos problemas. Estão sendo resolvidos problemas na estabilidade e confiabilidade do sistema e uma maior estratificação dos dados de medição está sendo planejada com foco nos processos unitários.
2. Foi elaborada uma sistemática de comparação de custos de energia elétrica x custo de energia de explosivos. Essa comparação poderá ser utilizada

como ferramenta para ajudar a tomada de decisão sobre qual insumo energético deverá ser prioritário para a redução dos custos de produção.

3. Foi elaborada sistemática e quantificados os ganhos com redução de emissões de CO₂ provenientes da redução do consumo específico da moagem com o aumento da razão de carga explosiva. Para esse trabalho, a redução de emissões potencial será de aproximadamente 1.840 toneladas de CO₂ anuais.
4. Foi elaborada uma lista de recomendações baseada nas observações de campo para a melhoria da gestão energética e operacional das operações analisadas. Aspectos de gestão, tecnologia, e produtividade foram abordados e podem ser adotados pela maioria das operações mineiras.
5. Ficou clara a necessidade de uma mudança cultural na forma como o processo de cominuição de minérios é tratado nas operações mineiras. Ela precisa ser vista como um processo que se inicia na lavra e se estende até o processamento do material nas usinas de beneficiamento de forma integrada, evitando a visão de operação unitária isolada no desmonte, britagem e moagem como normalmente ocorre atualmente.

Como recomendações para os próximos trabalhos sobre o tema, seria muito interessante realizar novamente os testes de campo variando as razões de carga de desmonte, mas mantendo a alimentação da usina com percentual de materiais compactos constante. Assim, se conseguiria comprovar com mais clareza o impacto da variação de carga no desmonte nas operações de moagem no que tange a consumo de corpos moedores, desgaste do perfil de revestimento e principalmente do consumo de energia dessa operação.

Além disso, recomenda-se conduzir medições de “work index” e análises microscópicas do material desmontado em laboratório à medida que a razão de carga varie nos desmontes. Com essas medições se poderia evidenciar e até mesmo quantificar a quantidade de microfissuras que acontecem no material desmontado e o impacto energético desse fato nos outros processos de redução de tamanho e liberação dentro do processo de beneficiamento de minérios.

Capítulo 6 – Revisão Bibliográfica

1. ADÃO BENVINDO DA LUZ, JOÃO ALVES SAMPAIO, SILVIA CRISTINA ALVES FRANÇA - Tratamento de Minérios, (2010) - CETEM/MCT. Pg. 143 – 210.
2. BOND, F. C. - The Third Theory of Comminution, Mining Engineering, (1952) - Pg. 484-494.
3. CARLOS, MARCELO RIBEIRO E KOPPE, JAIR C; Energy and CO2 emissions reduction in Iron Ore Mining - World Mining Congress, (2016)
4. CHAVES, ARTHUR; Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, (2003) – Vol 3. Pg 425 – 613.
5. ELORANTA, JACK; - Downstream Costs Relationship to Blasting, (1999).
6. ELORANTA, JACK; - Geological Data for Blasting, (1996).
7. ELORANTA, JACK; - Improve Milling Through Better Powder Distribution, (2001).
8. ELORANTA, JACK; - An Explosion in Mining, (2000).
9. ELORANTA, JACK; - The Efficiency of Blasting verses Crushing and Grinding, (1997)
10. ELORANTA, JACK; - The Role of Blast Operations in Metal Mining, (2002).
11. GOUR C. SEN; - Blasting Technology for Mining and Civil Engineers, (1995) – Pg 1 – 13; 22-26.
12. GREGG, LAURI; - Implementing Energy Management in the Canadian Mining Industry, (2014).
13. HOPLER, R. B; - ISEE Blaster's Handbook, (1999) - International Society of Explosives Engineers Inc, Cleveland, USA, Pg. 742.

14. MATTHEW BRANDER; AMAN SOOD; CHARLOTTE WYLIE; AMY HAUGHTON; JESSICA LOVELL; - Electricity-specific emission factors for grid electricity, (2001).
15. MUNARETTI, ENRIQUE; - Desenvolvimento e avaliação de desempenho de misturas explosivas a base de nitrato de amônio e óleo combustível, (2002) - Pg. 6 – 20; 27 – 30.
16. PETER VANDELINDER; JACK ELORANTA; MICHAEL OROBONA; - Blasting for Improved Autogenous Milling at Hibbing Taconite Company, (2004).
17. S. FORDHAM; (2nd Ed.) - High Explosives and Propellants. Pg. 13 – 28; 35 – 60.
18. SCOTT, DANIEL; - An Energy Equality Approach to Blasting, (2012).
19. WORKMAN, LYALL AND ELORANTA, JACK; - Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption, (2014).
20. WORSEY, PAUL; - Course Mining 307 - Principals of Explosives Engineering, (2014).
21. LOUISE K. TURNER, FRANK G. COLLINS - Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC, (2013).
22. WORLD BANK
<http://data.worldbank.org/indicator/eg.gdp.puse.ko.pp.kd>
23. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2016)
<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>
24. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO BRASIL (2016) –
<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>
25. OPERADOR NACIONAL SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO – (2016)
<http://www.ons.org.br>