



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**LUCAS LIMA MENEZES**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA FLEXIBILIZAÇÃO DE UM SISTEMA  
DE MOAGEM DE MINÉRIO POR MEIO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

**ARAXÁ-MG**

**2023**

**LUCAS LIMA MENEZES**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA FLEXIBILIZAÇÃO DE UM SISTEMA  
DE MOAGEM DE MINÉRIO POR MEIO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa  
Coorientador: Eng. Me. Rodrigo Araújo

**ARAXÁ-MG**

**2023**

**LUCAS LIMA MENEZES**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA FLEXIBILIZAÇÃO DE UM  
SISTEMA DE MOAGEM DE MINÉRIO POR MEIO DE INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Araxá, 26 de junho de 2023

**BANCA AVALIADORA**

---

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Membro Titular: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Membro Titular: Prof. Me. Frederico Duarte Fagundes  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por ter me dado forças para persistir frente a todos os meus objetivos pessoais e profissionais, por sempre me conceber condições físicas e mentais para avançar e superar todos os obstáculos que se fizeram presentes durante este processo.

Aos meus pais por terem dedicado parte da vida deles para dar condições de que eu pudesse estudar, dedicar e alcançar os meus objetivos. Por sempre estarem presentes, apoiando em todos os momentos difíceis, não deixando que decisões fossem tomadas em momentos de turbulência, motivando sempre manter o foco nos resultados.

Às minhas irmãs que em todos os momentos estiveram perto, dando o seu máximo como suporte, assumindo desafios junto comigo como se fossem delas, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos, sempre apoiando em todas as horas.

Aos meus amigos, alguns de longa data, outros feitos durante a formação para o resto da vida, que sempre estiveram juntos, tanto para os desafios do dia a dia, quanto para os momentos de lazer, que mantém vivas as nossas energias.

Aos meus orientadores, que me acompanharam em todo este processo, dando todo o auxílio necessário para desenvolvimento do projeto.

Aos participantes da banca, por terem aceitado o convite e por contribuírem para concepção deste projeto.

Aos membros do corpo técnico da empresa, os quais não mediram esforços para apoiar nos levantamentos e testes necessários para desenvolvimento do trabalho.

Ao CEFET-MG e a todos os seus membros pelo suporte a todo momento, cada um na sua área de atividade.

## RESUMO

Inerente ao processo de tratamento de minérios, a moagem possui seu papel fundamental na preparação da granulometria ideal de aproveitamento do produto processado. Os moinhos de bolas apresentam características diferentes de moagem de acordo com a velocidade de rotação. Na unidade de beneficiamento estudada, a rotação do moinho foi definida como um parâmetro fixo durante a etapa de projeto, calculada com base nas características do material processado na época. Ao longo do tempo, variações nas características mineralógicas podem ocorrer em função dos pontos de lavra, comprometendo a eficiência e capacidade de moagem. Para solução, foi proposto um estudo de viabilidade técnica e comercial de aplicação de um inversor de frequência no acionamento do moinho de bolas, de modo a atribuir flexibilidade de ajuste de rotação do equipamento de acordo com a necessidade. Para dimensionamento adequado do inversor foram coletados os dados das instalações existentes, analisadas as suas limitações e realizados testes de comportamento do processo via software. Obtidos os limites de dimensionamento do equipamento, foi realizada a busca de disponibilidade em mercado, juntamente com a coleta dos custos previstos de aquisição e instalação. Os testes em ambiente de simulação apresentaram resultados satisfatórios com as alterações de velocidade, apresentando melhoras na capacidade de processamento do moinho de bolas. Pelo bom resultado ao processo, foi possível evidenciar a viabilidade comercial, uma vez que o tempo de retorno do investimento total seria curto. Acredita-se que a característica de operação com velocidade fixa na moagem não seja uma particularidade da unidade estudada, portanto, existe a possibilidade de abrangência do estudo em demais unidades de beneficiamento na área da mineração.

**Palavras-chave:** Moagem de Minério. Flexibilização. Eletrônica de Potência. Inversores de Frequência. Viabilidade de Aplicação.

## ABSTRACT

Inherent to the process of treating ores, grinding plays a fundamental role in preparing the ideal granulometry for use of the processed product. Ball mills have different grinding characteristics according to the rotational speed. In the processing unit studied, the mill rotation was defined as a fixed parameter during the design stage, calculated based on the characteristics of the material processed at the time. Over time, variations in mineralogical characteristics may occur depending on mining points, compromising efficiency and grinding capacity. For a solution, a technical and commercial feasibility study was proposed for the application of a frequency inverter in the drive of the ball mill, in order to assign flexibility to adjust the rotation of the equipment according to the need. For proper sizing of the inverter, data from existing installations were collected, their limitations were analyzed and process behavior tests were performed via software. Once the equipment sizing limits were obtained, a search for market availability was carried out, along with the collection of expected acquisition and installation costs. Tests in a simulation environment showed satisfactory results with changes in speed, showing improvements in the processing capacity of the ball mill. Due to the good result of the process, it was possible to demonstrate the commercial viability, since the payback time for the total investment would be short. It is believed that the characteristic of operation with fixed speed in the milling is not a particularity of the studied unit, therefore, there is the possibility of covering the study in other processing units in the mining area.

**Keywords:** Ore Grinding. Flexibilization. Power Electronics. Frequency inverters. Application Feasibility.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de lavra a céu aberto .....	17
Figura 2 – Exemplo de lavra subterrânea .....	18
Figura 3 – Fluxograma de processo de pelotização da Vale. ....	19
Figura 4 – Modelagem 3D de um Moinho de Bolas .....	20
Figura 5 – Representação da moagem em catarata.....	21
Figura 6 – Representação da moagem em cascata .....	21
Figura 7 – Enrolamentos de motores de indução a) monofásico e b) trifásico .....	23
Figura 8 – Vista em corte de um motor de indução trifásico .....	24
Figura 9 – Representação didática de um reostato líquido.....	25
Figura 10 – Forma construtiva geral dos inversores de frequência.....	26
Figura 11 – Principais blocos do inversor de frequência.....	27
Figura 12 – Inversor de frequência CFW500 .....	28
Figura 13 – Representação em 3D das instalações em campo .....	35
Figura 14 – Plaqueta – Redutor de Velocidade Principal.....	37
Figura 15 – Plaqueta – Redutor de Velocidade Auxiliar.....	38
Figura 16 – Motor MAF710B – Linha Master WEG.....	39
Figura 17 – Plaqueta – Motor de Acionamento do Moinho .....	40
Figura 18 – Reostato Líquido de Partida .....	41
Figura 19 – Simulação de moagem com 73,5% da velocidade crítica .....	45
Figura 20 – Simulação de moagem com 60% da velocidade crítica .....	46
Figura 21 – Simulação de moagem com 80% da velocidade crítica .....	46
Figura 22 – Gráfico de redução granulométrica em função da velocidade do moinho.....	47
Figura 23 – Recuperação de produto em função da granulometria alcançada na moagem.....	48
Figura 24 – Resumo das consultas realizadas em mercado para o inversor.....	50
Figura 25 – Concepção de acionamento ofertada pela WEG .....	51
Figura 26 – Painel completo para variação de velocidade WEG MVW3000 A0265 .....	51
Figura 27 – Estrutura do painel para variação de velocidade WEG MVW3000 A0265.....	52
Figura 28 – IHM Touchscreen 10” inclusa no painel do inversor WEG MVW3000 A0265 ..	53
Figura 29 – Posicionamento de um moinho no inversor WEG MVW3000 A0265.....	53

## **LISTA DE TABELAS E QUADROS**

Tabela 1 – Distribuição do consumo de energia na unidade da Erie Mining Co .....	15
Tabela 2 – Detalhamento dos componentes do sistema de moagem.....	35
Quadro 1 – Especificação do inversor de frequência .....	49
Quadro 2 – Comparativo entre os dois tipos de acionamento .....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
CV	Cavalo-vapor: potência elétrica equivalente a 746 watts
RPM	Rotações por minuto

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Phi$	Fluxo Magnético
$n_s$	Velocidade Síncrona
$p$	Número de polos do motor
$f$	Frequência

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Mineração .....	17
2.1.1	Beneficiamento Mineral .....	18
2.1.2	Moagem de Minério .....	19
2.1.3	Moinho de Bolas.....	20
2.2	Acionamentos Elétricos .....	22
2.2.1	Motores de Indução Trifásicos .....	22
2.2.2	Reostato Líquido de Partida .....	25
2.3	Inversores de Frequência .....	26
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	Caracterização da pesquisa .....	29
3.2	Coleta dos dados do equipamento.....	30
3.3	Análise das limitações do acionamento atual .....	30
3.4	Testes de comportamento do processo via Software .....	31
3.5	Dimensionamento do inversor de frequência adequado à aplicação .....	31
3.5.1	Seleção do inversor de frequência no mercado .....	32
3.6	Avaliação de custo-benefício da aplicação .....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1	Levantamento de campo .....	34
4.1.1	Moinho de Bolas.....	36
4.1.2	Redutor de Velocidade Principal.....	36
4.1.3	Redutor de Velocidade Auxiliar .....	37
4.1.4	Motor de Acionamento do Moinho .....	39
4.1.4.1	Reostato Líquido de Partida .....	40

4.2	Análise das limitações do acionamento atual .....	41
4.2.1	Velocidade de Rotação Fixa .....	42
4.2.2	Utilização do reostato líquido como acessório de partida .....	42
4.2.3	Utilização de um sistema mecânico para giro lento do moinho .....	43
4.3	Testes de comportamento do processo via Software .....	43
4.4	Dimensionamento e seleção do inversor de frequência .....	48
4.4.1	Especificação do inversor de frequência .....	49
4.4.2	Busca no mercado e seleção do inversor de frequência .....	50
4.5	Cálculo do Payback – Tempo de retorno do investimento .....	55
4.6	Definição do escopo de modificações do acionamento atual .....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	58
6	REFERÊNCIAS .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, desde a primeira Revolução Industrial, é visto que o aprimoramento das etapas de um processo de manufatura é imprescindível para que os ganhos sejam maximizados, presentes na capacidade de produção, na redução de esforços, segurança operacional e confiabilidade, conseqüentemente aumento nos lucros finais da organização. As indústrias do ramo de mineração não seguiram rumos diferentes, visto que, constantemente evoluem seus processos e controles para que os resultados sejam potencializados.

Neste contexto, sabe-se que a mineração é a maior fornecedora de produtos para o consumo diário da sociedade, transpondo diversas barreiras para obtenção dos resultados, sejam elas de caráter técnico, ambiental, humano, entre outras. Sendo assim, se faz necessário o aperfeiçoamento contínuo das práticas de mineração e processamento de minerais (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Para que seja possível a transformação de um mineral encontrado na natureza em uma matéria prima que originará uma série de produtos, é necessário que se tenha no mínimo os processos de extração e beneficiamento, também conhecido como tratamento do minério. A extração é caracterizada como o processo inicial de retirada do mineral do solo, podendo ocorrer em uma mina a céu aberto, subterrânea ou até mesmo subaquática. Já o tratamento de minérios, é caracterizado por operações que visam modificar a granulometria através da cominuição e classificação de um determinado mineral, sem modificar a identidade química e física original (CHAVES, 2012).

Inserida no processo de tratamento de minérios, a cominuição, composta pelas etapas de desmonte de rocha, britagem e moagem, visa a redução do tamanho das partículas, de forma controlada e de acordo com a característica de produto a qual se deseja obter ao final do processo. O foco principal deste processo é reduzir e separar os minerais úteis do rejeito, mas a redução na granulometria também viabiliza a aplicação de transporte contínuo através de correias transportadoras e o próprio manuseio juntamente à aplicação do minério (PERES e CHAVES, 2012).

Inerente ao processo de cominuição, a moagem é o processo de fragmentação fina do material extraído, sendo extremamente necessário para a obtenção do produto adequado às próximas etapas, podendo ser de concentração, pelotização, combustão, dentre outras. Avaliando especificamente a moagem, existem parâmetros que afetam o mecanismo de quebra do minério, mudando inclusive a sua característica final de recuperação, impactando

diretamente no produto que é liberado pelo moinho e conseqüentemente nos processos seguintes. Em se tratando de um moinho de bolas, com baixas rotações, as partículas tendem a apresentar quebras por abrasão, provocada pelo atrito dos corpos moedores (bolas) em meio ao produto em processamento. Já em rotações mais altas, as partículas tendem a apresentar quebras por lascamento, provocado pelo impacto da queda dos corpos moedores sobre o produto (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Profissionais de campo relatam que os principais fabricantes de equipamentos de britagem e moagem possuem um histórico de resultados sólidos em seus projetos e aplicações junto aos clientes, portanto, é notável a resistência a rápidas mudanças tecnológicas e novos métodos operacionais para os equipamentos. Por se tratar de bens ativos que possuem longa vida útil, muitas vezes acima de quinze anos, a defasagem tecnológica está presente em muitas aplicações. Um bom exemplo é com relação ao parâmetro de velocidade de rotação dos moinhos de bolas, em que na maioria dos casos é calculada na fase de projeto, utilizando premissas do material que deverá ser processado e determinado uma rotação fixa para aquele equipamento.

Em contrapartida, os avanços no âmbito da eletrônica de potência nos possibilitam instalações com velocidade de rotação variável, por exemplo, com a utilização dos inversores de frequência. Segundo Franchi (2013), este tipo de equipamento, é capaz de variar a velocidade mantendo torque constante, portanto, possibilita uma partida suave e a escolha da velocidade correta de trabalho, de acordo com a necessidade operacional. Por não gerar um pico alto de corrente na partida, reduz o impacto na rede de alimentação, conseqüentemente o consumo energético pode ser reduzido.

Mesmo ocorrendo variações de processo em um moinho de bolas através da mudança da velocidade de trabalho, na maioria dos projetos implantados atualmente a velocidade é fixa. Sabe-se que alterações das características mineralógicas podem ocorrer em função dos pontos de lavra, até porque em sua maioria são rotas de processo desenvolvidas para exploração durante décadas. Portanto, se justifica o estudo da aplicação de acionamento através de inversor de frequência, juntamente com a verificação dos possíveis ganhos operacionais, na busca pela melhoria da eficiência do processo produtivo. É importante ressaltar que, por se tratar de um equipamento de grande potência, não é uma aplicação comum e disponível no mercado, portanto, a verificação da viabilidade financeira de implantação se torna um fator mandatório.

Tem se como histórico nas atividades de exploração mineral, de que a maior parte da energia gasta no tratamento de minérios, está na fragmentação do produto, fazendo com que os custos operacionais sejam significativos nesta etapa do processo, devido ao porte dos

equipamentos e potências consumidas em seus acionamentos. Como um exemplo, é possível ver na Tabela 1 o consumo de energia por etapa do processo na mineradora de ferro Erie Mining Co em Minnesota nos EUA, em que o processo de fragmentação ocupa 80% (oitenta por cento) do custo de energia das operações (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Tabela 1 – Distribuição do consumo de energia na unidade da Erie Mining Co

<b>Operação</b>	<b>kWh/t</b>	<b>Consumo (%)</b>
Fragmentação	17,2	80,0
Concentração	1,5	7,0
Eliminação de Rejeito	1,2	6,0
Abastecimento de água	1,5	7,0
Total	21,4	100,0

Fonte: Adaptada de Figueira, Luz e Almeida (2010)

Explorados os pontos anteriores, é possível afirmar que ao aperfeiçoar uma etapa dos processos iniciais de tratamento de minérios, os ganhos operacionais são expressivos, uma vez que a redução de consumo de energia e a entrega de um produto de qualidade superior às demais etapas do processo, são fatores que influenciam diretamente nos resultados e como consequência na lucratividade da organização, através da redução do custo operacional do produto.

Adicionalmente, considerando todo o histórico de extração mineral em âmbito mundial, diversos tipos de minério têm tido as suas jazidas de alto teor reduzidas ou até mesmo esgotadas, restando um número grande de minérios de alta complexidade e baixo teor, em consonância com o aumento da demanda de matéria prima no mercado. Portanto, exigindo que novas estratégias de cominuição e beneficiamento sejam exploradas, assim como o uso de novas tecnologias aplicadas aos equipamentos de processo (PARAPARI; PARIAN; ROSENKRANZ, 2020).

Em se tratando da moagem de minério através de moinhos de bolas, a base teórica de processo abordada por Figueira, Luz e Almeida (2010), mostra os diferentes resultados que se tem na moagem com alteração de parâmetros do equipamento. Quando se tem um parâmetro fixo de velocidade, perante as condições de variação de teor do minério ao longo do tempo, as perdas operacionais por falta de adaptabilidade do processo são notáveis. A proposta de aplicação do inversor de frequência para possibilitar a variação de velocidade, cria uma condição de “*Set Up*” do processo de acordo com o tipo de material que será tratado. Os ganhos são previstos não apenas para o circuito de moagem, mas para a estabilidade da planta como

um todo, melhorando a recuperação mássica e gerando um maior aproveitamento energético, consequentemente reduzindo os custos de produção.

Sabe-se que a obtenção do controle de velocidade em motores de corrente alternada através de inversores de frequência é algo muito comum, entretanto, o objeto de estudo deste trabalho tem como diferencial a aplicação em um motor de alta potência (acima de 4000 CV), usado no moinho de bolas do circuito de moagem de uma unidade de Concentração de Minério. Aplicações de controle de velocidade em potências tão altas não são comuns, mas provada a sua viabilidade financeira, representa um ganho operacional expressivo ao local de aplicação.

Sendo assim, o trabalho em questão teve por objetivo a verificação da viabilidade de implantação do acionamento e da variação de velocidade em um motor de alta potência aplicado ao processo de moagem em uma mineradora do Alto Paranaíba, Minas Gérias, através do uso de inversor de frequência. O estudo contempla também o mapeamento das ações necessárias para tal aplicação e quais os resultados podem ser vislumbrados perante a condição atual.

Para que fosse possível chegar à viabilidade desta aplicação, bem como os demais objetivos gerais mencionados acima, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento de campo, identificando toda a estrutura de equipamentos instalados atualmente nesta organização.
- Mostrar de forma clara os possíveis ganhos operacionais com a modificação deste sistema de moagem, através da realização de simulações do processo;
- Definir as modificações que seriam necessárias no sistema existente para comportar o novo conceito de acionamento;
- Definir a faixa de operação e os parâmetros de desempenho do inversor de frequência (regulagem de torque para partida e operação) para a aplicação em específico.
- Estabelecer um quadro comparativo entre os dois tipos de acionamento (atual e o proposto pelo estudo).
- Realizar um balanço entre benefícios operacionais e desembolso financeiro previsto para a aplicação.
- Simular o tempo previsto de recuperação do investimento, também conhecido como “*payback*”, utilizando premissas operacionais.

Dessa forma, para que os objetivos pudessem ser buscados, foram recapitulados alguns referenciais teóricos, os quais estão apresentados no tópico seguinte.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo em questão trata dos principais pontos de referência em que este trabalho utiliza como base, aborda os assuntos correlacionados com o tema de forma a nivelar os conhecimentos e as premissas utilizadas.

### 2.1 Mineração

De acordo com Castro, Nalini e Lima (2011, p. 24), “a mineração pode ser definida como o processo de extração de minerais ou compostos minerais de valor econômico da crosta terrestre para o benefício da humanidade”. Sendo uma atividade primária, a mineração gera matéria prima para os demais setores de processamento e manufatura, sendo boa parte para o setor industrial.

O processo de extração mineral pode acontecer a seco ou via úmida, por lavra a céu aberto ou subterrâneos. A exploração de minério à céu aberto é exemplificada na Figura 1, onde o método de retirada dos minerais ocorre em menor profundidade, à partir da superfície do solo. Normalmente, este tipo de lavra explora o minério até o seu esgotamento (CURI, 2017).

Figura 1 – Exemplo de lavra a céu aberto



Fonte: Júnior (2020)

Em contrapartida, nos casos de lavra subterrânea, como mostrado na Figura 2, o minério se encontra em grandes profundidades, em que não é viável a lavra por método à céu aberto. Nesse método, o minério é mapeado, a área é delimitada, as informações são obtidas através de serviços de sondagens, assim realizada a geolocalização e posteriormente o planejamento estratégico de lavra (CURI, 2017).

Figura 2 – Exemplo de lavra subterrânea



Fonte: Januário (2019)

Após a extração do minério, existe a demanda de tratamento do produto, para que este possa assumir condições próprias para manufatura em processos seguintes. Esta etapa seguinte é comumente denominada de Tratamento de Minérios ou mesmo Beneficiamento Mineral (CASTRO; NALINI; LIMA, 2011).

### **2.1.1 Beneficiamento Mineral**

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), o beneficiamento mineral ou tratamento de minérios é definido como sendo um conjunto de operações aplicadas aos bens minerais que visam alterar a granulometria e concentração relativa dos minerais sem modificar as propriedades químicas e físicas do material.

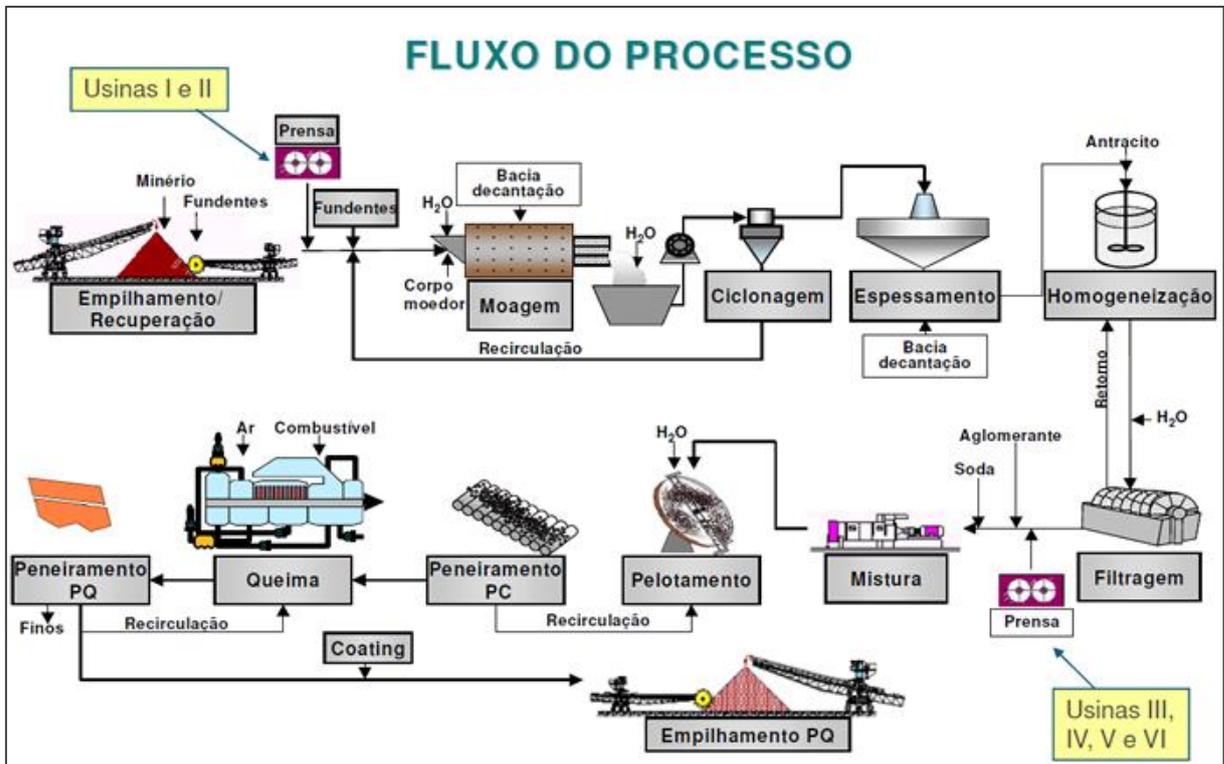
As operações de concentração tem como objetivo separar o mineral de interesse dos minerais de ganga, também conhecido como rejeito. Entretanto, para que seja possível alcançar a etapa de concentração, o minério deve estar fisicamente liberado, esta condição é obtida através de uma etapa de redução de tamanho, denominada de cominuição, que pode ser composta por britagem e/ou moagem (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Dessa forma, é possível afirmar que a maioria dos processos de tratamento de minério seguem uma sequência típica de etapas, sendo estas descritas como:

- Cominuição: desmonte de rocha, britagem e moagem
- Peneiramento e classificação
- Concentração
- Desaguamento: espessamento e filtração
- Secagem
- Disposição de rejeitos

A Figura 3 representa um fluxograma do processo de tratamento de minério para uma unidade de pelletização da Vale SA, como um exemplo prático de aplicação dos processos vistos anteriormente.

Figura 3 – Fluxograma de processo de pelletização da Vale.



Fonte: Vale (2014)

### 2.1.2 Moagem de Minério

Segundo Figueira, Almeida e Luz (2004), sendo o último estágio do processo de fragmentação do minério, a moagem reduz as partículas utilizando uma combinação dos esforços por impacto, compressão, atrito e abrasão. Sendo que cada minério e processo de tratamento possuem as suas características de moagem, dependendo principalmente dos demais processos aos quais será submetido posteriormente aquele mesmo material.

A eficiência do processo de moagem impacta diretamente no desempenho das demais etapas do processo. A submoagem acaba resultando em um material de granulometria superior e liberação incompleta do material útil, prejudicando o processo de concentração. Já a sobremoagem, aumenta a quantidade de finos (minério de baixíssima granulometria) no processo de forma que se torna mais oneroso chegar à concentração ideal, consumindo mais energia e aumentando as perdas durante o tratamento (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

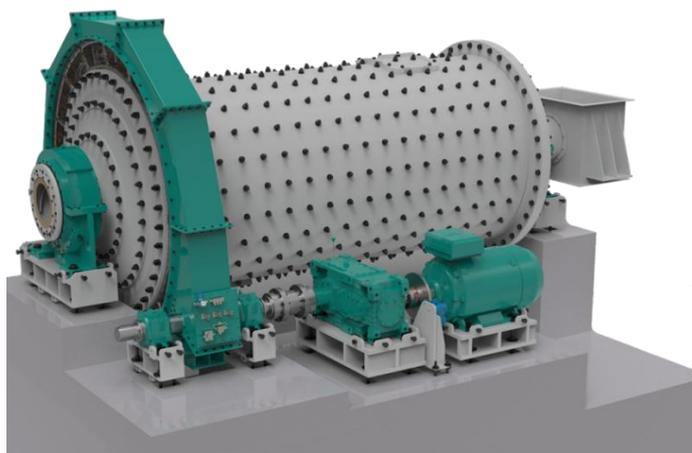
Os principais tipos de moinhos aplicados nas indústrias de mineração são: moinhos de bolas, moinhos de barras, moinhos verticais, moinhos autógenos (AG) e semiautógenos (SGA). Tendo em vista que o foco deste trabalho é um sistema de moagem que conta com a presença de um moinho de bolas, os detalhes a respeito deste tipo de equipamento podem ser vistos na sequência.

### 2.1.3 Moinho de Bolas

Os moinhos de bolas possuem aplicação para uma grande variedade de tipos de minérios, podendo chegar a elevadas razões de redução, tanto por moagem a seco quanto a úmido. Entretanto, segundo Peres & Chaves (2012), a moagem é preferencialmente realizada a úmido, contando com uma polpa variando entre 50% e 60% de concentração de sólidos.

Estruturalmente, os moinhos de bolas são constituídos de um corpo cilíndrico revestido internamente por placas de desgaste metálicas ou de borracha, apoiado sobre mancais, contando com um sistema de acionamento por engrenagens, sendo a engrenagem maior fixada na carcaça do moinho denominada “coroa” e a engrenagem menor denominada “pinhão”, esta última é acoplada a um redutor e o mesmo está acoplado ao motor elétrico, para obtenção do movimento de rotação, como pode ser visto na Figura 4 (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

Figura 4 – Modelagem 3D de um Moinho de Bolas



Fonte: Adaptado de Netzsch (2022)

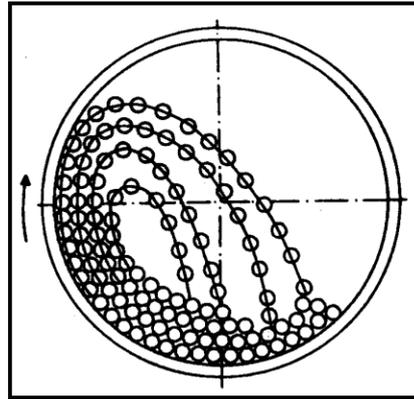
De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), a velocidade e o fator de enchimento do moinho<sup>1</sup> determinam o regime de trabalho do equipamento, possuindo-se então dois tipos de regime: moagem em catarata e moagem em cascata. Na moagem em catarata, a velocidade mais

---

<sup>1</sup> O fator de enchimento do moinho é definido como o percentual de carregamento de bolas em relação ao volume total do equipamento.

alta do moinho carrega as bolas até uma posição mais alta do corpo cilíndrico, onde as mesmas caem sobre as demais na posição inferior, gerando assim a moagem por impacto. Este tipo de regime de trabalho é indicado para moagem de material mais grosso, evitando a formação de finos no processo. O movimento de trabalho do moinho neste regime pode ser visualizado na Figura 5.

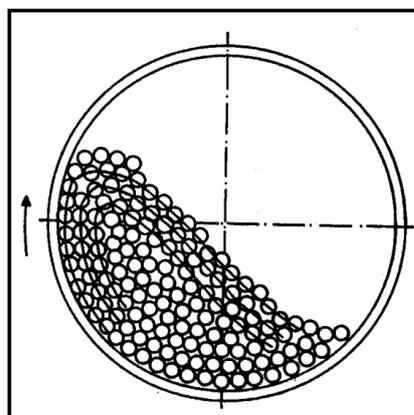
Figura 5 – Representação da moagem em catarata



Fonte: Adaptado de Luz, Sampaio e França (2010)

Em contrapartida, na moagem em cascata, por estar com uma velocidade mais baixa e maior grau de enchimento, ao alcançar determinada altura de elevação, as bolas rolam sobre as outras, gerando pouquíssimos impactos, dessa forma, a moagem acontece por mecanismos de abrasão e atrito. Este tipo de regime é indicado para obtenção de granulometria fina no produto (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). A Figura 6 demonstra o movimento de trabalho das bolas no interior do moinho quando configurado em regime de cascata.

Figura 6 – Representação da moagem em cascata



Fonte: Adaptado de Luz, Sampaio e França (2010)

Diante destas características de trabalho do moinho de bolas, é possível afirmar que estabelecer possibilidades de alteração na velocidade de operação, pode-se aumentar o nível de adaptabilidade da planta às condições de moagem as quais podem ser solicitadas ao longo do tempo.

## **2.2 Acionamentos Elétricos**

Segundo Franchi (2008), os acionamentos realizados por motores elétricos em máquinas e equipamentos mecânicos, possuem grande relevância à economia mundial. Tendo em vista os acionamentos das áreas industriais, estima-se que cerca de 70 a 80% do consumo de energia elétrica é tida pela transformação de energia elétrica em energia mecânica através dos motores elétricos.

Basicamente, o motor elétrico é um equipamento em que pela simples presença de corrente contínua ou alternada, gera a rotação de um eixo, executando dessa forma a transformação da energia elétrica recebida da rede em energia mecânica, podendo ser aproveitada em uma infinidade de aplicações (FRANCHI, 2008).

De acordo com o tipo de alimentação vinda da fonte, os motores elétricos podem ser classificados em motores de corrente contínua (CC) e motores de corrente alternada (CA). Por possuir um controle mais preciso de velocidade, os motores de corrente contínua, apesar do seu custo elevado, são amplamente aplicados em onde há necessidade de ajustes finos de velocidade. Já os motores de corrente alternada, no geral são alternativas mais econômicas, e compõe a maioria das aplicações industriais (WEG, 2011).

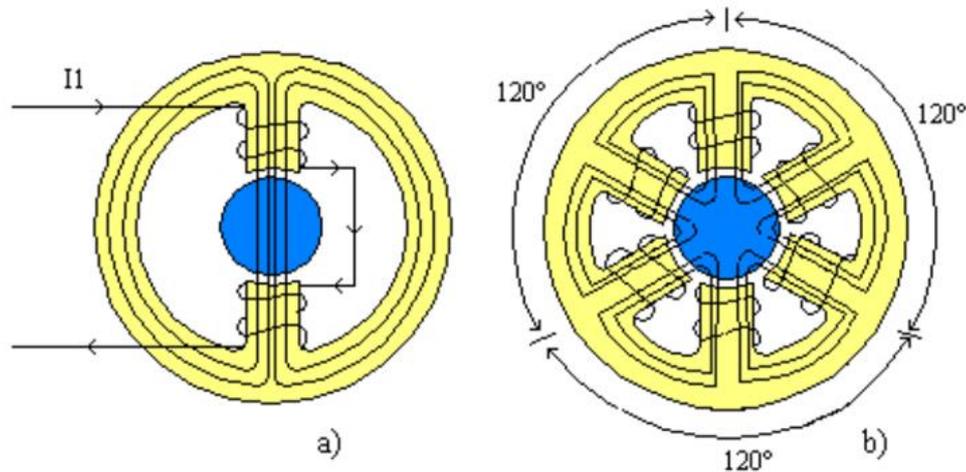
Tendo em vista o foco do projeto de pesquisa, a abordagem seguinte trata com mais detalhes acerca dos motores de corrente alternada, especificamente os motores de indução trifásicos.

### **2.2.1 Motores de Indução Trifásicos**

Alinhado aos princípios de funcionamento das máquinas elétricas, em sua abordagem, WEG (2011) reforça que no momento em que uma bobina (enrolamento em formato cilíndrico de um condutor) é percorrida por uma intensidade de corrente elétrica, é gerado um campo magnético de valor proporcional à esta mesma corrente e direcionado conforme o eixo da bobina.

É possível observar na Figura 7, a forma construtiva de dois enrolamentos de motores de indução, à esquerda um enrolamento monofásico e à esquerda um enrolamento trifásico.

Figura 7 – Enrolamentos de motores de indução a) monofásico e b) trifásico



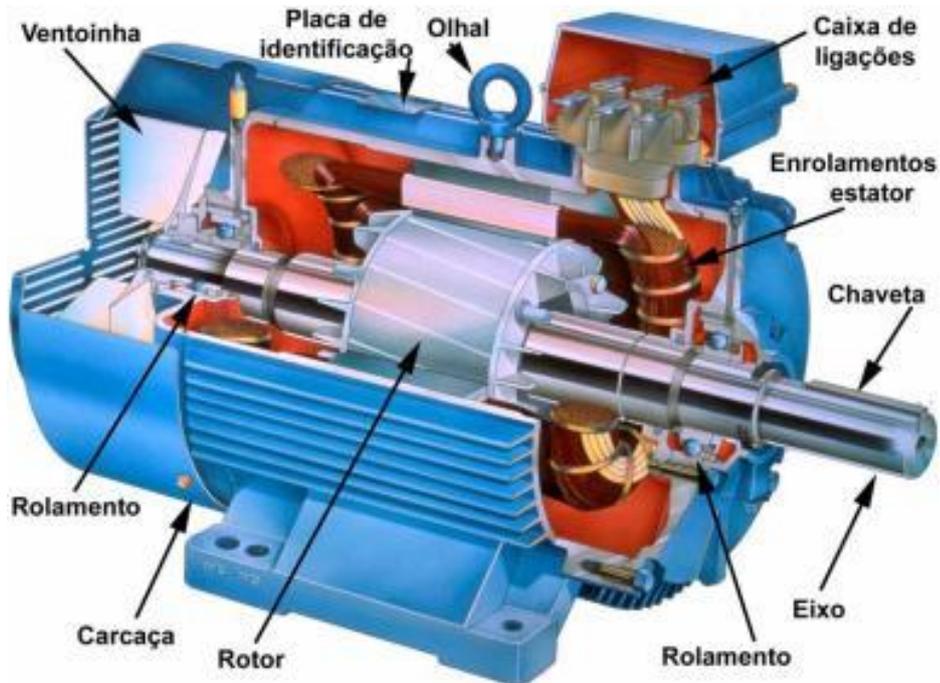
Fonte: Adaptado de WEG (2011)

O enrolamento monofásico é composto por dois polos (“norte” e “sul”), este mesmo é atravessado por uma corrente elétrica “I” que, ao combinar os efeitos ocorridos em cada um dos polos gera o campo magnético “H”. O fluxo magnético  $\Phi$  (medida do campo magnético total que atravessa uma área específica) gerado passa através do rotor entre os dois polos e se fecha no núcleo do estator. Tendo em vista que a corrente “I” é alternada, o campo “H” gerado segue a mesma lógica, invertendo o seu sentido a cada ciclo. O campo magnético gerado é sempre pulsante, devido a variação da sua intensidade proporcionalmente a corrente, mantendo a direção (norte-sul) de um polo a outro (WEG, 2011).

O enrolamento trifásico, representado também na Figura 7 item “b”, é composto basicamente por três enrolamentos monofásicos defasados de  $120^\circ$  entre si. Quando há alimentação deste enrolamento por uma rede trifásica, são induzidas correntes em cada um dos enrolamentos, gerando cada um o seu respectivo campo magnético, também espaçados de  $120^\circ$ , tendo como campo total resultante a soma gráfica dos campos gerados. Dessa forma, é criado um campo girante, que induz tensões no rotor, gerando correntes e como consequência um campo no rotor, oposto ao campo girante do estator. Como os campos se atraem e o campo no estator é rotativo, desenvolve-se no rotor um conjugado (torque) que faz com que ele gire, acionando assim a carga que está acoplada ao motor (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

De forma a ilustrar o entendimento, na Figura 8 é possível visualizar uma vista em corte de um motor de indução trifásico, bem como as principais nomenclaturas das suas partes e componentes.

Figura 8 – Vista em corte de um motor de indução trifásico



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2022)

De acordo com Fitzgerald e Kingsley (2014), a velocidade síncrona do motor ( $n_s$ ), dada em RPM (Rotações por minuto), pode ser considerada a mesma tida pelo campo girante, a qual depende do número de polos do motor ( $p$ ) e da frequência ( $f$ ) fornecida pela rede, podendo ser definida então a partir da equação I.

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ (rpm)} \quad (\text{I})$$

Ainda segundo o autor, tendo em vista que o número de polos de um motor é um aspecto construtivo e a frequência é a mesma obtida da rede, tem-se uma velocidade fixa para cada configuração de motor, a menos que se tenha uma manipulação da frequência da rede antes de fornecer ao equipamento, podendo assim variar a velocidade síncrona.

Os motores de indução podem ser instalados em conjunto com acessórios, principalmente para partida, portanto, a abordagem seguinte trata um pouco a respeito dos reostatos líquidos de partida, por ser um acessório comumente utilizado em acionamentos de grande porte, como nos moinhos, foco de estudo deste trabalho.

### 2.2.2 Reostato Líquido de Partida

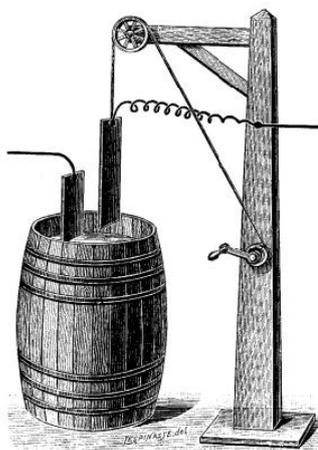
De acordo com WEG (2011), os motores de indução de anéis podem assumir curvas características de conjugado em função da velocidade, por meio da inserção de resistência externas no circuito rotórico. Dessa forma, é possível que o motor tenha um valor de conjugado alto na partida com correntes relativamente baixas. Uma forma de inserir esta resistência externa no circuito é a inclusão de um reostato, e em casos de motores de alta potência, são utilizados reostatos líquidos.

Para explicar o funcionamento de um reostato líquido, Guedes (1995) aborda uma maneira simples de construção, utilizando uma cuba cheia de líquido condutor, onde são mergulhadas placas metálicas ligadas aos próprios terminais do motor. À medida que são mergulhadas as placas no líquido condutor, aumenta-se a intensidade de corrente elétrica, pelo aumento da superfície imersa. Dessa forma, o autor afirma que a resistência elétrica é diretamente proporcional à resistividade do líquido e a distância entre as placas, também sendo inversamente proporcional à área das placas imersa no líquido.

De forma bem didática, a Figura 9 apresenta a forma construtiva de um reostato líquido de partida, auxiliando no entendimento de como ocorre o funcionamento deste tipo de equipamento. Sendo o barril uma representação da cuba de líquido condutor, as lâminas ligadas aos terminais do equipamento e a manivela representando o sistema de variação da profundidade de imersão das placas no líquido.

Os reostatos líquidos são muito utilizados para partida de motores, uma vez que é capaz de estabilizar a corrente de partida, através da modificação da resistência do circuito de forma gradativa até atingir a rotação nominal do motor (GUEDES, 1995).

Figura 9 – Representação didática de um reostato líquido.



Fonte: Adaptado de Guedes (1995)

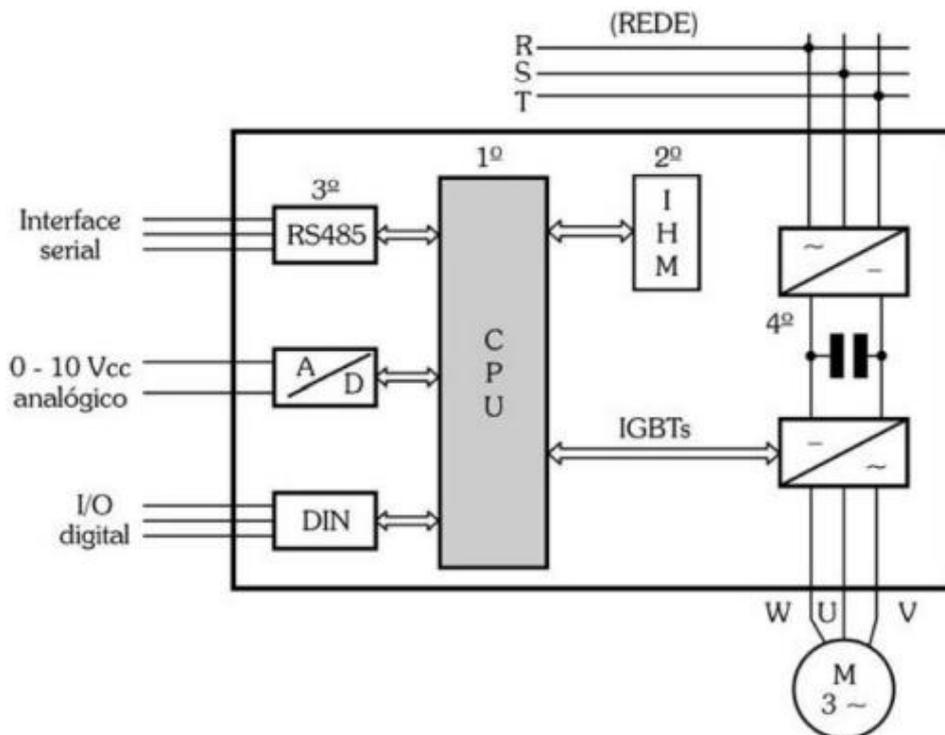
Com a evolução na eletrônica de potência, os acessórios de partida puderam receber maiores atribuições e ganhos ao sistema elétrico. Quando se tem esta necessidade de variação de velocidade em um motor de corrente alternada, um exemplo de aplicação nas instalações é a utilização do inversor de frequência, cujo princípio de funcionamento é detalhado na sequência.

### 2.3 Inversores de Frequência

Os inversores de frequência estão ocupando cada vez mais espaço nos ambientes industriais, com objetivos diversos, mas principalmente para o controle de velocidade, torque e economia de energia. Atribuindo aos equipamentos industriais certa aptidão a receber outros controles integrados com o restante do parque fabril.

Segundo Franchi (2013), o inversor de frequência, para possibilitar a operação do motor com torque constante em diferentes velocidades, varia a tensão gerada no estator da máquina, assim proporcionalmente variando a frequência, mantendo o fluxo magnético constante. Dessa forma, o inversor pode ser considerado uma “fonte de tensão alternada de frequência variável”. Fisicamente os inversores possuem a característica construtiva representada pela Figura 10.

Figura 10 – Forma construtiva geral dos inversores de frequência

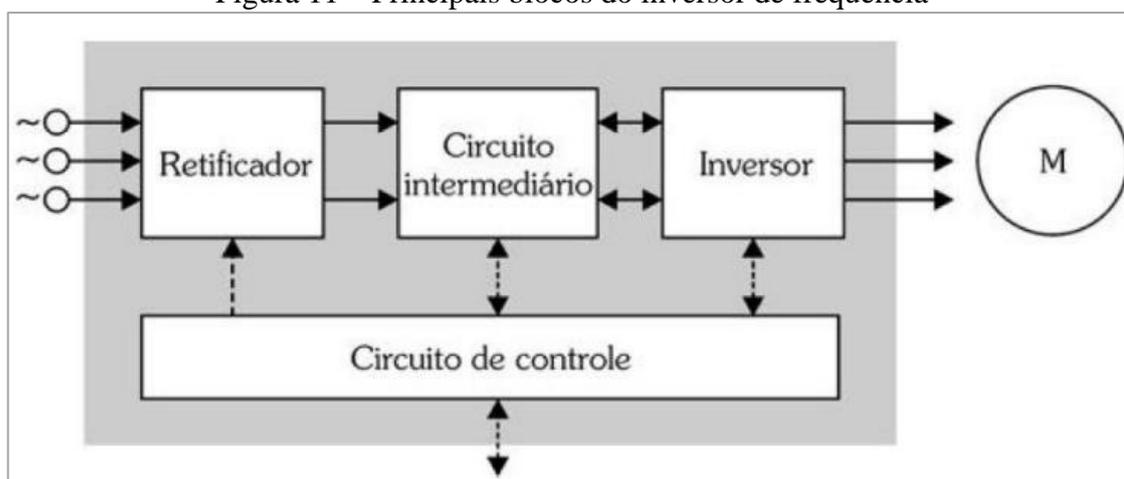


Fonte: Adaptado de Franchi (2013)

Para o entendimento do funcionamento dos inversores de frequência, é necessário compreender a função de cada um dos principais componentes deste equipamento. O estágio de entrada é composto por um retificador, o qual é um conversor com função de transformação de CA para CC. Em sequência tem-se um circuito intermediário, também denominado de link CC com filtro, que torna a forma de onda contínua. Por fim, tem-se o inversor que é um tipo especial de conversor, que transforma a corrente de CC novamente para CA, de forma a possibilitar a alimentação do motor com tensão e frequência variáveis. Os três blocos estão ligados ao circuito de controle, que determina os valores desejados ao circuito (FRANCHI, 2013).

É possível observar através da Figura 11 os principais blocos que estão contidos no circuito de um inversor de frequência.

Figura 11 – Principais blocos do inversor de frequência



Fonte: Adaptado de Franchi (2013)

É ressaltado por Franchi (2013) que os inversores podem ser classificados tendo em vista o seu tipo de controle, podendo ser de controle escalar, controle vetorial, controle de fluxo vetorial e controle orientado de campo, sendo os dois primeiros amplamente utilizados nas indústrias.

O controle escalar visa manter a relação entre tensão e frequência constante, ou seja, o motor opera com fluxo praticamente constante, indicado quando não há necessidade de rápidas respostas de velocidade e torque. Já os inversores com controle vetorial efetuam o cálculo da corrente necessária para atingir o torque requerido, calculando a corrente do estator e a corrente de magnetização. Diferente do controle escalar, o vetorial consegue prover alto desempenho dinâmico à máquina, com respostas rápidas e alta precisão (FRANCHI, 2013).

Dessa forma, através da Figura 12 é possível visualizar um modelo de inversor de frequência produzido pela WEG, aplicado a motores de até 175 CV. Este é um tipo de inversor bem versátil na sua faixa de aplicação, uma vez que é capaz de promover controles tanto vetorial quanto escalar.

Figura 12 – Inversor de frequência CFW500



Fonte: Adaptado de WEG (2022)

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas para a execução do trabalho, a forma de levantamento de dados, a estratégia adotada para avaliação das tecnologias atuais em mercado e critérios considerados para a determinação dos equipamentos pertencentes ao projeto.

#### 3.1 Caracterização da pesquisa

Segundo Gerhardt e Silveira (2009), “pesquisar é conhecer a realidade”, através do levantamento de informações representativas, que podem ser denominadas de dados. O processo de obtenção dos dados foi uma etapa de extrema importância para o projeto em questão, uma vez que as propostas de mudanças puderam ser delineadas a partir da condição existente, em busca de algo superior, ou seja, que represente ganhos ao processo produtivo.

De acordo com Gil (2002), os procedimentos de coleta de dados podem ser divididos em dois grupos, sendo o primeiro relacionado às fontes literais e o segundo pelas informações obtidas através das pessoas. Nas fontes advindas da literatura temos a pesquisa bibliográfica e pesquisa documental. Já o segundo grupo é composto pela pesquisa experimental, pesquisa *ex-post facto*<sup>2</sup>, o levantamento e o estudo de caso. As classificações não podem ser consideradas rígidas, uma vez que dependendo das características, podem não se enquadrar bem em um ou outro modelo.

Em uma obra de amplo reconhecimento na área de metodologia científica, Marconi e Lakatos (2003) abordam a respeito dos principais tipos de pesquisa, diversas classificações são realizadas, de acordo com as características e abordagens de cada estudo. Visto os tipos de pesquisa existentes, é possível afirmar que o estudo em questão se trata de uma Pesquisa Aplicada, focada no seu interesse prático, onde os resultados são vislumbrados imediatamente após a implantação.

Pode-se afirmar também que parte desta pesquisa possui cunho bibliográfico, uma vez que a atualização dos conceitos e novas tecnologias no âmbito da eletrônica de potência foi um fator crítico para alcançar os objetivos traçados.

---

<sup>2</sup> De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), *ex-post facto* é um tipo de pesquisa em que os dados somente podem ser coletados após a ocorrência dos eventos.

### **3.2 Coleta dos dados do equipamento**

Considerando que o estudo em questão está diretamente ligado ao Moinho de Bolas de uma das unidades de beneficiamento pertencente a uma mineradora do Alto Paranaíba, para que fosse possível a verificação da situação instalada, foi necessário o levantamento de todos os dados técnicos em campo do equipamento. A verificação de desenhos técnicos, catálogos e a própria interação com os usuários diários do equipamento fizeram parte desta etapa de coleta de dados.

De forma a alimentar o banco de dados deste estudo, através do levantamento de campo buscou-se obter no mínimo as seguintes informações:

- Plaqueta do fabricante do equipamento instalado, seu respectivo sistema de acionamento e acessórios.
- Dados da dinâmica de funcionamento do equipamento, tais como: tensão nominal de trabalho, corrente de partida, corrente nominal, torque de partida, torque de operação, entre outros que se tornaram necessários ao dimensionamento do novo conceito de acionamento e operação.
- Necessidades operacionais do equipamento, como o regime de trabalho, carga operacional e condições que devem ser oferecidas para inspeção e manutenção.

### **3.3 Análise das limitações do acionamento atual**

De posse dos dados referente às instalações existentes, foi realizada a análise dos pontos positivos e negativos do sistema instalado, tendo em vista que o mesmo já se encontra operacional há alguns anos e possui sua contribuição para o resultado de produção obtido atualmente. Para chegar a este quadro comparativo, utilizou-se de bases teóricas a respeito dos equipamentos e complementadas com a visão de campo, sob olhar das equipes de operação, processo, inspeção e manutenção, responsáveis pelo sistema.

O equipamento possui algumas limitações conhecidas, como a impossibilidade de variação na sua rotação de trabalho, presença de um sistema mecânico muito robusto para giro lento durante etapas de manutenção no corpo do moinho, e presença de um sistema de acionamento via reostato líquido de partida. Estes itens puderam ser identificados na análise imediata da instalação, e que podem gerar impactos em condições operacionais, em fatores de segurança e de manutenção, vistos desde o princípio como oportunidades de ganhos com o sistema proposto no estudo.

### **3.4 Testes de comportamento do processo via Software**

Tendo em vista que as aspirações de melhoria no processo de moagem a partir da variação de velocidade, até então haviam sido consolidadas apenas baseadas em verificações teóricas, foram propostos testes de comportamento do processo utilizando um software de simulação. Dessa forma, possibilitou-se a análise dos resultados em condições semelhantes ao que o trabalho propõe como melhoria.

Durante o projeto, foi cogitada a possibilidade de realizar a aplicação prática no moinho de bolas em pequena escala disponível no laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG Campus IV Araxá, entretanto, realizar testes de forma isolada no moinho de bolas, poderiam mascarar algum resultado inerente à outras condições de fábrica. Além da questão de que o moinho existente no laboratório não conseguiria garantir total semelhança com as condições operacionais de campo, por ser um protótipo de pequena escala. Por isso a escolha de um ambiente de simulação via software, onde outros dados de processo também puderam ser carregados, trazendo um resultado mais próximo da realidade do local de aplicação.

### **3.5 Dimensionamento do inversor de frequência adequado à aplicação**

Diante das informações operacionais coletadas, foi possível traçar alguns limites e características de trabalho que são esperadas para o sistema de acionamento do moinho. Dessa forma, possibilitando o avanço no dimensionamento do equipamento que atenda a estas necessidades e consiga trazer melhorias nas condições do processo.

De acordo com Franchi (2013), o dimensionamento do inversor de frequência leva em consideração os seguintes critérios de seleção:

- Torque de partida necessário;
- Faixa de velocidade de operação;
- Compatibilidade com a tensão da rede;
- Condições do ambiente onde será instalado, para definição da classe de proteção;
- Tipo de controle de velocidade;
- Regime de trabalho;
- Método de controle;
- Recursos de proteção do motor e do próprio inversor;
- Fatores de manutenção e disponibilidade de peças de reposição.

Além dos itens descritos, para a seleção correta do inversor, foram considerados também o tipo de carga de trabalho, os tipos de comando, a forma como o inversor será acionado para alteração da velocidade, o tipo de frenagem e o tipo de comunicação disponível na planta, para interligação dos comandos na infraestrutura existente.

Desde o princípio, dentre as classificações de controle dos inversores, o controle vetorial se desenha como um tipo de aplicação mais adequada, por possuir boa regulação de velocidade e alto torque de partida, que tem coerência com a necessidade de campo. Entretanto, foram avaliados todos os parâmetros descritos, realizando um paralelo com as restrições operacionais definidas e o que cada tipo de controle do inversor é capaz de fornecer.

Após definição dos parâmetros em que o inversor deverá trabalhar, iniciou-se o processo de busca do que há disponível em mercado que tenha maior compatibilidade com a necessidade de campo e que também seja atrativo comercialmente, preservando a relação custo-benefício da aplicação, a qual está detalhada na seção 3.6 deste trabalho.

### **3.5.1 Seleção do inversor de frequência no mercado**

Atender as características de desempenho mínimas da instalação foi uma premissa para este estudo, entretanto, também foram avaliados quais os avanços tecnológicos estão presentes no mercado para os inversores de frequência. Esta estratégia foi adotada para que fosse possível escolher um equipamento atualizado tecnologicamente, preservando o conceito de melhoria contínua das operações na fábrica.

Para verificação destes avanços tecnológicos e seleção do inversor de frequência ideal, foram consultados os principais fabricantes que possuem disponibilidade de produtos no Brasil, tais como:

- Schneider Eletric do Brasil Ltda.
- WEG Equipamentos Elétricos S.A.
- SEW Eurodrive Brasil Ltda.
- Rockwell / Allen-Bradley

Nesta consulta, foram solicitados aos fornecedores os catálogos das linhas de produtos mais atuais, contendo todas as suas informações técnicas e uma prévia de valores de fornecimento, para que pudessem servir de base no balizamento técnico e comercial da aplicação.

### **3.6 Avaliação de custo-benefício da aplicação**

Coletadas as informações para o dimensionamento da aplicação, escolhido o inversor de frequência no mercado e visto os benefícios operacionais, foi estabelecido uma relação de custos previstos para alteração do sistema de acionamento do moinho de bolas, de forma a estimar o desembolso previsto para implantação do projeto.

Por se tratar de uma melhoria, a avaliação custo-benefício realizada é baseada no cálculo do “payback” ou tempo de recuperação do investimento, frente aos ganhos operacionais estimados. Kassai *et al.* (2000, p. 84) define o “payback” como a “identificação do prazo em que o montante do dispêndio do capital efetuado seja recuperado por meio dos fluxos líquidos de caixa gerados pelo investimento”, ou seja, é o prazo em que os custos incorridos com o investimento são anulados pelos ganhos capitais gerados pela implantação.

Dessa forma, esta etapa teve por objetivo oferecer as condições de tomada de decisão de implantação ou não por parte da organização, mostrando a avaliação de viabilidade financeira, com o seu potencial de ganhos e tempo em que o valor investido poderá ser recuperado.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são discorridos os resultados obtidos com este estudo, bem como o detalhamento das etapas que se fizeram necessárias, possibilitando o entendimento do trabalho envolvido para chegar à viabilidade técnica e financeira da aplicação proposta.

### **4.1 Levantamento de campo**

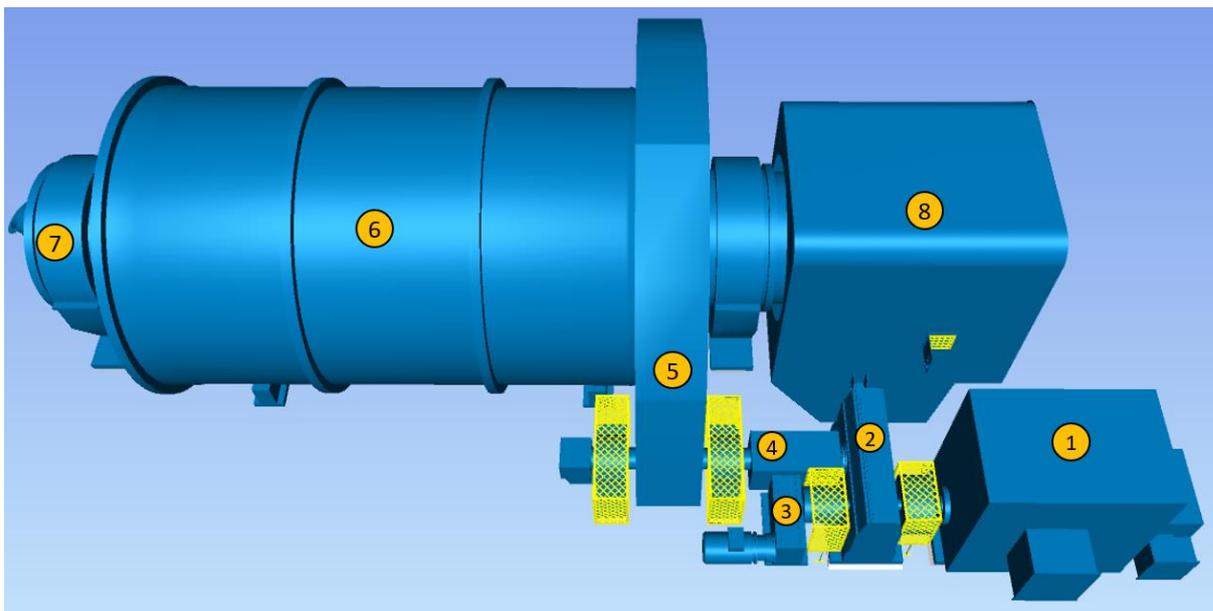
Para que fosse possível o estudo detalhado da modificação do acionamento do Moinho de Bolas desta mineradora, o levantamento de campo em suas dependências foi uma etapa crucial, de forma a visualizar a realidade da operação e coletar principalmente os dados técnicos a respeito do equipamento com seus respectivos acessórios.

Em campo, foi identificado que o conjunto de acionamento do equipamento possui uma restrição de acesso enquanto o mesmo está em regime de operação, critérios em atendimento à Norma Regulamentadora NR-12 – Proteção de Máquinas e Equipamentos. Dessa forma, foi possível realizar apenas uma observação da dinâmica de funcionamento e contato com os operadores e mantenedores, para coletar maiores informações do dia a dia do sistema de moagem, tanto durante 95% do seu tempo operando, quanto em eventuais paradas operacionais para manutenção.

Apesar da restrição de acesso, foi possível identificar principais componentes do moinho de bolas de forma visual em campo, que são responsáveis hoje pela operação na capacidade de produção instalada. Porém, a área em questão possui restrição quanto à realização de fotografias por sigilo de processo, mas as informações técnicas de cada componente de forma individual puderam ser coletadas no arquivo técnico da empresa.

Dessa forma, a Figura 13 trata de uma representação em 3D dos equipamentos que compõe o sistema de moagem de bolas encontrado em campo. Para melhor entendimento e facilidade na identificação os componentes foram enumerados na representação e listados na sequência através da Tabela 2.

Figura 13 – Representação em 3D das instalações em campo



Fonte: Próprio autor.

Conforme citado anteriormente, a partir da Figura 13, foi elaborada a Tabela 2, como um detalhamento dos componentes enumerados no sistema de moagem levantado em campo.

Tabela 2 – Detalhamento dos componentes do sistema de moagem

<b>Componente</b>	<b>Descritivo breve do item</b>
1	Motor de Acionamento Principal (WEG MAF710A – 4350 CV)
2	Redutor de Velocidade Principal (PTI PH1S230G5E - 1:5,14)
3	Redutor de Velocidade Auxiliar (PTI PH4S30B200E - 1:204,89)
4	Eixo Pinhão de Acionamento do Moinho
5	Coroa de Acionamento do Moinho
6	Corpo do Moinho de Bolas
7	Calha de Alimentação do Moinho
8	Calha de Descarga do Moinho

Fonte: Dados da pesquisa.

Após o levantamento básico dos componentes deste sistema de moagem, realizou-se uma tratativa mais detalhada para cada um dos mesmos passou por um levantamento detalhado, visando abranger todos que possuem interface com a modificação proposta pelo trabalho. Nos subtópicos em sequência, serão abordados os dados técnicos detalhados do moinho, seu

respectivo redutor de velocidade principal, o redutor de velocidade auxiliar e o principal componente de foco do trabalho, o motor de acionamento principal do moinho.

#### **4.1.1 Moinho de Bolas**

Através de consultas ao acervo técnico da empresa, foi possível identificar que o moinho de bolas utilizado neste sistema de moagem é de fabricação de uma indústria chinesa, denominada CITIC HEAVY INDUSTRIES CO, sendo um formato cilíndrico como visto nas ilustrações anteriores, com posição de trabalho na horizontal.

A alimentação deste moinho é feita através da calha de alimentação com material úmido (percentual de umidade definido conforme necessidade de moagem do processo), e a saída do material já moído é feita por “*overflow*”, do inglês transbordo, na calha de descarga para as etapas seguintes.

Basicamente, através dos levantamentos realizados, foram identificadas as seguintes características construtivas neste moinho de bolas:

- Modelo: M831A-SM
- Diâmetro efetivo: 4800mm
- Comprimento: 8100mm
- Volume efetivo: 149 m<sup>3</sup>
- Diâmetro da alimentação: 1025mm
- Rotação de trabalho atual: 14,2 RPM

Este moinho conta com o acionamento por engrenagens, sendo uma que sobrepõe todo o corpo cilíndrico do equipamento, denominada coroa, e a outra engrenagem que é o eixo pinhão acoplado diretamente ao eixo de saída do redutor principal. Neste acionamento por coroa e pinhão, por existir uma grande diferença de diâmetro entre os mesmos, existe uma relação de redução de 1:12,1 (para uma rotação completa da coroa, o pinhão realiza 12,1 rotações).

#### **4.1.2 Redutor de Velocidade Principal**

Para proporcionar a operação deste moinho de bolas em tão baixa rotação e com o torque exigido, é utilizado um redutor de velocidade produzido pela PTI – POWER TRANSMISSION INDUSTRIES, que transmite a potência aplicada pelo motor no eixo de entrada do redutor para o pinhão no eixo de saída, reduzindo a velocidade e atribuindo um alto ganho de torque ao acionamento.

No levantamento realizado na documentação técnica, foi possível identificar as principais características deste redutor de velocidade, possibilitando a verificação da capacidade de redução e potência adequada ao motor que é utilizado para acionamento deste conjunto. Dessa forma, podem ser listadas as seguintes características:

- Modelo: PH1-S-230-G-5-E
- Relação de redução: 1: 5,14
- Rotação de entrada: 895 RPM
- Rotação de saída: 174,12 RPM
- Potência específica: 3200 KW

Como resultado do levantamento, mesmo não podendo acessar a área restrita para fotografia da placa de identificação física do equipamento, a Figura 14 apresenta um trecho do desenho representativo do redutor de velocidade, onde é detalhado exatamente as informações contidas na placa em campo.

Figura 14 – Plaqueta – Redutor de Velocidade Principal

 <b>POWER TRANSMISSION INDUSTRIES</b>			
<b>REDUTOR DE VELOCIDADE</b>			
MODELO	PH1-S-230-G-5-E	DATA	-
PEDIDO	RGW160265-20	REL. REDUÇÃO	1: 5,14
R.P.M. ENTRADA	895	R.P.M. SAÍDA	174,12
POT. ESPECÍFICA	3200 KW	FATOR DE SERVIÇO	2
POT. CATÁLOGO	6400 KW	CAPAC. ÓLEO	-
<small>lubrificação</small>			
TEMP. AMBIENTE	VISCOSIDADE A 40°C	ISO VG	
10-50 [°C]	1500 [SSU]	320	
TROQUE O ÓLEO A CADA 2500 HORAS OU A CADA 6 MESES			
RUA JOSÉ MARTINS COELHO, 300 - SÃO PAULO CGC - 51452910/0001-46			

Fonte: Acervo técnico da empresa.

#### 4.1.3 Redutor de Velocidade Auxiliar

Pelo fato de que o conjunto de acionamento deste moinho de bolas não possui possibilidade de variação de velocidade, durante os processos de manutenção, existe uma necessidade de realizar um giro lento do equipamento, de forma a posicioná-lo em um ângulo que seja possível realizar a intervenção. Por exemplo, quando há necessidade de substituir

alguma placa de revestimento interno do moinho, a parada do mesmo é aleatória, podendo esta região onde se deseja substituir a placa, parar na parte superior, inferior ou alguma outra posição.

Para que seja possível esse posicionamento, o moinho de bolas conta com um pequeno conjunto motor e redutor auxiliar, com alta relação de redução, de forma que após a parada do redutor principal, é possível acionar este redutor auxiliar que é acoplado também no eixo de entrada do redutor principal, levando ao giro lento do moinho. Este acionamento mecânico atribui um maior controle no posicionamento do moinho então para as manutenções ou até mesmo verificações operacionais.

Este redutor de velocidade auxiliar para o giro lento também é de fabricação da PTI – POWER TRANSMISSION INDUSTRIES, possuindo as seguintes características principais:

- Modelo: PH4S30-B-200-E
- Relação de redução: 1: 204,089
- Rotação de entrada: 1178 RPM
- Rotação de saída: 5,772 RPM
- Potência específica: 30 KW

Da mesma forma que o redutor principal, foi possível coletar as informações deste redutor apenas com as documentações técnicas, portanto, a Figura 15 apresenta um trecho do desenho do redutor de velocidade, com o detalhamento do que está contido na placa de identificação em campo.

Figura 15 – Plaqueta – Redutor de Velocidade Auxiliar

 <b>POWER TRANSMISSION INDUSTRIES</b>		<b>REDUTOR DE VELOCIDADE</b>	
PEDIDO RGW160265-30		REL. REDUÇÃO 1: 204.089	
R.P.M. ENTRADA 1178	R.P.M. SAÍDA 5,772		
POT. ESPECÍFICA 30 KW	FATOR DE SERVIÇO 1,267		
POT. CATÁLOGO 38 KW	CAPAC. ÓLEO 61		
LUBRIFICAÇÃO			
TEMP. AMBIENTE 10-50 [°C]	VISCOSIDADE A 40°C 1500 [SSU]	ISO VG 320	
TROQUE O ÓLEO A CADA 2500 HORAS OU A CADA 6 MESES RUA JOSÉ MARTINS COELHO, 300 - SÃO PAULO CGC - 51452910/0001-46			

Fonte: Acervo técnico da empresa.

#### 4.1.4 Motor de Acionamento do Moinho

Através do levantamento de campo e das consultas no acervo técnico, foi possível identificar que o motor de acionamento do moinho foi produzido pela WEG em uma das suas fábricas na Índia. Trata-se de um motor de indução trifásico de 3200 KW de potência e alimentação em 13,8 kV, pertencente à Linha Master de produtos da WEG, a Figura 16 representa a forma construtiva deste motor.

Figura 16 – Motor MAF710B – Linha Master WEG



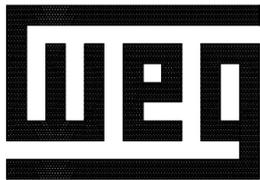
Fonte: Adaptado de WEG (2023)

A partir das informações encontradas na documentação técnica deste motor, foi possível listar as suas principais características construtivas:

- Modelo: MAF710B
- Potência: 3200 kW ou ~ 4350 CV
- Rotação: 893 RPM
- Frequência de trabalho: 60 Hz
- Tensão de alimentação: 13800 V
- Corrente de trabalho: 160,1 A
- Eficiência: 96,1 %
- Classe de proteção: IP55W
- Peso total: 18550 Kg

Além dos itens já descritos, na Figura 17 é possível visualizar as demais informações do motor contidas na placa de identificação em campo, assim como os demais componentes, esta representação foi retirada das documentações técnicas do equipamento.

Figura 17 – Plaqueta – Motor de Acionamento do Moinho

		WEG INDUSTRIES (INDIA) PVT. LTD. HOSUR				
		MADE IN INDIA www.weg.net				
IEC						
<b>THREE PHASE INDUCTION MOTOR</b>						
			<input type="checkbox"/> SQUIRREL CAGE <input checked="" type="checkbox"/> WOUND ROTOR			
MOD MAF710B	Nr.	IL/IN		NOISE 85 dB(A)	Cooling IC611	
kW 3200	PRIMARY			SF 1.15	D.E. Bearing FZLB 18-225	
	V 13800	A 160.1	CONN. Y	COS $\theta$ 0.87	Lubricant OIL ISO VG46	
rpm 893	V	A	CONN.	AMB 45 °C	N.D.E Bearing FZLQ 18-225	
Hz 60	V	A	CONN.	ALT 1150 m	Lubricant OIL ISO VG46	
DESIGN	SECONDARY			RISE CLASS - F	ROTATION FACING SHAFT END	
DUTY S1	V 3400	A 559.7	CONN. Y	ENCLOSURE IP55W	Clockwise	
INSUL. H	EFFICIENCY %	96.1	100%	96	75%	
WEIGHT 18550 kG	YEAR OF MANUFACTURE:			Counter-Clockwise		
Temperature rise by resistance method.					Bidirectional	X
		<b>CAUTION</b>		READ CAREFULLY THE INSTRUCTIONS ON THE INSTALLATION AND MAINTENANCE MANUAL TO ENSURE A SAFE AND CONTINUOUS OPERATION		

Fonte: Acervo técnico da empresa

Este motor é responsável pela operação do moinho em diversas condições, mas um dos seus maiores desafios é a retirada de tamanha carga da inércia, ainda mais em casos em que o moinho é parado ainda com carga de produto em seu interior. Dessa forma, para atender à esta condição operacional, o conjunto de acionamento conta com um reostato líquido de partida, o qual é detalhado no subtópico seguinte.

#### 4.1.4.1 Reostato Líquido de Partida

O reostato líquido de partida utilizado neste conjunto de acionamento, consegue promover uma estabilização da corrente de trabalho do motor em função da variação na resistência do circuito. Esta forma de partida evita picos de corrente e promove um acionamento mais suave, ajudando inclusive a reduzir os impactos de partida deste motor na rede.

No levantamento realizado, foi possível identificar que o reostato líquido utilizado foi produzido pelo fornecedor ELETELE – INDÚSTRIA DE REOSTATOS E RESISTÊNCIAS LTDA, possuindo as seguintes características construtivas:

- Modelo: EF1-4

- Série: 13C6806
- Entrega de torque para partida: 150%
- Quantidade de partidas por hora: 3 partidas à frio e 2 à quente
- Comando lógico: PLC Allen Bradley modelo 1763L16BWA
- Tempo de partida: 36 segundos
- Volume de eletrólitos: 2160 litros
- Concentração de eletrólitos: 4,2 g/L

Na Figura 18 tem-se uma representação da forma construtiva do reostato líquido de partida utilizado no sistema de moagem, mostrando o corpo do reostato, com o reservatório de eletrólitos e bombeamento para refrigeração do líquido.

Figura 18 – Reostato Líquido de Partida



Fonte: Acervo técnico da empresa

## 4.2 Análise das limitações do acionamento atual

O atual sistema de acionamento utilizado no moinho de bolas em questão é bastante robusto, entretanto, desde o princípio as suas limitações são conhecidas, inclusive a partir das mesmas em que este trabalho foi idealizado. O principal limitante de todo o conjunto de acionamento é a impossibilidade de variação de velocidade de rotação, fazendo com que o restante do processo tenha que se adequar ou sofrer os impactos da falta de flexibilidade do sistema de moagem.

Além disso, o sistema instalado carrega consigo algumas outras limitações que podem impactar na confiabilidade e segurança operacional do equipamento, o que leva essa condição

à toda a fábrica, uma vez que o sistema de moagem faz parte do circuito principal de processo. Dessa forma, através dos levantamentos realizados na documentação técnica, experiências de operadores e mantenedores, foi possível listar todas as limitações atuais do sistema de acionamento, as quais estão relacionadas nos tópicos seguintes.

#### **4.2.1 Velocidade de Rotação Fixa**

Como já discorrido anteriormente, por não existir nenhum sistema de controle de velocidade associado ao moinho de bolas, a rotação do equipamento é fixa, o que no dia a dia durante a operação, se torna uma limitação de desempenho da fábrica quando ocorrem variações no próprio minério, não havendo possibilidade de ajustes para um melhor aproveitamento do produto.

Em contato com os representantes da equipe de desenvolvimento de processo da empresa, foi expresso também uma necessidade de variação na velocidade do moinho com expectativa de aumento de capacidade, uma vez que se o minério alcançar a granulometria adequada na moagem em um menor tempo de residência, podem ser alcançadas taxas de alimentação maiores. Em um exemplo paramétrico, se atualmente opera-se com uma capacidade de processamento de 330 t/h (toneladas por hora), variando a velocidade do moinho para uma melhor condição, poderiam ser almejadas 350 t/h de capacidade, representando um ganho significativo à fábrica.

#### **4.2.2 Utilização do reostato líquido como acessório de partida**

O reostato líquido especificado e aplicado no sistema de acionamento do moinho atualmente cumpre o seu papel, entretanto, é um sistema limitado à condição de partida do motor, não possuindo nenhum controle adicional e apresentando pontos de atenção quanto à sua manutenção. Através do estudo de campo, puderam ser levantados os seguintes pontos quando à utilização do reostato líquido.

- Necessidade de acompanhamento frequente do nível de líquido condutor, e em casos de estar divergente do nível ideal, realizar preparação do líquido e completar o nível até a marca indicada.
- A cada 3 anos existe a necessidade de substituição do volume de 2160 litros de eletrólito condutor (gerando necessidade de descarte de resíduos controlados).

- Utilização de um conjunto motobomba auxiliar para variação do nível do líquido condutor entre a cuba e o reservatório. Sendo mais um componente mecânico sujeito a falha por desgaste e interrupção do processo.
- Necessidade de realização de limpeza dos eletrodos / placas fixas no interior da cuba do reostato.
- Necessidade de calibração dos sensores de nível.

A condição de aplicação do inversor de frequência, elimina a necessidade de se ter todo este sistema com reostato líquido, uma vez que o próprio inversor consegue atender à necessidade de partida e variação de velocidade que for requerida pelo processo.

#### **4.2.3 Utilização de um sistema mecânico para giro lento do moinho**

Como visto no levantamento de campo, para atender a necessidade de giro lento do moinho de bolas em condições de manutenção ou verificações operacionais, o conjunto de acionamento conta com um sistema mecânico composto por um motor e um redutor auxiliar, com alta relação de redução. Quando acionado para posicionamento do moinho, o giro é extremamente lento, mas possibilita o ajuste conforme a necessidade.

Semelhante à condição de uso do reostato líquido, o sistema mecânico de giro lento também atende às necessidades de campo, entretanto, é mais um componente sujeito a falhas mecânicas de desgaste, gerando uma série de condições de verificação por parte da manutenção para que se tenha disponibilidade do equipamento para uso.

Com a aplicação de um inversor de frequência, o posicionamento do moinho de bolas para atendimento as condições de manutenção (trocas de revestimento, por exemplo), pode ser feito de forma precisa, escolhendo até mesmo o ângulo de parada do equipamento, utilizando o próprio motor de acionamento principal. Dessa forma, o conjunto mecânico de giro lento poderia ser eliminado, ou até mesmo mantido como redundância, para uso como posicionamento apenas em momentos de manutenção no motor principal.

### **4.3 Testes de comportamento do processo via Software**

Diante de todos os dados levantados a respeito do processo de moagem e conhecidas as limitações do sistema de acionamento do moinho, tornou-se necessário a realização de testes em um ambiente de simulação, para realmente obter informações de como o processo se comportaria na prática com a alteração dos parâmetros de velocidade na moagem.

Para simulação foi utilizado o software denominado JKSimMet, onde puderam ser incluídas as condições operacionais, e definidos os trechos do processo de beneficiamento em que se desejava avaliar, neste caso, o foco da nossa simulação foi estritamente a moagem de bolas, com o estabelecimento de condições paramétricas de processo.

Em um dos seus artigos, Richardson e Schwartz (2013), utilizam o JKSimMet em parte de seu trabalho de modelagem e simulação de circuitos de processamento mineral, obtendo resultados positivos para de simular as condições reais de processamento, o que reforça a confiabilidade nos testes realizados neste ambiente de simulação.

Para fins de simulação, foram utilizados os seguintes parâmetros fixos de processo:

- Carga: 330 t/h de carga sólida
- Variação granulométrica da alimentação: 20 $\mu$ m à 8mm

A proposta de simulação para verificar os resultados na moagem, foi exatamente manter fixos os parâmetros de carga e granulometria de alimentação do moinho e modificar apenas a velocidade de trabalho, para valores inferiores e superiores à rotação utilizada atualmente. Dessa forma, foi possível visualizar os diferentes comportamentos no resultado de granulometria de saída do moinho.

Para o parâmetro de velocidade, o software trabalha com uma relação de percentual da “velocidade crítica” do moinho, que é a velocidade limite em que os corpos moedores ficam imóveis em sua carcaça, não apresentando moagem. De acordo com Luz, Sampaio, & França (2010), a velocidade crítica ( $n_c$ ) de um moinho pode ser calculada pela equação II (sendo  $r$  o raio do moinho em metros):

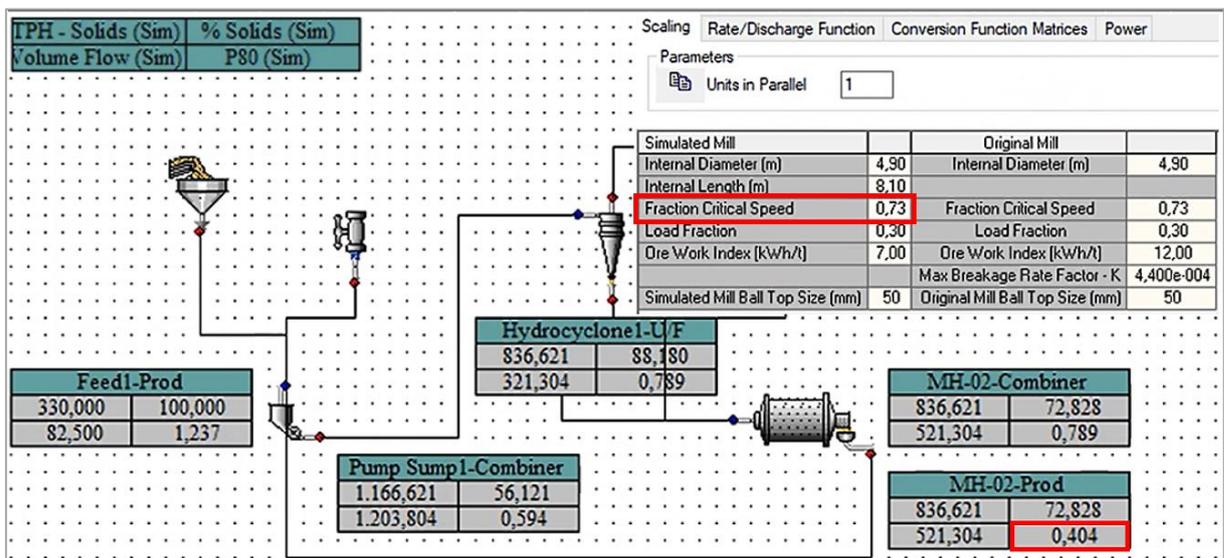
$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{2r}} \quad (\text{II})$$

Sabemos que o diâmetro efetivo do moinho é de 4800mm, logo o seu raio é de 2400mm, portanto chegamos que a velocidade crítica do moinho é de aproximadamente 19,3 RPM. Visto que a rotação nominal do moinho atualmente é de 14,2 RPM, foi possível concluir que atualmente o moinho trabalha com 73,5% da velocidade crítica. A partir desta informação, foram simuladas 03 (três) condições de moagem, sendo uma na velocidade atual de trabalho com 73,5% da velocidade crítica, outra com 60% da velocidade crítica e uma terceira condição aumentando para 80% da velocidade crítica.

Dessa forma, a Figura 19 demonstra a simulação realizada com o percentual da velocidade crítica em 73,5%, conforme é praticado hoje no sistema de acionamento instalado no moinho. Nesta simulação, é possível identificar onde destacado em vermelho a configuração da velocidade e o resultado na saída do moinho em granulometria em milímetros, no formato de “P80”.

O conceito de “P80” define o valor de diâmetro das partículas o qual 80% da massa total do material seja menor que ele. Por exemplo, nesta primeira simulação com a velocidade atual do moinho, para a variação granulométrica do produto inserida, obteve um resultado de moagem com P80 de 0,404mm, ou seja, 80% da massa total processada foi reduzida abaixo desse diâmetro.

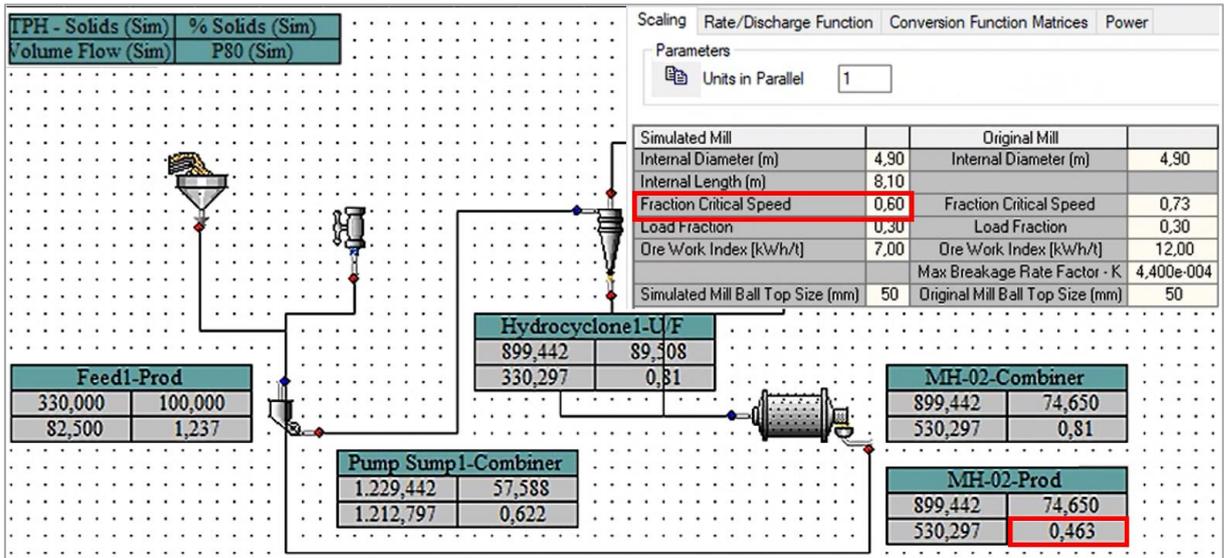
Figura 19 – Simulação de moagem com 73,5% da velocidade crítica



Fonte: Acervo técnico da empresa

No segundo teste realizado, representado pela Figura 20, realizamos uma alteração de rotação no moinho para 60% da velocidade crítica, mantendo o produto processado, obteve-se então um resultado de P80 de 0,463mm, ou seja, uma entrega de granulometria superior ao normal.

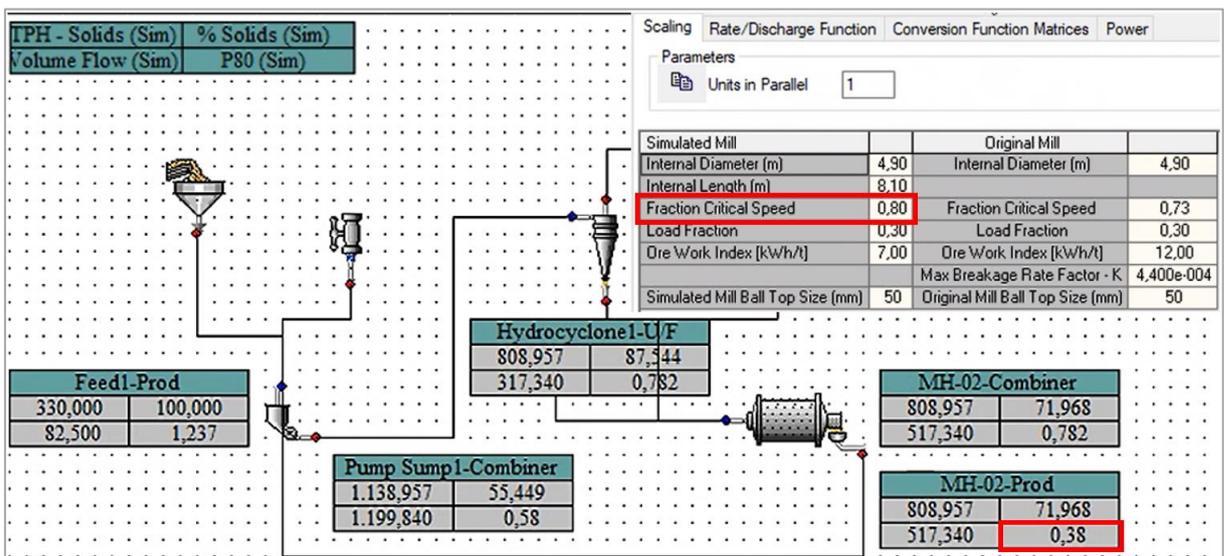
Figura 20 – Simulação de moagem com 60% da velocidade crítica



Fonte: Acervo técnico da empresa.

No terceiro teste realizado, representado pela Figura 21, realizamos uma alteração de rotação do moinho para 80% da velocidade crítica, novamente mantendo as características do produto processado, obtendo um resultado de P80 de 0,380mm, uma entrega de granulometria inferior ao praticado atualmente.

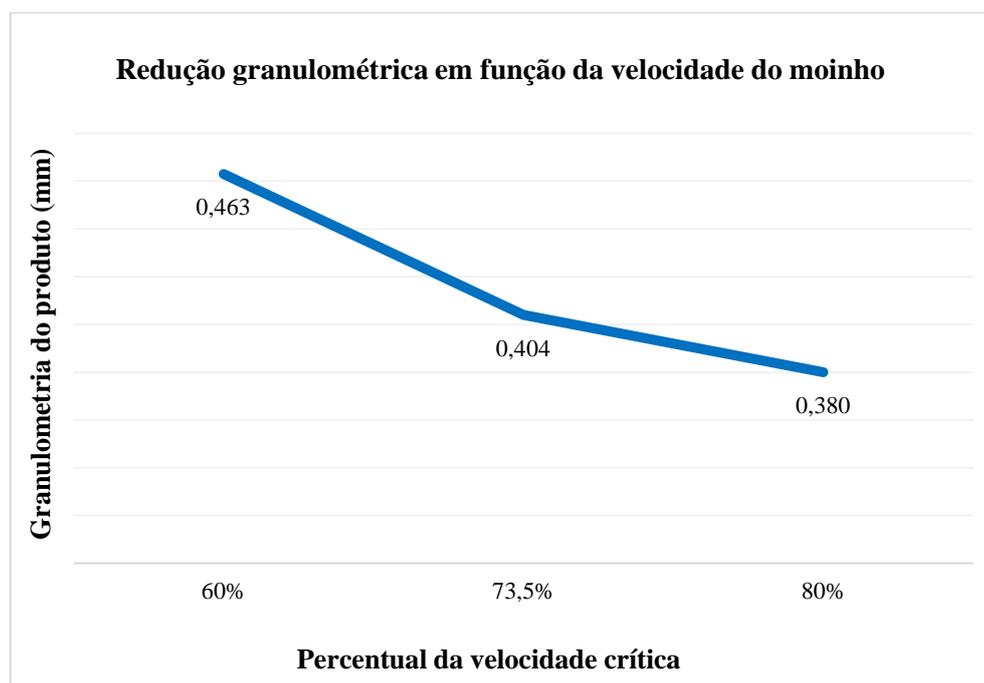
Figura 21 – Simulação de moagem com 80% da velocidade crítica



Fonte: Acervo técnico da empresa.

Dessa forma, foi possível traçar um comportamento da variação da velocidade no moinho com seu resultado de moagem aos processos seguintes pertencentes à unidade de concentração, representado pela Figura 22.

Figura 22 – Gráfico de redução granulométrica em função da velocidade do moinho

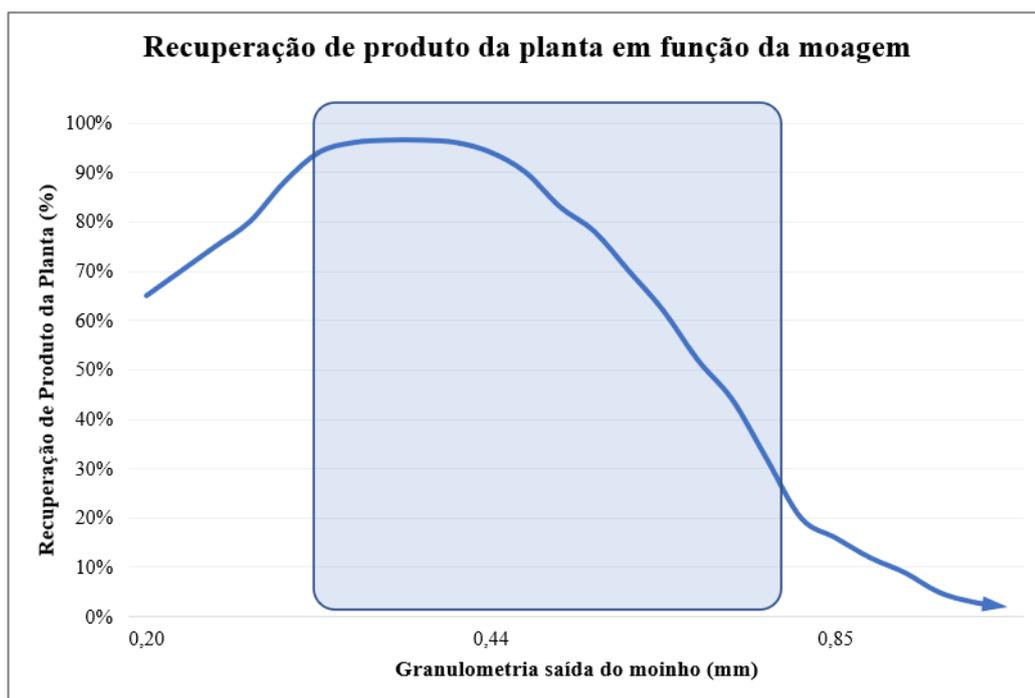


Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos resultados obtidos para as diferentes condições de velocidade do moinho, buscamos referências com a equipe de processos da empresa, a fim de entender qual a influência da granulometria entregue pelo moinho na recuperação de produto pela fábrica. Nesta consulta, foi identificado que para uma determinada faixa de granulometria entregue pelo sistema de moagem às demais etapas, quanto menor a granulometria, maior o percentual de recuperação de produto pela planta.

Este comportamento pode ser visualizado na Figura 23, o qual foi elaborado baseado nos resultados constantes obtidos no laboratório da empresa em questão, representando o comportamento de recuperação do produto em função do resultado da moagem, bem como a região onde o comportamento geral prevalece. O estudo do comportamento de recuperação de produto da planta em questão em função do resultado da moagem, não foi objeto de desenvolvimento do trabalho, por isso esta é uma informação obtida com a equipe de processos desta unidade operacional.

Figura 23 – Recuperação de produto em função da granulometria alcançada na moagem



Fonte: Dados da pesquisa.

Dessa forma, foi possível inferir que, com a possibilidade de variação de velocidade no moinho de bolas, existem ganhos potenciais à produção com a obtenção de granulometrias menores na saída da moagem, melhorando a recuperação de produto.

Após a confirmação de forma experimental dos resultados ao processo, com esta proposta de melhoria, prosseguimos com o dimensionamento e a busca no mercado de um inversor de frequência que fosse adequado à aplicação, processo este, descrito no tópico seguinte.

#### 4.4 Dimensionamento e seleção do inversor de frequência

Para que fosse possível dimensionar o inversor de frequência para esta aplicação, foi necessário o levantamento de todos os pré-requisitos para compatibilização do inversor com o sistema existente, uma vez que foi adotado como premissa não realizar modificações significativas nas instalações, priorizando a relação custo-benefício da proposta de melhoria.

Dessa forma, a seleção do inversor de frequência adequado foi dividida em duas etapas, sendo uma etapa inicial de mapeamento dos parâmetros em que o inversor deveria atender e posteriormente uma busca no mercado com os principais fornecedores, para entender o que há de melhor nesta área que possa atender a demanda. Estas etapas estão detalhadas nos tópicos seguintes.

#### 4.4.1 Especificação do inversor de frequência

De forma a delimitar a busca pelo inversor que seja adequado à aplicação no acionamento do moinho de bolas, foram traçados todos os parâmetros na forma de pré-requisitos para o fornecimento do equipamento, principalmente para que o mesmo seja compatível com as condições já instaladas no ambiente onde se pretende aplicar.

Seguindo estas premissas e atendendo às necessidades expostas pelos profissionais das equipes de processo, operação e manutenção, foi realizada a especificação do inversor de frequência, e apresentado no Quadro 1 todos os pré-requisitos que deveriam ser seguidos pelos fornecedores para oferta de um produto adequado.

Quadro 1 – Especificação do inversor de frequência

<b>Descrição</b>	<b>Especificação da necessidade</b>
<b>Potência do motor</b>	3200 kW ou ~ 4350 CV
<b>Rotação nominal do motor</b>	893 RPM
<b>Corrente</b>	161 A
<b>Fator de Serviço</b>	1,15
<b>Tensão de alimentação</b>	Operar em 13,8 kV, compatível com o motor
<b>Torque de partida</b>	Atingir 150% do torque nominal do motor
<b>Faixa de operação</b>	-10% à +10% da rotação nominal
<b>Grau de proteção</b>	Mínimo IP41, contra respingos d'água
<b>Regime de trabalho</b>	Contínuo, 24 horas por dia e 365 dias por ano
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Temperatura de trabalho</b>	0 a 40 °C
<b>Ambiente de instalação</b>	Sala elétrica climatizada
<b>Método de controle</b>	Controle vetorial, necessário em detrimento da boa regulagem de velocidade e alto torque de partida, característico da operação de sistemas de moagem e britagem de minério.
<b>Rede de comunicação e protocolos disponíveis</b>	Rede DeviceNet e protocolo HART
<b>Tipo de Comando</b>	Remoto e local via IHM
<b>Vida útil mínima</b>	10 anos

Fonte: Dados da pesquisa.

#### 4.4.2 Busca no mercado e seleção do inversor de frequência

Tendo o inversor de frequência especificado com as necessidades de campo, partimos para a busca no mercado e, como citado anteriormente, foram consultados os fornecedores Schneider, WEG, SEW e Rockwell / Allen-Bradley. Dessa forma, na Figura 24 é apresentado um quadro resumo com os resultados obtidos a partir das consultas com estes fornecedores.

Figura 24 – Resumo das consultas realizadas em mercado para o inversor

Fornecedor	Logotipo	Obtido resposta?	Parecer técnico da consulta	Proposta
WEG Equipamentos Elétricos		Sim	Retornou à solicitação, apresentou proposta técnica e comercial para o fornecimento, inclusive com indicações para instalação e operação.	Proposta WEG M2103231547
SEW Eurodrive Brasil		Sim	Retornou à solicitação, mas justificou a indisponibilidade de inversores deste porte em catálogo e impossibilidade de desenvolvimento no momento.	Não se aplica
Schneider Electric do Brasil		Não	Não retornou à solicitação de cotação enviada, possui produtos semelhantes em catálogo, mas não retornou se consegue atender à especificação da aplicação.	Não se aplica
Rockwell / Allen-Bradley		Não	Não retornou à solicitação de cotação enviada, possui produtos semelhantes em catálogo, mas não retornou se consegue atender à especificação da aplicação.	Não se aplica

Fonte: Dados da pesquisa.

Como é possível visualizar na Figura 24, dos 04 (quatro) fornecedores consultados, 02 (dois) não retornaram à solicitação enviada, sendo eles Schneider e Rockwell, e 02 (dois) responderam à solicitação, WEG e SEW. Entretanto, apenas com a WEG tivemos evolução positiva na apresentação de um inversor de frequência que pudesse atender à necessidade.

O inversor de frequência ofertado pela WEG cumpre todos os pré-requisitos das instalações, detalhados no tópico 4.4.1 deste trabalho. Pertencente à série MVW3000, como pode ser visto na Figura 25, o equipamento é fornecido como um painel completo, composto tanto pelo inversor quanto por um transformador defasador a seco. Este transformador fornecido em conjunto possui função de redução de harmônicos e isolamento dos distúrbios da rede para o inversor.

Figura 25 – Concepção de acionamento ofertada pela WEG

Acionamento Ofertado										
TAG	Corrente (A)	Filtro saída	By-pass de célula	Sobrecarga motor	Modelo / Composição	Dimensões (mm)			Dissipação (KW)	Peso (Kg)
						A	L	P		
INV-01	265	Sim, tipo 1	Não	190%	Inversor MVW3000 265A A0265 13,8KV 72 Pulsos (classe de isolamento 15KV)	2500	10600	1320	140	15000
					Trafo defasador 13,8-36x0,69KV 72 Pulsos (classe de isolamento 15KV)					

Fonte: Acervo técnico da empresa, proposta WEG.

O painel completo é representado pela Figura 26, de forma a ilustrar a forma construtiva do equipamento que foi ofertado pela WEG.

Figura 26 – Painel completo para variação de velocidade WEG MVW3000 A0265

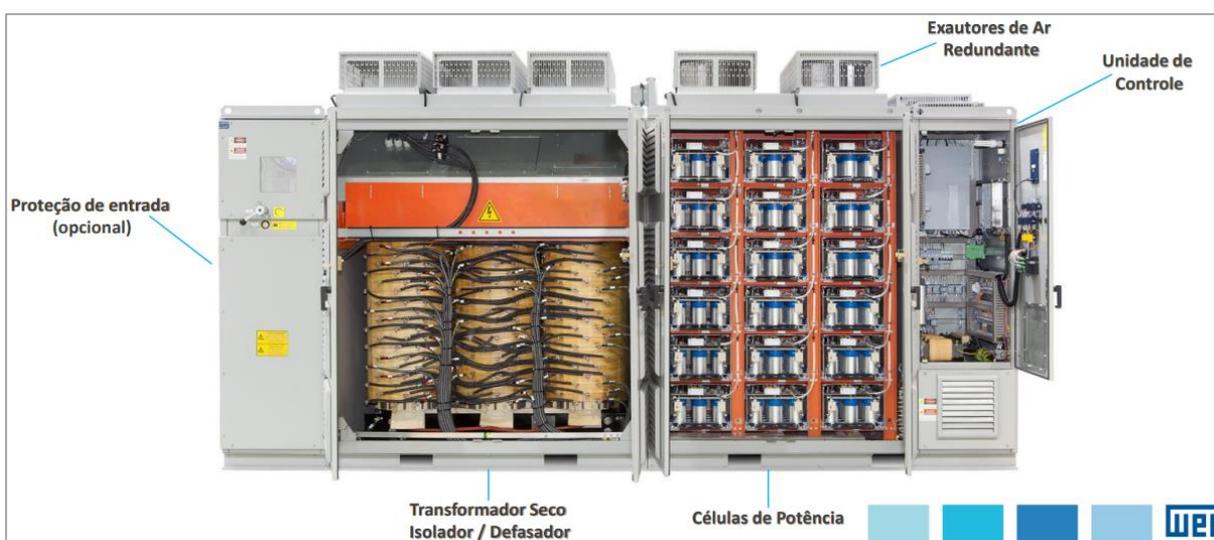


Fonte: Acervo técnico da empresa, proposta WEG.

Conforme detalhado na Figura 27, basicamente a estrutura do painel do inversor pode ser dividida da seguinte forma:

- Proteção de entrada.
- Transformador isolador defasador à seco.
- Inversor de frequência, composto pelas células de potência e unidade de controle.
- Sistema de dissipação de temperatura por exaustão.

Figura 27 – Estrutura do painel para variação de velocidade WEG MVW3000 A0265



Fonte: Acervo técnico da empresa, proposta WEG.

As células de potência deste inversor de frequência ofertado possuem uma característica de alta durabilidade, uma vez que em sua construção, utilizam capacitores de filme plástico com durabilidade estimada acima de 15 anos. Este é um fator que está alinhado com as expectativas desta proposta de melhoria, uma vez que contribui para a redução das necessidades de intervenção no sistema.

Para interatividade do usuário, este modelo ofertado conta com uma IHM touchscreen de 10", com acesso completo em tempo real das informações de controle do motor, com gráficos personalizáveis, da forma como houver necessidade durante a operação, conforme representado pela Figura 28.

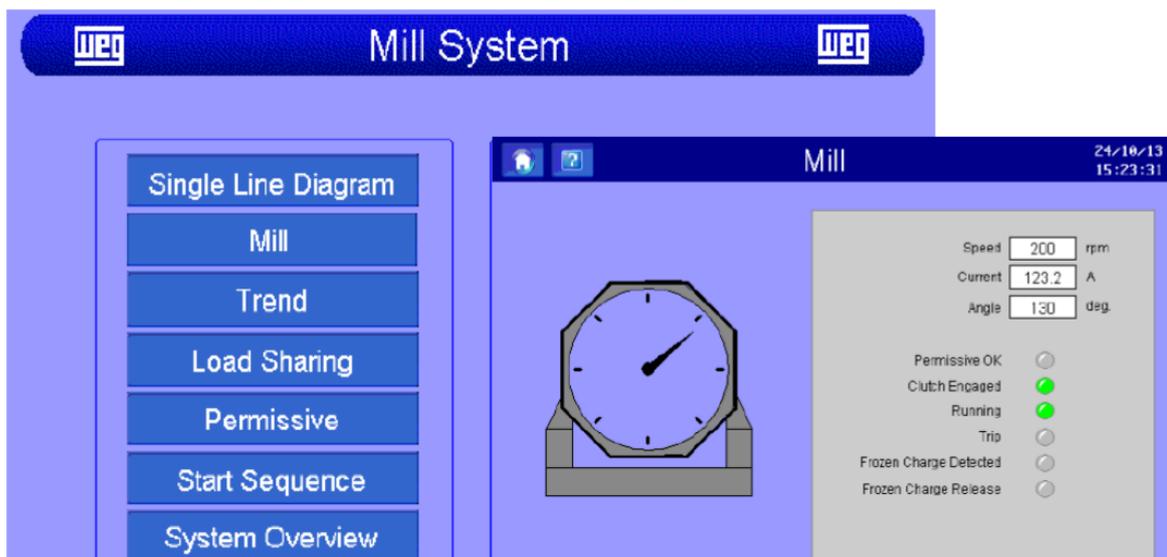
Figura 28 – IHM Touchscreen 10” inclusa no painel do inversor WEG MVW3000 A0265



Fonte: Acervo técnico da empresa, proposta WEG.

Além disso, como essa série de inversores de frequência ofertada pela WEG, trata especificamente de acionamentos de cargas pesadas na mineração, neste equipamento são ofertadas funções de controle exclusivas para moinhos. Por exemplo, partida de carga congelada, quando ocorre a parada do equipamento cheio e com baixa umidade, realização do giro lento, posicionamento e até mesmo divisão de carga, para aplicação em moinhos que possuem duplo acionamento. Na Figura 29, temos a representação da seleção de um ângulo específico para posicionamento de um moinho.

Figura 29 – Posicionamento de um moinho no inversor WEG MVW3000 A0265



Fonte: Acervo técnico da empresa, proposta WEG.

Uma ressalva feita pela WEG e que contribuiu para o trabalho é a respeito da necessidade de intervenção no motor existente, uma vez que o mesmo possui rotor de anéis e, para uso do inversor de frequência, é necessário curto-circuitar os anéis do rotor, assim se comportando de forma semelhante à um motor com rotor de gaiola. Dessa forma, este ponto foi considerado e está listado no escopo de atividades a serem realizadas para implantação do projeto.

A proposta técnica e comercial emitida pela WEG em dezembro de 2022, atende aos pré-requisitos técnicos esperados para a aplicação e apresentou a seguinte distribuição de custos estimados:

- Inversor MVW3000 A0265 – R\$ 2.439.377,00
- IPI (9,75%) – R\$ 237.839,26
- Intervenção no motor existente: R\$ 300.000,00
- **Custo total previsto: R\$ 2.977.216,26**

De forma resumida, foi estabelecido através do Quadro 2, um comparativo entre o tipo de acionamento atualmente instalado em campo com partida direta com reostato líquido e o acionamento com inversor de frequência, proposto pela WEG.

Quadro 2 – Comparativo entre os dois tipos de acionamento

	Acionamento com partida direta com reostato líquido existente	Acionamento com inversor de frequência MVW3000 A0265
<b>Rotação</b>	Fixa	Variável de acordo com a necessidade
<b>Giro lento</b>	Conjunto motor e redutor mecânico	Integrado no inversor
<b>Posicionamento angular</b>	Não existe	Integrado no inversor
<b>Partida de carga congelada</b>	Necessário manobras operacionais de diluição do produto	Configuração de sobre torque para este caso

<b>Impacto na Rede</b>	Médio, o reostato ainda consegue reduzir parte do impacto da partida direta	Baixo por ter partida mais suave até a rotação nominal escolhida
<b>Manutenção</b>	Alta complexidade e frequência, para manter o reostato líquido e sistemas mecânicos	Média complexidade, mas baixa frequência, apenas componentes elétricos e eletrônicos
<b>Vida útil</b>	10 anos, com manutenções gerais à cada 2 anos	Acima de 15 anos
<b>Acesso e Diagnóstico</b>	Apenas em paradas de fábrica	Em tempo real via IHM

Fonte: Próprio autor.

#### 4.5 Cálculo do Payback – Tempo de retorno do investimento

Para mensuramos o tempo de retorno do investimento da aplicação, além do levantamento dos custos envolvidos, foi necessário estimar junto à equipe de processo da empresa um ganho percentual na produção após a flexibilização da moagem com a utilização do inversor de frequência. Baseado nos testes realizados com a variação da velocidade, com os ganhos obtidos em redução da granulometria, foi obtido como premissa que a partir da nova condição, é possível aumentar a carga de alimentação no moinho em pelo menos 2% do que é utilizado hoje de 330 t/h.

Para adoção de valores de referência de minério, foi utilizada a cotação do minério de ferro, por ser um tipo de minério semelhante ao de trabalho da empresa em questão e possuir cotações abertas para consulta diariamente.

O cálculo do tempo de retorno ou “payback” (em dias) foi realizado adotando a Equação III, onde se divide o valor total a ser investido em reais ( $V_i$ ) pelo valor do ganho de produção em reais ( $V_{gp}$ ) com a implantação do projeto.

$$\text{Payback (em dias)} = \frac{V_i}{V_{gp}} \quad (\text{III})$$

O valor do investimento foi adotado de acordo com o estabelecido na proposta da WEG. Já o valor estimado de ganho em vendas de produto foi calculado utilizando as seguintes premissas:

- Adotando a taxa de alimentação do moinho atual de 330 t/h (toneladas por hora) e o aumento na produção estimado em 2%, o ganho ( $G$ ) estimado foi de 16,5 t/h (toneladas por hora);
- Adotando que o teor médio ( $Tm$ ) do minério de ferro no Brasil é de 46,2%, conforme Joaquim e Jesus (2018);
- Adotando que a recuperação de produto média ( $Rm$ ) do minério de ferro gira em torno de 97% do seu teor;
- Considerando produção contínua em 95% do tempo, então adotamos este valor para a produtividade ( $P$ );
- Adotando o valor de cotação por tonelada do minério de ferro de US\$ 117,39 em 28 de abril de 2023, conforme cotação do Index Mundi, por Thomson Reuters Datastream (2023);
- Adotando o valor do dólar americano R\$ 4,98 em 28 de abril de 2023, conforme Rates (2023), chegamos ao valor ( $Cm$ ) em reais da tonelada do minério de ferro em R\$ 584,60.

Seguindo as premissas, o valor do ganho de produção por dia foi calculado através da equação IV:

$$V_{gp} = G \cdot P \cdot Tm \cdot Rm \cdot Cm \cdot 24 \quad (IV)$$

$$V_{gp} = 6,6 \cdot 0,95 \cdot 0,462 \cdot 0,97 \cdot 584,60 \cdot 24$$

$$V_{gp} = R\$ 39.423,15$$

Visto que o valor a ser investido ( $Vi$ ), obtido pela cotação realizada de aquisição e instalação do inversor com a WEG, foi de **R\$ 2.977.216,26**, e que alcançamos o valor do ganho de produção ( $V_{gp}$ ) por dia de **R\$ 39.423,15**, podemos então substituir na equação III e calcular efetivamente o payback.

$$Payback = \frac{Vi}{V_{gp}} = \frac{2977216,26}{39423,15} \cong 75,5 \text{ dias}$$

Dessa forma, afirmamos que o investimento teria seu retorno financeiro em aproximadamente **76 dias**, um tempo relativamente baixo, visto o valor financeiro envolvido.

#### **4.6 Definição do escopo de modificações do acionamento atual**

Após a avaliação dos ganhos operacionais com a implantação da melhoria e o baixo tempo de retorno do valor investido, caso a empresa manifeste interesse em seguir com a implantação, o escopo de trabalho será composto pelas seguintes atividades:

1. Aquisição do conjunto completo do inversor de frequência WEG MVW3000.
2. Instalação do inversor de frequência na sala elétrica.
3. Instalação de toda a infraestrutura de eletrodutos e cabos para comunicação do inversor ao motor do moinho em campo.
4. Realizar intervenção no motor existente, curto-circuitar os anéis do rotor, deixando-o com a característica de um rotor de gaiola.
5. Desmontagem do reostato líquido.
6. Desmontagem do redutor de giro lento (opcional).
7. Configurar os parâmetros de operação no inversor de frequência, de acordo com o desejado.
8. Realizar testes de campo e comissionamento do novo conjunto de acionamento do moinho já com o inversor de frequência.

Realizando a execução destas atividades, é possível que a unidade operacional desfrute da flexibilização do sistema de moagem, através do uso do inversor de frequência, almejando melhores resultados de em eficiência e capacidade de produção, além disso, gerando uma condição mais propícia à implantação de novas lógicas de controle no futuro. Lembrando que a implantação da melhoria pode ser aliada com oportunidades de parada de fábrica para manutenções, seja em paradas rotineiras ou até mesmo uma grande parada de manutenção geral na planta, não gerando perdas de produção para exclusivamente implantação do novo projeto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que o estudo concebido teve como intuito verificar a viabilidade técnica e comercial da flexibilização de um sistema de moagem de minério, através da utilização dos avanços tecnológicos dos inversores de frequência, é possível afirmar que os objetivos propostos foram alcançados em sua totalidade.

Em primeiro lugar, sob o olhar de aplicação técnica da proposta, foi possível evidenciar a sua viabilidade através os testes realizados, uma vez retratando que a possibilidade da variação de velocidade no moinho pode acarretar ganhos na capacidade e eficiência de moagem, como consequência melhorando o aproveitamento do minério que é processado na unidade operacional estudada.

Salienta-se ainda que, ao atribuir a condição de flexibilidade de velocidade no moinho de bolas, este equipamento se torna apto a receber condições de controle de processo de forma automatizada, que pode ser ajustado em função da identificação das variações do minério no início do seu processo de extração. Condição esta que estaria operando na melhor condição possível de moagem com o consumo de energia ideal.

Paralelamente, sob o olhar de custos da proposta de melhoria, a sua viabilidade financeira foi comprovada através da simulação do tempo de recuperação do valor investido, onde os ganhos estimados em resultado de produção podem superar o investimento em pouco menos de 03 (três) meses. Mesmo que o valor envolvido seja relativamente alto, o resultado de recuperação é bastante satisfatório, tornando a aplicação ainda mais atrativa à organização.

Ademais, como oportunidade de explorações futuras, pode ser verificado a abrangência deste tema em demais organizações, tendo em vista que, apesar das particularidades de cada mineração, mesmo alterando os tipos de processo e o próprio minério beneficiado, existem muitas semelhanças entre seus equipamentos. Portanto, é possível que os ganhos vistos no sistema de moagem estudado, sejam vislumbrados em outros locais de aplicação ou até mesmo outros sistemas que dependem da velocidade de rotação para entrega de uma determinada granulometria.

## 6 REFERÊNCIAS

CASTRO, P. T.; NALINI, H. A.; LIMA, H. M. **Understanding mining around the Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Ecológico, 2011.

CERQUEIRA, C. S. **ResearchGate**, 15 nov. 2022. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-MIT-O-principio-de-funcionamento-do-MIT-esta-ilustrado-no\\_fig1\\_272364115](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-MIT-O-principio-de-funcionamento-do-MIT-esta-ilustrado-no_fig1_272364115)>.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios Volume 1 - Bombeamento de polpa e classificação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

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

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M. D.; LUZ, A. B. D. **Cominuição**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B. D.; ALMEIDA, S. L. M. D. **Britagem e Moagem**, Rio de Janeiro, 2010.

FITZGERALD; KINGSLEY. **MÁQUINAS ELÉTRICAS**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2014.

FRANCHI, C. M. **ACIONAMENTOS ELÉTRICOS**. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2008.  
FRANCHI, C. M. **Inversores de Frequência - Teoria e Aplicações**. São Paulo: Érica Ltda., 2013.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: ATLAS S.A., 2002.

GUEDES, M. V. Máquinas Eléctricas - Resenha Histórica. In: GUEDES, M. V. **Máquinas Eléctricas**. [S.l.]: [s.n.], 1995. Cap. 1, p. 10-10.

INVERSORES, W. Inversores. **WEG**, 19 nov. 2022. Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/SV/pt/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/OEMs-e-Uso-Geral/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/p/MKT\\_WDC\\_GLOBAL\\_VARIABLE\\_SPEED\\_DRIVE\\_CFW500](https://www.weg.net/catalog/weg/SV/pt/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/OEMs-e-Uso-Geral/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/p/MKT_WDC_GLOBAL_VARIABLE_SPEED_DRIVE_CFW500)>. Acesso em: 05 dez. 2022.

JANUÁRIO, M. Evolução subterrânea. **Revista Mercado & Tecnologia**, 01 ago. 2019. Disponível em: <<https://revistamt.com.br/Materias/Exibir/evolucao-subterranea2>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

JESUS, C. A. G. D.; JOAQUIM, L. G. Sumário Brasileiro Mineral. **GOV.BR**, 2018. Disponível em: <[https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro\\_sm\\_2018](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018)>. Acesso em: 25 abr. 2023.

JOSÉ ROBERTO KASSAI, A. D. S. A. A. N. S. K. **Retorno de Investimento: Abordagem Matemática e Contábil do Lucro Empresarial**. São Paulo: Atlas, 2000.

JÚNIOR, C. Lavra a céu aberto: conheça esse método e 10 incríveis minas pelo mundo! **CRISTAL**, 22 dez. 2020. Disponível em: <<https://cristaljr.com/lavra-a-ceu-aberto-conheca-esse-metodo-e-10-incriveis-minas-pelo-mundo/>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **TRATAMENTO DE MINÉRIOS 5ª Edição**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: ATLAS S.A., 2003.

NETZSCH. Netzsch Proven Excellence. **Netzsch Proven Excellence**, 27 nov. 2022. Disponível em: <<https://grinding.netzsch.com/pt-BR/produtos-and-solucoes/moagem-a-seco/taurus-moinho-de-bolas>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

PARAPARI, P. S.; PARIAN, M.; ROSENKRANZ, J. Breakage process of mineral processing comminution machines—An approach to liberation. **Advanced Powder Technology**, v. 31, p. 3669–3685, 2020.

PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

RATES, E. Exchange Rates. **Exchange Rates**, 2023. Disponível em: <<https://pt.exchange-rates.org/history/BRL/USD/T>>. Acesso em: 01 jun. 2023.

RICHARDSON, J. M.; SCHWARZ, S. **Modeling and simulation of mineral processing circuits using JKSimMet and JKSimFloat**, Indooroopilly, n. QLD Australia, fev. 2013.

THOMSON REUTERS DATASTREAM, W. B. INDEX MUNDI. **INDEX MUNDI**, 2023. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=min%C3%A9rio-de-ferro&meses=120>>. Acesso em: 18 maio 2023.

VALE. Entenda como funciona o processo de pelotização em nossas usinas. **Vale**, 29 dez. 2014. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/entenda-funciona-processo-pelotizacao-usinas.aspx>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

WEG, 2023. Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/RS/en/Electric-Motors/Medium-High-Voltage-Induction-Motors/Wound-Rotor-Induction-Motor/Wound-Rotor-Induction-Motors---Master-Line/p/MKT\\_WEN\\_MLINE\\_WRIM](https://www.weg.net/catalog/weg/RS/en/Electric-Motors/Medium-High-Voltage-Induction-Motors/Wound-Rotor-Induction-Motor/Wound-Rotor-Induction-Motors---Master-Line/p/MKT_WEN_MLINE_WRIM)>. Acesso em: 15 jan. 2023.

WEG, C. D. T. **WEG - Comando e Proteção - Módulo 1**. Jaraguá do Sul: WEG, 2011.



---

Emitido em 06/07/2023

**CÓPIA DO TRABALHO Nº 120/2023 - DELMAX (11.57.05)**

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

*(Assinado digitalmente em 06/07/2023 11:19 )*

ADMARCO VIEIRA DA COSTA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DELMAX (11.57.05)  
Matrícula: ###738#0

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **120**, ano: **2023**, tipo:  
**CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: **06/07/2023** e o código de verificação: **e54fbd8de4**