

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica Análise e Modelagem de Sistemas

# O MOTOR DE INDUÇÃO COMO ESTIMADOR DE CONJUGADO PARA ANÁLISE DA CARGA EM UM MOINHO DE BOLAS

Priscila Esteves 18/02/2016

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica Análise e Modelagem de Sistemas Av. Amazonas 7675 – Nova Gameleira Belo Horizonte - MG - Brasil



Priscila Esteves

# O MOTOR DE INDUÇÃO COMO ESTIMADOR DE CONJUGADO PARA ANÁLISE DA CARGA EM UM MOINHO DE BOLAS

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em ampla associação com a Universidade Federal de São João Del Rey, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Stopa Co-orientador: Roberto Galéry

Belo Horizonte Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2016

Esteves, Priscila E79m O motor de indução como estimador de conjugado para análise da carga em um moinho de bolas. / Priscila Esteves. - - Belo Horizonte, 2016. xi, 70 f. : il. Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2016. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Martins Stopa Coorientador: Prof. Dr. Roberto Galéry Bibliografia 1. Moinhos e Trabalhos em Moinhos. 2. Motores Elétricos. 3.Beneficiamente de Minério. I. Stopa, Marcelo Martins. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título CDD 621.38224 Elaboração da ficha catalográfica pela Biblioteca-Campus II / CEFET-MG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E POS-GIRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENCEINHARIA ELÉTRICA

**Priscila Maria Esteves** 

#### "O Motor de Indução como Estimador de Conjugado para Análise de Carga em Um Moinho de Bolas"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 18 de Fevereiro de 2016 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

your parts stops Prof. Dr. Marcelo Martins Stopa (Orientador) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Roberto Galery (Coorientador)

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filbo Universidade Federal de Minas Gerais

Car Ukalebaranini

Prof<sup>a</sup>, Dr<sup>a</sup>, Lane Maria Rabelo Baccarini Universidade Federal de São João del-Rei

soon Crimonos Bodic

Prof. Dr. Giovani Guimarães Rodrígues Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Ao meu filho Mateus, meus pais, Lilian e Eduardo, e ao meu companheiro Rafael.

### Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao meu filho Mateus, minha maior motivação na reta final desse trabalho.

À minha mãe Lilian, meu grande exemplo de vida, com seus incansáveis incentivos e amor infinito.

Ao meu pai Eduardo, pelo amor e pelas infindáveis conversas e ideias sobre engenharia.

Ao meu companheiro Rafael, por todo carinho, companheirismo, incentivo e apoio incondicional.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Marcelo Stopa, pelo apoio, compreensão e por ser meu salvador em todas as dificuldades encontradas ao longo do caminho.

Ao meu co-orientador professor Roberto Galéry, pela disponibilização do laboratório, equipamento e pessoal para a execução dos testes, e também pelo enorme incentivo ao trabalho.

Ao professor Giovani Guimarães, pela disponibilidade e conhecimentos compartilhados.

Ao professor Braz Filho, pela disponibilização da estrutura para execução de testes e pela ideia deste trabalho.

Á aluna de iniciação científica Amanda, pela disponibilidade e enorme ajuda prestada.

Ao Alberto do Laboratório de Tratamento de Minérios, por toda a simpatia e ajuda durante os testes.

Às agências financiadoras Capes e Fapemig, pela bolsa de estudos e recursos concedidos.

### Resumo

O moinho de bolas é um equipamento amplamente utilizado na indústria de beneficiamento mineral e que apresenta, entre outras características, um elevado consumo energético e baixa eficiência. Essas características são acentuadas quando o equipamento opera fora das condições otimizadas de velocidade, enchimento, porcentagem de sólidos e carga de partículas. Para a operação otimizada do equipamento é necessário o monitoramento em tempo real dessas variáveis, permitindo o melhor controle da reposição de bolas e/ou da alimentação do moinho. No entanto, não é possível a instalação de sensores dentro do moinho para a medição direta das variáveis relacionadas à carga do equipamento, sendo necessário o desenvolvimento de métodos indiretos. O presente trabalho trata da aplicação de um método baseado nas variáveis do motor de acionamento, com vista ao monitoramento da carga no moinho de bolas. A partir das correntes, tensões e velocidade do motor, variáveis comumente monitoradas no acionamento de moinhos de bolas, é possível obter o sinal estimado do conjugado de carga. Resultados experimentais obtidos em dois moinhos de laboratório e apresentados neste trabalho, mostram que a análise espectral desse sinal pode ser correlacionada à variáveis de operação relacionadas à carga. Dessa forma, confirma-se que esse sinal apresenta alto potencial para o desenvolvimento de uma ferramenta automática de monitoramento da carga em moinhos de bolas. O monitoramento da carga pode ser utilizado para o controle da alimentação e reposição de bolas no moinho, o que pode levar à redução do consumo energético do equipamento, redução do desgaste do revestimento e à melhoria das características do produto obtido.

### Abstract

The ball mill equipment is widely used in the mining industry and has, inherent to its principle of operation, high-energy consumption and low efficiency. These characteristics are accentuated when the mill operates outside the ideal conditions of velocity and loading. For optimal operation, real time monitoring of these variables is necessary and can be used for best ball reposition and mill feed control. However, direct measurement of these variables is not possible, so the measurement is taken by indirect means. This work applies a method based in the electric motor drive for monitoring the mill load. Based on measurements of motor voltages, currents and velocity, signals that are usually monitored in ball mills, it is possible to obtain the estimated torque signal. The experimental results showed that the obtained signal has an excellent correlation with ball mill charge parameters. Monitoring of these variables can be used for control purpose, with potential for reducing electrical power consumption, reducing of shutdown maintenances and for obtaining a product with improved characteristics.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Mecanismos de Fratura: a) Impacto b) Compressão c) Abrasão ou Cisalhamento. (Oli	veira, 2012)
Figura 2.2 - Moinho tubular com acionamento por coroa e pinhão (Oliveira, 2012)	7 9
Figura 2.3 - Bolas expulsas de um moinho de 4.000kW (Mazzinghy, 2009)	
Figura 2.4 - Forcas agindo sobre uma bola em um moinho (Beraldo, 1987)	
Figura 2.5 - Influência da velocidade angular no movimento da carga em um moinho de bola	as (Beraldo.
1987)	
Figura 2.6 - Potência medida em um moinho em função da carga de bolas e da fração da velocid	ade crítica -
D=0,6m, d=27mm (Austin, Klimpel, & Luckie, 1984)	14
Figura 2.7 - Moagem em Regime de Catarata (Beraldo, 1987)	18
Figura 2.8 - Moagem em Regime de Cascata (Beraldo, 1987)	19
Figura 2.9 - Comportamento da Carga de Bolas (Beraldo, 1987)	20
Figura 2.10 – Simulação do movimento da carga moedora para moinhos de diferentes diâmetro	s (Carvalho
& Tavares, 2012)	22
Figura 3.1 - Métodos de Monitoramento da Carga (Tano, 2005)	26
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do LTSA. Adaptado de Stopa (2011)	
Figura 4.2 - Modelo em tempo contínuo do observador de velocidade do tipo Luenberguer para	entrada em
posição angular. Adaptado de (Stopa M. M., 2011)	
Figura 4.3 - Modelo em tempo contínuo do observador de velocidade do tipo Luenberguer para	entrada em
velocidade (Stopa & Cardoso Filho, 2008)	40
Figura 4.4 – Resultados da realimentação de estados para o rastreamento da velocidade e co	onjugado de
carga. Adaptado de (Stopa & Cardoso Filho, 2008)	41
Figura 4.5 - Tranformação de Variáveis Trifásicas para Vetores Espaciais (Adaptado de Matlab,	1994-2014)
	44
Figura 4.6- Desvios de amplitude e fase introduzidos pela substituição do integrador por um	filtro passa
baixas de primeira ordem (Shin, Hyun, Cho, & Chloe, 2000)	45
Figura 5.1 – Esquemático do sistema utilizado nos testes com moinhos de laboratório	49
Figura 5.2 - Montagem Experimental do Moinho I com diâmetro de 20cm	51
Figura 5.3- Espectro de frequências para o conjugado de carga e vibração do Moinho I. Carga de	bolas = 4kg;
Carga de minério = 1kg	53
Figura 5.4 - – FFT típica para os sinais de conjugado de carga (a) e vibração (b) para o Moinho	ı I. Carga de
bolas = 4kg; Carga de minério = 1kg	53

Figura 5.5 – Variação da amplitude da frequência de pico para diferentes velocidades do motor e cargas do
moinho
Figura 5.6 - Montagem Experimental do Moinho II com diâmetro de 46cm
Figura 5.7 - Espectro de frequências para o conjugado de carga (a) e para a vibração (b) do Moinho II
Velocidade do motor = 10Hz; Carga de bolas = 14kg; Carga de minério = 5kg
Figura 5.8 - FFT típica para os sinais de conjugado de carga e vibração do Moinho II. Carga de bolas = 14kg
Carga de minério = 5kg58
Figura 5.9 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do
motor e enchimentos do moinho60
Figura 5.10 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do
motor e cargas de partículas no moinho61
Figura 5.11 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do
motor e porcentagem de sólidos no moinho62

### Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Parâmetros físicos do Moinho I	51
Tabela 5.2 – Cargas das séries de testes realizadas no Moinho I	52
Tabela 5.3 - Relação entre velocidade do motor do moinho e componente espectral característica	54
Tabela 5.4 - Parâmetros físicos do Moinho II	56
Tabela 5.5 - Cargas das séries de testes realizadas no Moinho II	57
Tabela 5.6 - Localização das componentes de pico para diversas velocidades do motor	59

### Lista de Símbolos

- a Polo do filtro
- b Coeficiente de atrito viscoso
- b<sub>o</sub> Ganho derivativo
- d Diâmetro médio das bolas
- $D_m \,\,$  Diâmetro do moinho
- eb Energia para elevar uma bola
- fc Carga de partículas
- h Altura
- H<sub>c</sub> Distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso
- J Momento de inércia do acionamento
- JL Momento de inércia da carga
- J<sub>M</sub> Momento de inércia do motor
- k instantes de amostragem
- K Constante empírica do moinho
- ko Ganho proporcional
- kio Ganho integral
- L Comprimento do moinho
- M Massa do material no moinho
- mc Massa total de partículas
- m<sub>p</sub> Potência líquida de moagem
- $n_b$  Quantidade de bolas
- Nc Velocidade crítica
- Rs Resistência estatórica do motor
- s Porcentagem de sólidos
- t Tempo
- Te Torque eletromagnético
- $T_{\rm L} \ \ Conjugado \ de \ carga$
- $T_s$  Intervalo de tempo entre as amostras

- u Sinal de entrada
- U Preenchimento intersticial
- V Volume da carga ou Enchimento
- Va Volume de água adicionado
- $v_e \quad \text{Força contraeletromotriz do motor}$
- $V_m \ \ Volume \ do \ moinho$
- wr Velocidade angular
- $\widehat{\lambda_{sl}}$  Enlace de fluxo obtido pelo filtro passa baixas
- $\rho_b$  Densidade da bola
- ρ<sub>c</sub> Densidade aparente das partículas
- $\varphi_c$  Fração da velocidade crítica
- $\omega_m$  Velocidade de rotação do moinho

# Sumário

=

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Contexto e Relevância	3
1.2. Solução Apresentada	
1.3. Objetivos	4
1.4. Estrutura do Texto	4
Capítulo 2 – Características Construtivas e de Operação do Moinho de Bolas	6
2.1. Cominuição	6
2.2. Aspectos Construtivos de um Moinho de Bolas	9
2.3. Análise Simplificada da Dinâmica	12
2.4. Movimentação da Carga em um Moinho de Bolas	17
2.4.1. Catarata	
2.4.2. Cascata	19
2.4.3. Influência dos Parâmetros de Operação no Movimento da Carga	20
2.4.4. Otimização do Comportamento e Movimentação da Carga	21
2.5. Conclusão	23
Capítulo 3 – Técnicas de Monitoramento da Carga em um Moinho de Bolas	25
3.1. Variáveis Elétricas	27
3.2. Análise Vibracional	29
3.3. Conclusão	33
Capítulo 4 – Monitoramento do Moinho de Bolas Usando Variáveis do Mot	or de
Acionamento	34
4.1. Princípio Básico do L.T.S.A. (Load Torque Signature Analysis)	
4.1.1. Estimador do Conjugado de Carga	39
4.1.2. Análise Espectral	46
4.2. Conclusão	47
Capítulo 5 – Aplicação do L.T.S.A. no Monitoramento da Carga em Moinhos de	Bolas
	48
5.1. Resultados Experimentais	51

5.1.1. Moinho I	51
5.1.2. Moinho II	56
5.2. Conclusão	62
Capítulo 6 - Conclusões e Proposta de Continuação	
6.1. Proposta de Continuação	65
6.2. Publicações decorrentes do trabalho	66

# Capítulo 1 Introdução

O moinho de bolas é um equipamento amplamente utilizado na indústria mineral, de cimento e em plantas termelétricas. Eles são utilizados em processos que requerem a redução da granulometria de um determinado material, num processo denominado cominuição. As características construtivas e os princípios do processo podem variar bastante dependendo da aplicação do equipamento, mas basicamente o moinho de bolas consiste de um cilindro rotativo dentro do qual encontra-se o material a ser moído e bolas de aço. Um motor elétrico é utilizado para girar o conjunto, transferindo energia para as bolas e para o material, que tem sua granulometria reduzida principalmente por impacto, abrasão e atrito. Apesar dos princípios de operação serem rudimentares o moinho de bolas é um dos equipamentos mais utilizados para moagem, especialmente no setor de tratamento de minérios.

O processo de redução da granulometria de minérios utilizando moagem apresenta elevado consumo energético. Estudos apontam que o processo de moagem de minérios representa de 3% a 4% do total de energia consumida no planeta (Melero et al., 2014). Entre os equipamentos usados nesse processo, o moinho de bolas é apontado como o tipo de moinho mais utilizado no setor de tratamento de minérios. Ele é responsável por 2,8% a 3% do consumo energético mundial. Esse alto consumo energético é justificado pelas grandes capacidades com que esses moinhos são construídos e principalmente pelo fato de o processo de cominuição ser altamente ineficiente. Devido à ineficiência do processo, muitos pesquisadores concentram esforços nesta área, pois, por menor que seja o aumento de eficiência obtido, pode-se diminuir em muito o consumo energético do processo ou mesmo aumentar a produtividade.

Um dos caminhos para o aumento da eficiência dos moinhos de bolas é o desenvolvimento de ferramentas voltadas ao monitoramento da carga em seu interior. A quantidade de bolas, assim o preenchimento intersticial, que é a fração do espaço vazio entre bolas preenchido pelo material a ser processado, são fatores determinantes nas

características do produto a ser obtido. Além disso, também influenciam as características construtivas do equipamento e sua velocidade de operação. A movimentação da carga determina quais mecanismos de fratura serão determinantes: impacto, abrasão ou atrito, o que afeta diretamente a distribuição granulométrica e os graus de liberação do produto obtido. No entanto, é essencialmente difícil o monitoramento da carga em moinhos de bola devido à impossibilidade da instalação de sensores dentro do moinho e à grande complexidade de um modelo matemático do processo.

Com isso, o desenvolvimento de métodos indiretos de monitoramento em tempo real da carga têm ganhado grande ênfase nos últimos tempos, pois possibilitam ganhos de produtividade e eficiência energética num equipamento que possui elevados custos de operação. O monitoramento da pressão dos mancais de sustentação, do ruído emitido pelo moinho ou ainda da vibração do equipamento, são alguns exemplos de técnicas aplicadas no monitoramento da carga em moinhos de bolas (Tano, 2005). Estudos recentes apresentam o uso de variáveis elétricas do motor como uma fonte de informações sobre o comportamento da carga em um moinho (Pontt J., 2010) e (Melero et al., 2014).

Métodos de monitoração da carga a partir de variáveis elétricas do motor de acionamento têm sido empregados com sucesso em aplicações envolvendo cargas rigidamente acopladas ao eixo do motor, como bombas centrífugas e máquinas de trefilar (Stopa & Cardoso Filho, 2008) (Stopa M. M., 2011). Dentre as vantagens apresentadas, destaca-se a ótima relação custo/benefício do método, uma vez que não depende da instalação de sensores diretamente na carga mecânica. Essa característica se apresenta especialmente interessante no caso de moinhos de bola, uma vez que um dos principais impedimentos ao monitoramento da carga neste tipo de moinhos é a dificuldade de se instalar os sensores.

Sendo o motor considerado um transdutor natural da carga acoplada ao seu eixo (Stopa M. M., 2011), o presente trabalho utiliza variáveis do motor de acionamento para a monitoração da carga em moinhos de bolas. É utilizada a técnica denominda L.T.S.A., proposta por (Stopa M. M., 2011) para o monitoramento de cargas rigidamente acopladas ao motor de indução, como é o caso do moinho de bolas.

#### 1.1. Contexto e Relevância

O cenário econômico de constante instabilidade no preço dos minérios vêm desafiando a indústria mineral nos últimos anos. Diante dessa realidade, a otimização de processos com foco na redução de custos e/ou aumento da produtividade vem se tornando uma necessidade constante para as empresas do setor. Numa perspectiva em que os recursos minerais disponíveis no planeta estão cada vez mais escassos, com menores teores de concentração e altas variações de moabilidade, a otimização dos processos de moagem se mostra extremamente necessária no setor mineral.

Sabe-se que a eficácia dos processos de moagem é determinante nas características dos produtos obtidos no processo de beneficiamento. Além disso, pela sua localização no processo, a parada de um moinho pode afetar a produção de toda uma planta de beneficiamento. Soma-se à esses fatores o elevado consumo energético dos moinhos, que são responsáveis por aproximadamente 70% do consumo energético de uma planta de beneficiamento mineral (Melero et al., 2014).

Verifica-se, então, que a otimização do moinho de bolas pode elevar a disponibilidade, a produtividade e possibilitar a redução nos custos de manutenção e consumo energético de uma planta, com possibilidade de ganhos financeiros. Dessa forma, justifica-se o estudo de métodos que se disponham à otimização de moinhos de bolas, que são os equipamentos de moagem mais utilizados no beneficiamento de minérios.

#### 1.2. Solução Apresentada

O estudo apresenta uma nova possibilidade para o monitoramento da carga em moinhos de bolas, empregando uma ferramenta baseada nas variáveis elétricas do motor de acionamento. A ferramenta é denominada LTSA (*Load Torque Signature Analysis*) e tem sido empregada com sucesso no monitoramento de cargas rigidamente acopladas ao eixo do motor, como bombas centrífugas e máquinas de trefilar (Stopa M. M., 2011) (Stopa, Filho, & Lage, 2010) (Stopa & Cardoso Filho, 2008).

Através da medição das tensões, correntes e posição angular do rotor, o conjugado da carga é estimado, com base no modelo físico e matemático do motor, além do emprego

de técnicas de realimentação de estados. Utilizando taxas de amostragem suficientemente grandes, a análise pode ser realizada no domínio da frequência. Essa análise se mostra essencialmente interessante para cargas oscilatórias, como é o caso do moinho de bolas. Espera-se que a análise do conjugado de carga estimado contenha informações úteis sobre a movimentação da carga no moinho de bolas, que se manifestam em componentes espectrais características. Essas informações podem ser utilizadas para o monitoramento de condições da carga do moinho, que, por sua vez, podem ser usadas para fins de otimização e/ou controle do processo de moagem.

#### 1.3. Objetivos

O objetivo principal do trabalho é a aplicação da técnica L.T.S.A. para o monitoramento da carga em moinhos de bolas. A técnica é proposta por (Stopa M. M., 2011) para o monitoramento de cargas rotativas rigidamente acopladas ao motor de indução e baseia-se na análise espectral do sinal de conjugado de carga estimado a partir das correntes, tensões e posição angular do motor.

A proposta utiliza variáveis do motor elétrico de acionamento para estimativa do conjugado de carga do moinho, que contém informações sobre o comportamento da carga em seu interior. Através da análise e tratamento adequado do sinal obtido, indicadores sobre a carga podem ser obtidos, com vista à otimização e/ou controle do processo de moagem utilizando moinhos de bolas.

A validação da aplicação é realizada através da realização de testes experimentais em um moinho de bolas de laboratório, sob condições controladas.

#### 1.4. Estrutura do Texto

O texto é estruturado em seis capítulos, sendo este o introdutório. No Capítulo 2 são abordadas as principais características construtivas e operacionais de um moinho de bolas, com o intuito de apresentar o funcionamento simplificado e a estrutura básica do equipamento. O Capítulo 3 descreve as técnicas utilizadas no controle e monitoramento da carga nesses equipamentos. São abordadas as soluções já existentes, assim como os resultados e limitações de cada técnica.

O Capítulo 4 apresenta a ferramenta para monitoramento da carga utilizada nesse trabalho. São abordadas a modelagem matemática do método e os aspectos práticos da implementação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos na aplicação do LTSA para fins de monitoramento de parâmetros da carga em dois moinhos de laboratório.

O Capítulo 6 apresenta, por fim, as conclusões do trabalho.

#### **Capítulo 2**

### Características Construtivas e de Operação do Moinho de Bolas

O moinho de bolas consiste, basicamente, em um cilindro rotativo com bolas de aço e minério em seu interior, onde a cominuição se dá por compressão, impacto e abrasão do material. O equipamento apresenta alto consumo energético e baixa eficiência. Por isso, ferramentas que se destinam à otimização da sua operação têm ganhado ênfase nos estudos sobre o assunto. Para o desenvolvimento de ferramentas de otimização, faz-se necessário a compreensão prévia das características construtivas e operacionais do equipamento.

Ao longo do presente capítulo são abordadas as principais características físicas e construtivas do moinho de bolas que influenciam no comportamento da carga e, consequentemente, na eficiência, robustez e produtividade do equipamento. A seção 2.1 descreve o processo de cominuição que o material sofre dentro de um moinho de bolas. Na seção 2.2 é realizada uma breve descrição dos principais aspectos físicos e princípio de funcionamento do equipamento. A seção 2.3 aborda a descrição e o equacionamento das principais variáveis de operação. A seção 2.4 apresenta as características do movimento da carga, assim como os principais aspectos que influenciam nessa movimentação. Por fim, a seção 2.5 apresenta as conclusões do capítulo.

#### 2.1. Cominuição

A cominuição de sólidos é o processo pelo qual o material sofre redução de sua granulometria, sendo esta uma característica de materiais sólidos em relação ao seu tamanho. No caso do tratamento de minérios, o processo de cominuição é utilizado para assegurar a liberação física dos constituintes de valor antes das separações físicas e químicas (Mazzinghy, 2009). O grau de cominuição obtido também influencia diretamente na eficiência de alguns processos de beneficiamento subsequentes à 6 cominuição, como, por exemplo, a flotação e os métodos gravimétricos de concentração. Desse fato, conclui-se que a eficiência do processo de cominuição é determinante na qualidade dos produtos obtidos no tratamento de minérios.

De acordo com Mazzinghy (2009), são três os principais objetivos da cominuição em tratamento de minérios: produção de partículas com um determinado tamanho ou forma; liberação dos minerais úteis do material, para posterior concentração; o aumento da área superficial específica dos materiais. Esses objetivos são obtidos através do devido fraturamento ou quebra do material para redução de granulometria.

Como definido em Beraldo (1987), a redução da granulometria do material ocorre, principalmente, por meio dos seguintes mecanismos de fratura: impacto, compressão e abrasão (ou cisalhamento), conforme pode ser visto na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Mecanismos de Fratura: a) Impacto b) Compressão c) Abrasão ou Cisalhamento. (Oliveira, 2012)

O impacto ocorre quando a força é aplicada em pequeno intervalo de tempo e em intensidade muito superior à resistência da partícula. A distribuição granulométrica resultante é de partículas finas. Trata-se do mecanismo predominante em britadores de impacto e nas zonas de queda das bolas em um moinho.

Na compressão, a força é aplicada de forma lenta, sendo apenas pouco superior à resistência da partícula. O esforço é aliviado com o aparecimento da fratura, resultando em poucos fragmentos de diâmetro grande. Ocorre em britadores de mandíbula, cônicos e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre dois ou mais corpos moedores ou entre partículas maiores.

Na abrasão ou cisalhamento ocorre a concentração local dos esforços, que não são suficientes para provocar a quebra de toda a partícula, mas provocam o aparecimento de pequenas fraturas. Ocorre o surgimento de partículas finas ao lado da partícula original que tem seu diâmetro apenas pouco diminuído. Ocorre devido ao atrito entre as partículas ou entre bolas e partículas. Dessas definições conclui-se que o mecanismo de fratura é caracterizado pela intensidade e direção da força aplicada ao material. Ele tem influência direta na distribuição granulométrica obtida e na energia de quebra.

Em tratamento de minérios são empregados diversos equipamentos, dependendo da etapa de cominuição. Para partículas grandes, como nos britadores, a energia a ser aplicada é alta e de forma praticamente individualizada nas partículas. Por isso os britadores, são estruturalmente reforçados de modo a suportar esforços localizados. Para materiais finos ocorre uma baixa aplicação de energia por massa. No entanto, a aplicação deve ser distribuída entre uma grande quantidade de partículas. Para tal, os moinhos, que são aplicados em faixas granulométricas menores, são construídos com capacidade de distribuir uma grande energia sobre um alto volume de partículas (Beraldo, 1987). Com isso, conclui-se que a escolha dos equipamentos de cominuição deve considerar as características das partículas e dos mecanismos de fratura a serem obtidos, para possibilitar a aplicação da energia necessária para a quebra.

De acordo com (Beraldo, 1987) os processos de cominuição apresentam alto consumo de energia e baixa eficiência energética. Estudos apontam que apenas 1% da energia consumida pelos equipamentos é efetivamente usada para cominuição (Tang, Chai, Wen , & Zhao, 2013). O restante da energia é dispersa em ruído, calor e deformações nas partículas, que não são suficientes para gerar quebra. Por isso, equipamentos de cominuição apresentam baixa eficiência energética, que é medida como a razão entre a energia que gera quebra das partículas e a energia total consumida pelo equipamento.

Os equipamentos de cominuição são ainda mais ineficientes para elevadas relações de redução e por isso o processo de redução de granulometria é realizado em etapas, sendo comum o projeto de circuitos de cominuição para obtenção da granulometria desejada. O moinho de bolas é constantemente aplicado nesses circuitos, sendo o foco do presente estudo. As próximas seções se destinam à descrição dos seus aspectos construtivos básicos, assim como suas características de operação e comportamento da carga.

#### 2.2. Aspectos Construtivos de um Moinho de Bolas

Os moinhos de bola são os equipamentos de moagem mais aplicados na indústria do beneficiamento mineral. São fabricados em uma ampla faixa de tamanhos e processam material cuja granulometria de entrada é inferior a 10 ou 15mm.

O processo de cominuição no moinho de bolas pode ocorrer com adição de água ou a seco. São encontradas aplicações de moagem a seco principalmente em plantas térmicas e na indústria de cimento. Já as operações com adição de água, em que o material é denominado polpa, são mais comuns em processos de tratamento de minérios.

De acordo com (Beraldo, 1987) um moinho tubular trata-se, basicamente, de um cilindro rotativo em que o trabalho de cominuição é realizado pela ação dinâmica dos corpos moedores que se encontram em seu interior. O moinho de bolas é um tipo de moinho tubular onde os corpos moedores são bolas de aço.



Figura 2.2 - Moinho tubular com acionamento por coroa e pinhão (Oliveira, 2012)

A Figura 2.2 mostra um moinho de bolas. Os principais aspectos construtivos a serem observados no projeto e construção de um moinho de bolas são: dimensões, mecanismo de acionamento e revestimento interno. No interior do moinho a carga é composta pelo material cuja granulometria deve ser diminuída e pelos corpos moedores. Os aspectos construtivos do moinho de bolas, assim como os corpos moedores, são discutidos a seguir.

O tamanho de um moinho é expresso pelas suas dimensões de diâmetro e comprimento, referindo-se às suas dimensões externas, normalmente expressas em pés. São parâmetros também importantes as dimensões internas do moinho, que levam em conta a espessura das chapas utilizadas na construção, assim como as características do revestimento interno.

De acordo com informações fornecidas por uma fabricante multinacional de moinhos de bola, esses equipamentos são fabricados atualmente com uma faixa de tamanhos de Ø5' x 8' com 75 hp a Ø30' x 41' com até 30.000 hp, sendo essas dimensões informadas em pés (Metso, 2015) e referentes ao diâmetro e comprimento dos moinhos, respectivamente. Já as potências citadas dizem respeito à potência nominal do motor elétrico de acionamento.

Conforme pode ser visualizado, a carcaça é a estrutura externa do cilindro rotativo que compõe o moinho. Ela possui furos para a fixação do seu revestimento interno através de parafusos. É usualmente feita de chapas de aço carbono, com espessura entre 1/1100 a 1/75 do diâmetro do moinho e pode ser fabricada em peça única ou em mais partes unidas por flanges (Beraldo, 1987). No interior da carcaça está fixado o revestimento, que influencia a movimentação da carga e protege a carcaça do desgaste provocado pela movimentação do material.

As laterais da carcaça são fechadas por peças chamadas tampas ou cabeceiras, que compreendem também o pescoço ou munhão do moinho. As cabeceiras são ligadas à carcaça através de flanges parafusados e são realizados diversos testes para verificação da resistência mecânica e estanqueidade dessa junção.

Os munhões são as peça de contato com os mancais e devem ter a superfície altamente polida para reduzir o atrito. Os mancais são lubrificados com óleo e em geral o circuito de bombeamento do óleo é independente do acionamento do moinho, por questões de segurança. Em alguns casos são instalados sensores de pressão do óleo nos mancais, para fins de segurança ou de monitoramento da distribuição do peso no moinho.

O giro da carcaça é realizado por um motor elétrico, que pode ser síncrono de polos salientes ou assíncrono (Marmolejo, 2011). No caso de motor síncrono, o rotor de polos salientes é fixado diretamente na carcaça do moinho, que passa a ser o elemento de rotação do motor, eliminando a necessidade de elementos mecânicos de acoplamento. No caso de motores assíncronos são utilizados elementos mecânicos para o acoplamento e adequação da velocidade angular ao moinho. Normalmente utiliza-se o conjunto redutor de engrenagens, coroa e pinhão, como pode ser visualizado na Figura 2.2.

O presente trabalho trata de aplicações que utilizam motores assíncronos para o acionamento de moinhos de bolas, como ocorre para a maior parte das instalações de moinhos de bolas no Brasil.

A parte interna da carcaça possui um revestimento, que possui dupla função: proteção da carcaça e condução do movimento da carga. A escolha do formato e do material do revestimento afeta diretamente a robustez e a disponibilidade do equipamento, uma vez que esses fatores influenciam diretamente a movimentação da carga e os mecanismos de fratura predominantes no processo. O revestimento é trocado periodicamente em paradas de manutenção, podendo ser alterado em uma dessas trocas.

Dentro do moinho, o material se mistura aos corpos moedores, que são responsáveis pela quebra do material no interior do moinho. No caso de moinhos de bolas são utilizadas bolas de aço ou ferro fundido como corpos moedores, que devem ter tratamento térmico adequado para obtenção de uma distribuição adequada da dureza em uma seção transversal da bola (Beraldo, 1987).

As bolas são carregadas periodicamente ao moinho, em alguns casos mais de uma vez ao dia, para manutenção do volume de carga requerido. Uma vez em seu interior, as bolas sofrem desgaste que alteram o seu formato e tamanho. A Figura 2.3 mostra um exemplo de bolas expulsas de um moinho de Ø17'x25,5' e 4.000kW operando com minério de ouro contendo sulfetos, numa operação de ouro no Brasil.



Figura 2.3 - Bolas expulsas de um moinho de 4.000kW (Mazzinghy, 2009)

Após a descrição dos aspectos construtivos básicos de um moinho de bolas, é necessário apresentar as principais variáveis de operação do equipamento, de forma a introduzir as técnicas de monitoração.

#### 2.3. Análise Simplificada da Dinâmica

As principais variáveis de operação de um moinho são: velocidade crítica, preenchimento intersticial, enchimento, carga de partículas, tempo de residência, carga circulante, porcentagem de sólidos, consumo específico e potência consumida. Esses fatores afetam diretamente a movimentação da carga dentro do moinho, assim como o seu consumo energético. A seguir é realizado um detalhamento dessas condições de operação com apresentação do seu equacionamento e modelagem, quando possível.

#### Velocidade Crítica

De acordo com (Mazzinghy, 2009), a velocidade crítica de um moinho é aquela a partir da qual a bola consegue atingir o ponto mais elevado do moinho sem se desprender da parede. Esse conceito é melhor visualizado considerando-se a trajetória de uma única bola em um moinho com revestimento liso, conforme pode ser visto na Figura 2.4:



Figura 2.4 - Forças agindo sobre uma bola em um moinho (Beraldo, 1987)

Na Figura 2.4, Fc representa a força centrífuga e Fg a força gravitacional. Da definição de velocidade crítica conclui-se que ela ocorre no ponto em que a força centrífuga que atua na bola devido à rotação da carcaça iguala-se ao seu peso. Com isso, a velocidade crítica é expressa pela seguinte equação:

$$Nc = \frac{42,3}{\sqrt{Dm-d}} \tag{2.1}$$

Sendo:

Nc –velocidade crítica, em rpm Dm – Diâmetro do moinho, em m

d – Diâmetro médio das bolas, em m

A velocidade do moinho é normalmente apresentada em porcentagem da velocidade crítica, e influencia diretamente no comportamento da carga em seu interior. Velocidades mais baixas propiciam a compressão e a abrasão como mecanismos de fratura, um vez que as bolas rolam umas sobre as outras, como no lado esquerdo da Figura 2.5. Com o aumento da velocidade do moinho, algumas bolas possuem energia para serem lançadas em seu interior, e sua queda propicia a existência do impacto como mecanismo de quebra, como pode ser visto no lado direito da Figura 2.5. O aumento contínuo da velocidade pode fazer com que toda a carga passe a centrifugar, numa condição indesejada em que ocorre a minimização dos mecanismos de cominuição.



Figura 2.5 - Influência da velocidade angular no movimento da carga em um moinho de bolas (Beraldo, 1987)

De acordo com (Beraldo, 1987), os moinhos operam numa faixa de velocidade entre 60% a 85% da velocidade crítica. Nessa faixa de velocidade predomina a moagem por impacto sem que ocorra o impacto direto das bolas sobre o revestimento interno, reduzindo o seu desgaste.

Assim como a velocidade do moinho, a quantidade de material no seu interior também apresenta influência direta no comportamento da carga, conforme será discutido a seguir.

#### Enchimento ou Volume de Carga Moedora

O volume de carga moedora, também denominado enchimento do moinho, é determinado como a fração ou porcentagem do volume interno do equipamento que é preenchida por corpos moedores, incluindo os espaços vazios entre os mesmos (Beraldo, 1987). Ela é expressa por:

$$V = 113 - \frac{126.\,Hc}{Dm} \tag{2.2}$$

Em que:

V – Volume da carga, em fração

Hc - Distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso, em m

Dm – Diâmetro do moinho, em m

A massa de corpos moedores a ser usada é função do volume do moinho, porcentagem do mesmo carregado e da densidade aparente da carga, que inclui os espaços vazios entre os corpos moedores. O enchimento do moinho influencia na movimentação da carga e, consequentemente, nos mecanismos de quebra predominantes (Alves, 2006). A potência consumida pelo equipamento também é influenciada pelo enchimento e pela velocidade de rotação, como pode ser visto na Figura 2.6:



#### Potência no moinho

Figura 2.6 - Potência medida em um moinho em função da carga de bolas e da fração da velocidade crítica - D=0,6m, d=27mm (Austin, Klimpel, & Luckie, 1984)

Para pequenos valores de enchimentos quase todas as bolas encontram-se em contato com o revestimento do moinho, sendo praticamente todas elas conduzidas a elevações na parede do moinho. Com o aumento do enchimento, algumas bolas não ficam mais em contato com o revestimento, formando uma camada maior de bolas no interior. Considerando que a energia de elevação é infinitamente superior à energia de fricção entre as bolas que não sofrem elevação, conclui-se que o aumento do enchimento reduz a o consumo de energia por massa de bolas. Ou seja, o consumo específico (kWh/ton) é maior para menores enchimentos. No entanto, o aumento da massa de bolas com a elevação do enchimento compensa essa redução no consumo específico, fazendo com que a curva tenha o formato de uma parábola voltada para baixo, conforme visualizado na figura Figura 2.6.

#### Carga de Partículas

A carga de partículas do moinho tem relação com a quantidade de material a ser moído em seu interior, e é representada como uma fração do volume do moinho (Alves, 2006):

$$fc = \frac{\frac{m_c}{\rho_c}}{V_m} \cdot \frac{1}{0,6}$$
(2.3)

Em que: fc – carga de partículas, em %  $\rho_c$  – densidade aparente das partículas mc – massa total de partículas Vm – volume do moinho

#### **Preenchimento Intersticial**

O preenchimento intersticial indica a fração do espaço entre as bolas que é preenchida com o material a ser moído, seja ele a seco ou em forma de polpa. É expresso por (Alves, 2006):

$$U = \frac{fc}{0.4.V} \tag{2.4}$$

Em que:

U - preenchimento intersticial

V – Volume da carga, em fração

fc – carga de partículas, em %

#### Porcentagem de Sólidos

A porcentagem de sólidos diz respeito à quantidade de sólidos no material a ser moído. Para um processo a seco, por exemplo, a porcentagem de sólidos é considerada unitária, ou 100%. Por isso, faz mais sentido falar em porcentagem de sólidos para processos de moagem em via úmida, em que é adicionada água ao material a ser moído. A porcentagem de sólidos pode ser expressa como:

$$s = \frac{\frac{m_c}{\rho_c}}{V_a}.100$$
 (2.5)

Em que:

s - porcentagem de sólidos Va – volume de água adicionado  $\rho_c$  – densidade aparente das partículas mc – massa total de partículas

#### **Consumo Específico**

Representa o consumo líquido de energia (kWh) por cada tonelada de alimentação processado. Ou seja, trata-se da potência demandada por ton/h de minério processado (Mazzinghy, 2009). Sua unidade é kWh/ton, e o seu valor é afetado pela eficiência energética e produtividade do equipamento.

#### Potência Consumida

O dimensionamento da potência consumida por um moinho de bolas tem relação com o projeto do equipamento e pode ser realizado de duas formas diferentes. No primeiro método, o cálculo da potência do acionamento é determinado com base nas dimensões do moinho e condições da carga, que são escolhidos com bases nas taxas de quebra sob condições determinadas. No segundo método, as dimensões do moinho são escolhidas com base na potência calculada a partir do consumo específico do material, que por sua vez tem relação com a distribuição granulométrica de alimentação e do produto (Austin, Klimpel, & Luckie, 1984). Para aumento da eficiência energética desejase que o moinho opere sob condições que reduzam o consumo específico do material, o que significa um menor consumo de energia elétrica para uma determinada quantidade de material moído.

Para diversas condições de operação, o cálculo da potência consumida por moinhos de bolas possui formulações diferentes apresentadas por diversos estudiosos no assunto (Mazzinghy, 2009). A modelagem da potência líquida considera uma modelagem mecanicista das forças que atuam sobre as bolas durante a movimentação do moinho, sob a qual são feitas algumas simplificações. A potência elétrica do acionamento deve apresentar valores superiores à potência líquida, uma vez que considera as perdas elétricas e mecânicas do conjunto de acionamento.

Estudos empíricos mostram que a carga de partículas não tem influência significativa na potência consumida pelo moinho. Com isso a modelagem da potência líquida considera apenas a movimentação das bolas no equipamento, através de análises energéticas e geométricas da trajetória do material (Austin, Klimpel, & Luckie, 1984).

Além da carga de bolas, a escolha do formato do revestimento, assim como o enchimento e a velocidade de rotação também influenciam a potência consumida pelo equipamento (Austin, Klimpel, & Luckie, 1984).

#### 2.4. Movimentação da Carga em um Moinho de Bolas

As características do movimento da carga no interior de um moinho são diretamente influenciadas pelas seguintes variáveis de operação: velocidade angular, enchimento, carga de partículas e perfil do revestimento. Quanto maior a velocidade angular do moinho, maior energia é passada aos corpos moedores, que podem impactar no material, realizando cominuição, ou diretamente no revestimento, acelerando o seu desgaste. O aumento da carga de partículas no moinho tende a reduzir a existência do impacto como mecanismo de fratura, alterando a distribuição granulométrica do produto obtido. Já o perfil do revestimento altera a forma como os corpos moedores são conduzidos, influenciando nos mecanismos de fratura predominantes e na distribuição granulométrica obtida.

O estudo do comportamento da carga dentro do moinho tem como objetivo principal avaliar como essas variáveis de operação influenciam na operação do equipamento e nas características do produto obtido. A determinação do regime operacional deve considerar, além da faixa granulométrica de saída desejada, a redução do consumo específico de energia e maior durabilidade do revestimento interno.

Para o moinho de bolas a operação é dividida em dois tipos de regime diferentes: cascata e catarata. No regime de catarata predomina a moagem por impacto, enquanto que no regime de cascata a moagem por atrito é evidenciada. As próximas seções se destinam ao entendimento dos regimes de operação de um moinho e sobre como variáveis de operação afetam a movimentação da carga, com foco na otimização do equipamento.

#### 2.4.1. Catarata

No regime de catarata a moagem por impacto é mais evidenciada. Ele é basicamente inexistente em velocidades baixas do moinho, já que as bolas não sofrem elevação suficiente para causar impacto no material. Revestimentos mais rugosos favorecem a operação em regime de catarata, assim como o aumento da carga e do tamanho das bolas (Beraldo, 1987).

A Figura 2.7 mostra a moagem em regime de catarata, com ênfase no impacto das bolas sobre o material.



Figura 2.7 - Moagem em Regime de Catarata (Beraldo, 1987)

18

Da figura é possível perceber que no regime de catarata o impacto das bolas pode ocorrer diretamente na carcaça, o que reduz a vida útil do revestimento e não gera moagem efetiva. Deve ser escolhida uma velocidade de operação que minimize esse fenômeno.

#### 2.4.2. Cascata

No regime de cascata a moagem por choque é menos evidenciada, predominando a moagem por atrito, que é mais procurada em moagem fina. Para velocidades reduzidas, a zona de catarata é praticamente anulada, dizendo-se que o moinho está operando em regime de cascata. Outros fatores como o formato do revestimento, o enchimento e o tamanho das bolas também afeta o regime de operação, conforme explicitado na seção anterior.

A Figura 2.8 mostra a moagem em regime de cascata.



Figura 2.8 - Moagem em Regime de Cascata (Beraldo, 1987)

Da figura percebe-se que as bolas não alcançam altura suficiente para impactar sobre o material, predominando o movimento de rolarem umas sobre as outras, o que justifica o fato da moagem por atrito ser predominante no regime de cascata.

#### 2.4.3. Influência dos Parâmetros de Operação no Movimento da Carga

Das seções anteriores conclui-se que o regime de operação do moinho tem relação com os mecanismos de fratura predominantes, o que por sua vez afeta a distribuição granulométrica do produto obtido. Com isso, temos que o material produzido pelas regiões onde predomina a catarata apresenta características distintas do material de uma zona de cascata.

A Figura 2.9 mostra uma distribuição das zonas de moagem em um moinho de bolas. Na região A as bolas estão se movendo umas sobre as outras em camadas concêntricas, produzindo moagem por compressão e um pouco por choque das bolas sobre as partículas. O limite superior dessa zona é aquele em que a força centrífuga anula o peso da bolas, e as bolas começam a entrar em regime de catarata. A área de catarata compreende a trajetória parabólica que as bolas realizam antes de colidirem na zona de impacto, e é uma região onde não ocorre moagem efetiva. A zona B, situada no limite inferior da zona de catarata, é resultado da operação em catarata e representa a área em que as bolas caem sobre a carga, produzindo intensa moagem por impacto. Na região central da carga praticamente não há movimentação, sendo considerada uma zona onde não há moagem efetiva.



Figura 2.9 - Comportamento da Carga de Bolas (Beraldo, 1987)

Das seções anteriores verificou-se que velocidades mais baixas propiciam a moagem por cascata, ou seja, com predominância da área A, e consequente redução de importância da área B. Velocidades superiores propiciam o regime de catarata elevando o número de impacto das bolas no revestimento, que não produz moagem efetiva. Com isso a faixa de trabalho do moinho ocorre em velocidades intermediárias, que possam propiciar a moagem nas zonas A e B da Figura 2.9.

Conforme discutido, a rugosidade do revestimento e o enchimento do moinho também afetam a região de operação, influenciando na predominância das áreas A e B da Figura 2.9.

Já o aumento da carga eleva o preenchimento intersticial e propicia a moagem por atrito, o que eleva a quantidade de finos obtidos. Além disso, o aumento da carga tende a amortecer o impacto das bolas, elevando a durabilidade do revestimento.

Conclui-se que as principais variáveis de operação que afetam o comportamento da carga do moinho são: carga de partículas, enchimento, desenho do revestimento interno e velocidade angular. Essas variáveis devem ser otimizadas de modo a propiciar a obtenção da distribuição granulométrica desejada para o produto, a redução do consumo energético do equipamento e maior vida útil do revestimento interno. Para otimização dessas características são utilizadas modelagens empíricas e técnicas de simulação, conforme discutido na seção a seguir.

#### 2.4.4. Otimização do Comportamento e Movimentação da Carga

Ao longo do capítulo foram discutidos conceitos e modelagens que mostram como o comportamento da carga é afetado por diversas variáveis em um moinho de bolas. Embora seja possível uma abordagem mecanicista da questão, ela demanda um número levado de simplificações, devido à quantidade de variáveis envolvidas. Com isso, verificase que grande parte dos modelos existentes são obtidos com base em estudos empíricos. Contudo, tratam-se de técnicas trabalhosas, caras e demoradas, uma vez que podem exigir a condução de diversos experimentos. Além disso, a modelagem empírica muitas vezes impossibilita a previsão adequada do desempenho do moinho para condições diversificadas, devido às próprias limitações do método (Carvalho & Tavares, 2012). Com o aumento da capacidade computacional, abordagens mecanicistas envolvendo o uso de simulações tem ganhado grande ênfase em todas as áreas do conhecimento, o que também ocorre na modelagem de moinhos.

Nos últimos anos a utilização de técnicas de simulação para modelagem da carga têm crescido bastante, especialmente no que diz respeito a modelagens mecanicistas que
utilizam Método dos Elementos Discretos e o Método do Balanço Populacional. Softwares baseados nesses métodos são capazes de mostrar o comportamento da carga de bolas dentro de um moinho, estimar com precisão a potência líquida de moagem para diferentes enchimentos e velocidades, distribuição das forças entre os corpos moedores, altura máxima de elevação das bolas e distribuição de energia dentro do moinho (Mishra & Rajamani, 1992).

A Figura 2.10 mostra uma simulação obtida a partir do método dos elementos discretos para moinhos de diferentes diâmetros: 0,3m e 1,8m (Beraldo, 1987). Para as duas simulações são considerados: velocidade angular em 70% da velocidade crítica, enchimento de 30% e diâmetro das bolas de 25mm. É possível perceber a diferença no comportamento da carga para os dois moinhos, assim como a distribuição de energia cinética entre os corpos moedores. No moinho de 0,3m predomina a moagem por cascata, enquanto que no outro moinho parte das bolas encontra-se na zona de catarata. A análise do comportamento da carga nesses dois moinhos permite prever que no moinho de 0,3m haverá uma maior geração de partículas finas, devido à predominância da abrasão e atrito como mecanismos de quebra. Já no moinho maior, haverá menor geração de finos, no entanto, pode haver um desgaste precoce do revestimento, uma vez que parte das bolas impactam diretamente sobre ele.



Figura 2.10 – Simulação do movimento da carga moedora para moinhos de diferentes diâmetros (Carvalho & Tavares, 2012)

O método tem sido amplamente utilizado na otimização da operação de moinhos através da alteração de parâmetros de operação, como enchimento e a distribuição do tamanho das bolas. O método também pode propor o uso de novos revestimentos, para propiciar uma movimentação da carga mais adequada, A grande desvantagem do método reside no fato de não permitir uma análise *online* da operação do moinho. Apesar de obter resultados efetivos na otimização do equipamento, o método apresentas limitações quanto às simplificações realizadas e é uma ferramenta *off-line* de análise. As simulações não podem ser utilizadas para um monitoramento contínuo que permite ajustes das condições de operação diretamente na planta, ou seja, o método não pode ser utilizado para fins de controle. Para o monitoramento em tempo real da carga é necessária a instalação de instrumentação adequada no moinho. No entanto, segundo (Behera, Mishra, & Murty, 2007) o monitoramento da carga em um moinho de bolas só pode ser realizado por métodos indiretos. Devido às características rotativas e agressivas do material no interior do equipamento, é compreensível que não seja possível a instalação de sensores para o monitoramento da carga. Por isso, são desenvolvidas técnicas indiretas de monitoramento, visando à otimização dos parâmetros da carga que, conforme discutido, possibilitam ganhos de produtividade e redução do consumo energético em um moinho de bolas. Ferramentas voltadas ao monitoramento da carga em moinhos de bolas são discutidas no Capítulo 3.

#### 2.5. Conclusão

No início do capítulo foi apresentado o conceito de cominuição, que é o processo que ocorre dentro de um moinho de bolas. Verificou-se que o processo de cominuição é altamente ineficiente, sendo apenas uma pequena parcela da energia efetivamente utilizada na quebra das partículas. Devido à ineficiência do processo, muitos pesquisadores concentram esforços nesta área, pois, por menor que seja o aumento de eficiência obtido, pode-se diminuir em muito o consumo energético do processo ou mesmo aumentar a produtividade (Mazzinghy, 2009).

No moinho de bolas a distribuição granulométrica do produto é diretamente influenciada pelo mecanismo de fratura predominante. Por isso, as condições de operação de um moinho devem ser escolhidas de forma a propiciar o mecanismo de fratura capaz de gerar a distribuição granulométrica desejada. Condições operacionais inadequadas podem levar à obtenção de produtos indesejados. Além disso, o consumo específico de energia na cominuição está diretamente ligado à relação entre distribuição granulométrica da alimentação e do produto. Ou seja, processos em que predominam mecanismos de fratura inadequados podem, além de gerar produtos indesejados, alterar o consumo energético do equipamento, uma vez que alteram o consumo específico do material.

Sobre a potência líquida de moagem, diversos modelos teóricos e empíricos são encontrados. Apesar das diferenças nas modelagens, conclui-se que os principais fatores que afetam a potência líquida são: velocidade rotacional, dimensões do moinho, enchimento, densidade das bolas, revestimento interno e a distribuição granulométrica do material. A potência consumida pelo moinho é a soma da potência líquida e das perdas no acionamento, sendo estas de origem elétrica e mecânica.

A otimização da operação em um moinho de bolas está relacionada à redução da potência líquida consumida e à otimização da movimentação da carga de forma a propiciar mecanismos de fratura capazes de gerar a melhor distribuição granulométrica do produto e que danifiquem o mínimo possível o revestimento interno do moinho. Técnicas de simulação usando Método de Elementos Finitos e Métodos de Balanço Populacional têm se mostrado eficientes na otimização da operação de moinhos. No entanto, essa técnica não pode ser aplicada em tempo real, o que impossibilita seu uso para fins de controle e limita a capacidade de otimização do método. Para um monitoramento em tempo real, é necessário o desenvolvimento de instrumentação adequada, uma vez que o monitoramento da carga não pode ser realizado diretamente devido às limitações técnicas impostas pelo processo. Com isso, técnicas de monitoramento indireto e em tempo real vêm sendo estudadas como ferramentas capazes de otimizar a operação de moinhos de bolas, mostrando resultados efetivos no aumento da produtividade e/ou redução do consumo energético desses equipamentos.

Ao longo do próximo capítulo são abordadas técnicas de monitoramento indireto da carga de moinhos de bolas que utilizam diversas variáveis capazes de fornecer informações sobre a carga.

## **Capítulo 3**

# Técnicas de Monitoramento da Carga em um Moinho de Bolas

Ao final do Capítulo 2 foram apresentadas ferramentas que se destinam à definição das melhores condições de operação em um moinho de bolas. O enchimento do moinho, assim como a velocidade angular, carga de partículas e o formato do revestimento devem ser escolhidos de forma a propiciar os mecanismos de quebra capazes de gerar a distribuição granulométrica desejada para o produto. Para a determinação dessas variáveis, são usadas técnicas envolvendo ensaios de laboratório e/ou simulações computacionais. No entanto, como não é possível instalar sensores dentro do moinho, torna-se difícil o monitoramento desses parâmetros em tempo real (Behera, Mishra, & Murty, 2007). A operação fora dessas condições pode levar à geração de produtos indesejados, elevação do consumo energético e ao desgaste precoce do revestimento interno.

Para solucionar esse problema, são empregadas técnicas indiretas para medição e monitoramento em tempo real da carga do moinho, que permitem o controle da reposição de bolas e da alimentação do moinho. Porém, na grande maioria das plantas, esse monitoramento ainda é realizado com base no conhecimento e experiência dos operadores, que utilizam variáveis como a corrente do motor e a pressão dos mancais para fazer uma estimativa grosseira das condições da carga. No entanto, esses métodos estão sujeitos à imprecisão da operação e sofrem influência de parâmetros externos (Tang, Tianyou, Wen, & Lijie, 2012).

Os primeiros estudos que se destinam ao desenvolvimento de métodos de monitoramento em tempo real da carga em moinhos tubulares são da década de 80, o que mostra que esse é um tema que há muito tempo já desperta interesse. Nos dias atuais, já é possível encontrar aplicações comerciais com essa finalidade, mas ainda são pouco utilizadas em plantas no Brasil. Em contrapartida, a quantidade de estudos com essa finalidade tem aumentado bastante, o que demonstra que o tema continua sendo de grande relevância para a indústria de beneficiamento mineral.

De acordo com Tano (2005), os métodos de monitoramento em tempo real podem ser divididos em duas categorias: métodos que utilizam sensores instalados diretamente sobre a carcaça e métodos que utilizam sensores instalados em outros pontos do moinho, como pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Métodos de Monitoramento da Carga (Tano, 2005)

Na primeira categoria, encontram-se métodos que medem a condutividade entre os espaçadores, métodos que utilizam *strain gauges* no revestimento interno do moinho, métodos de monitoramento sonoro através do uso de microfones e também a análise vibracional. Na segunda categoria encontram-se os métodos que utilizam a medição das variáveis elétricas, o monitoramento da pressão dos mancais e, novamente, as análises sonora e vibracional. Essas duas últimas podem pertencer às duas categorias, dependendo do local de instalação dos sensores.

Um dos primeiros estudos sobre o monitoramento da carga em moinhos propôs a instalação de sensores piezoelétricos e eletrodos dentro dos parafusos de fixação dos espaçadores do moinho (Vermeulen, Ohlson de Fine, & Schakowski, 1984). Foi possível obter os ângulos de impacto da carga, que podem ser usados para obter uma medição do enchimento. Apesar dos resultados positivos, a especificação dos sensores requer a escolha de materiais adequados para condições severas de operação, o que dificulta a aplicação do método.

Um outro método direto de monitoramento utiliza a instalação de strain gauges dentro dos espaçadores dos moinhos. Kolacz (1997) mostrou que os sinais desses sensores podem ser utilizados para medir os ângulos de impacto da carga e obter uma medição do enchimento. É encontrada uma aplicação comercial que utiliza a técnica, denominada *Continuous Charge Monitoring* (Inc, 2003). Assim como na medição de

condutividade, a grande desvantagem do método está nas necessidades especiais do material dos sensores no revestimento, uma vez que esses sofrem impacto constante.

A pressão nos mancais de alimentação e de descarga do moinho também podem ser utilizadas para uma estimativa do enchimento, sendo um dos métodos indiretos de monitoramento (Tano, 2005). No entanto, essa informação sofre influência do peso total do equipamento, sendo afetada pelas bolas e revestimento do moinho. Por isso, alterações na carga de bolas e o desgaste do revestimento afetam a medição, tornando difícil a calibração e influenciando a precisão da medida.

O monitoramento sonoro, que pode ter os sensores instalados diretamente na carcaça, ou ainda em pontos próximos ao moinho, também apresenta resultados expressivos na determinação dos ângulos de impacto e na estimativa do enchimento do moinho (Patente Nº US 6874366 B2, 2005). Uma patente utilizando o método foi obtida pela *FFE Minerals Corporation* em 2005, para o sistema denominado *Impactmeter* (Pontt, J.; Rodriguez, J.; Valderrama, W.; Sepulveda, G.; Chavez, P.; Cuitino, B.; Gonzalez, P.; Alzamora, G., 2003). A grande desvantagem da técnica, que também é conhecida como "ouvido eletrônico, é a susceptibilidade a ruídos, uma vez que o ambiente industrial possui diversas fontes sonoras que podem influenciar a medição. O caso se agrava quando a instalação é composta por mais de um moinho, já que o ruído sonoro de um moinho influencia a medição dos outros, num problema chamado de *"cross-talk"*.

Além dos métodos citados, destacam-se a análise vibracional e o uso de variáveis elétricas, que possuem maior enfoque na atualidade. Devido à relevância dos métodos, eles são detalhados nas seções a seguir.

#### 3.1. Variáveis Elétricas

Sabe-se que os esforços mecânicos da carga são transmitidos ao motor de acionamento por meio de dispositivos rígidos de acoplamento. O motor responde a esses esforços com modulação nos sinais de corrente e oscilação da velocidade no seu eixo (Stopa M. M., 2011). Com base nesses princípios, técnicas de medição que utilizam variáveis do motor podem ser utilizadas no monitoramento da carga em moinhos de bolas. Conforme discutido no Capítulo 2, a potência consumida pelo moinho está diretamente relacionada à carga em seu interior. Com isso, conclui-se que a potência ativa do motor e, consequentemente, a corrente de alimentação, variam com a carga no interior do equipamento. Em plantas onde não existe a instalação de nenhum método para o monitoramento da carga do moinho, a medição da corrente elétrica é utilizado para tal. No entanto, a medição do valor eficaz da corrente propicia apenas uma estimativa imprecisa sobre o enchimento (Behera, Mishra, & Murty, 2007). Para o monitoramento preciso da carga usando as variáveis elétricas do motor, é necessária a aplicação de técnicas mais complexas, conforme discutido a seguir.

(Melero et al., 2014), baseado em uma extensa revisão bibliográfica, afirma que as variáveis elétricas do motor de acionamento de um moinho de bolas podem ser utilizadas para uma estimativa mais precisa de parâmetros da carga. Segundo o autor, métodos de monitoramento baseados nos sinais de corrente elétrica ou potência instantânea são alternativas promissoras na estimativa da carga do moinho e, consequentemente, podem elevar a eficiência energética do equipamento.

Uma ferramenta de monitoramento para moinhos semi autógenos, denominada MONSAG, é apresentada por (Pontt J. , 2004) e utiliza variáveis elétricas do motor do moinho. O princípio de funcionamento é baseado no processamento de variáveis elétricas utilizadas no controle vetorial de um motor síncrono que aciona um moinho semi autógeno. As técnicas de processamento não são detalhadas, embora o artigo apresente resultados expressivos para a medição do enchimento. O sinal de enchimento obtido é utilizado para controle da alimentação em um moinho semi autógeno de 15.000hp, resultando num aumento de 3,2% de produtividade (ton) e na redução de 3,8% da energia específica consumida na moagem (kWh/ton). Devido aos ganhos apresentados, o método também pode ser aplicado na emissão de créditos de carbono, reforçando a possibilidade de ganhos financeiros e ambientais (Pontt J., 2010).

Outra possibilidade é a aplicação de técnicas que utilizam o motor como um transdutor da carga acoplada ao seu eixo, como é o caso da L.T.S.A. (Load Torque Signature Analysis). A técnica é utilizada com sucesso para monitoramento de falhas em cargas rotativas, por meio da análise espectral do conjugado de carga estimado (Stopa M. M., 2011). O conjugado de carga contém informações relevantes sobre a carga e pode ser obtido através do processamento das tensões, correntes e posição angular do motor.

#### 3.2. Análise Vibracional

No início da década de 90, foi proposto que a vibração mecânica e o ruído sonoro causados pelas bolas podem ser correlacionados a alguns parâmetros de moagem (Zeng & Forssberg, 1994). Os testes foram realizados para um moinho de 300x300mm, e foram instalados um sensor de vibração no mancal e microfones próximos à carcaça do moinho. O trabalho realiza a análise dos sinais registrados no domínio do tempo e da frequência, mostrando que é possível uma correlação com parâmetros como o meio de moagem (úmido ou a seco) e a granulometria. A principal contribuição do trabalho foi a de apresentar resultados experimentais que mostram que o sinal de vibração possui correlação com parâmetros de moagem, já que, desde então, a análise vibracional vem ganhando popularidade na estimativa de parâmetros da carga em moinhos de bolas.

(Gugel, Palacios, Ramirez, & Parra, 2003) apresenta resultados experimentais para um sistema baseado na instalação de um acelerômetro diretamente na carcaça do moinho. O processamento é realizado de forma digital e utiliza um algoritmo de otimização baseado em redes neurais. A faixa de frequências é selecionada automaticamente através da calibração do instrumento. Também é realizado um comparativo com técnicas de medição do enchimento baseadas em sinais sonoros, mostrando que a análise vibracional apresenta sensibilidade pelo menos duas vezes maior. Apesar de apresentar ótimos resultados sobre a medição do enchimento do moinho, o autor não entra em detalhes sobre as técnicas empregadas no processamento do sinal. Dando continuidade aos estudos, (Gugel & Moon, 2007) apresenta duas possibilidades para a instalação do acelerômetro: diretamente na carcaça ou no mancal do moinho de bolas. Resultados experimentais mostram que a instalação nos mancais apresenta menos ruídos e representa uma indicação melhor do enchimento do moinho. Além disso, os resultados indicam que a elevação da produtividade e da eficiência energética do moinho podem ser alcançadas através do monitoramento e controle do enchimento, obtidos pela análise vibracional.

(Behera, Mishra, & Murty, 2007) apresenta resultados experimentais para um moinho de 90cm de diâmetro, mostrando que a amplitude do sinal de vibração captado no mancal do moinho apresenta, no domínio da frequência, correlação com os seguintes parâmetros de moagem: velocidade do moinho, enchimento de minério, carga de bolas e meio de moagem (via úmida ou a seco). 29 (Zhi-gang, Pei-hong, Xiang-jun, & Zhen-zhong, 2008) realiza a instalação de dois acelerômetros nos mancais de um moinho industrial. Aplicando técnicas de análise no domínio da frequência ele mostrou que o sinal de vibração pode ser usado para detectar sobrecarga e monitorar parâmetros como enchimento de material em um processo a seco.

Em (Peng, Min-ping, & Bing-lin, 2009) é proposta a análise da posição angular da carcaça a partir da amplitude da maior componente espectral da vibração medida, através da instalação de um acelerômetro diretamente na carcaça. Ele mostrou que o ângulo de maior intensidade de vibração é reduzido com o aumento do enchimento do moinho.

O registro do sinal de vibração em um moinho industrial, através da instalação de um acelerômetro no munhão de entrada do material é apresentada por (Si, Hui, Zhang, & Jia, 2009). Em conjunto com a análise do sinal sonoro, demonstra-se que a energia espectral, junto com a frequência central e a distribuição do espectro característico, podem ser utilizadas para caracterizar a carga do moinho com precisão.

Em (Das, Das, Behera, & MIshra, 2011) o sinal de vibração é registrado usando-se um acelerômetro instalado diretamente na carcaça de um moinho de um metro de diâmetro, para diferentes características de velocidade angular, distribuição granulométrica, quantidade de bolas e porcentagem de sólidos. O sinal é filtrado no domínio do tempo, levado ao domínio da frequência através de técnicas de FFT e um valor médio da amplitude do espectro é obtido. Através da inspeção visual do espectro e do valor médio obtido, o autor mostra que é possível identificar condições de moagem como granulometria do material e mudanças na velocidade ou carga de bolas.

Da bibliografia disponível sobre o assunto, fica claro que, exceto por (Peng, Minping, & Bing-lin , 2009) e (Das, Das, Behera, & MIshra, 2011), os autores optaram pela instalação do acelerômetro em pontos externos à carcaça. Também é possível concluir que todos os autores realizam a análise do sinal de vibração no domínio da frequência, e não do tempo. No entanto, não há um consenso sobre qual técnica de processamento deve ser utilizada e nem sobre quais características do espectro possuem informação relevante sobre a carga. Ou seja, embora todos os autores sejam capazes de demonstrar a correlação entre o sinal de vibração e parâmetros da carga do moinho, não é possível concluir qual característica do sinal representa um bom indicador da carga. Distribuição do espectro, amplitude das componentes de maior amplitude e energia espectral são alguns dos parâmetros utilizados na correlação com a carga. Além disso, os resultados apresentados são todos baseados em experimentos empíricos e nenhuma justificativa teórica é apresentada para justificar as faixas de frequência analisadas ou mesmo as técnicas de processamento empregadas. São encontradas faixas de frequência e técnicas de análise extremamente variadas, para moinhos de tamanhos diversos, englobando equipamentos de laboratório e industriais. (Mohanty, Gupta, & Raju, 2015), (Zeng & Forssberg, 1994) e (Behera, Mishra, & Murty, 2007) concentram-se em faixas que não ultrapassam 1kHz. Para esses estudos, foram utilizados moinhos de laboratório e a instalação dos sensores é realizada nos mancais, exceto por Gupta, cujo acelerômetro encontra-se na carcaça do moinho. Segundo (Zeng & Forssberg, 1994), a faixa de frequência de interesse é inferior a 1000Hz, mas nenhuma justificativa para essa afirmação é apresentada. Outros autores analisam o sinal de vibração em frequências bastante superiores, alcançando componentes superiores a 10kHz. O local de instalação e o tamanho dos equipamentos também varia dentre os estudos que analisam faixas de frequências superiores.

Sabe-se que as componentes relacionadas com o comportamento da carga possuem relação física com o impacto das bolas e do material dentro do moinho. No entanto, não foram encontradas referências que se disponham a realizar uma correlação física entre o comportamento do material, as características de operação e as faixas de frequência em que as informações irão se manifestar. Nos artigos apresentados, nenhum esforço foi realizado com o objetivo de justificar as faixas de frequência analisadas, o que reforça a característica empírica do estudo e a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre as características físicas e mecanicistas que envolvem a modelagem do comportamento da carga.

Segundo (Si, Hui, Zhang, & Jia, 2009) os sinais sonoro e vibracional medidos em um moinho de bolas são o resultado da mistura de informações de diversas fontes de vibração e ruído, como ruídos do ambiente, vibração característica do equipamento, colisões internas do moinho e ruídos do motor. Todas essas variáveis são aleatórias e variam muito de acordo com o ambiente, tamanho do equipamento, material de fabricação, características da carga e do corpo moedor, dentre outros fatores que podem influenciar o ambiente. Com isso, se torna difícil a proposição de um método automático para obtenção de um indicador da carga do moinho, o que justifica a grande variação dentre os métodos de processamento de sinais empregados. Como não há nenhum estudo teórico capaz de prever a faixa de frequências em que as características da carga irão se manifestar, essa análise é realizada de forma variada pelos estudos encontrados.

Alguns estudos mais recentes envolvendo análise vibracional para caracterização da carga em moinhos de bolas se destinam ao estudo de técnicas de processamento e análise de sinais no domínio da frequência, como (Xiao, Zhao, & Diao, 2010), (Mohanty, Gupta, & Raju, 2015), (Tang, Tianyou, Wen , & Lijie , 2012) e (Tang, Chai, Wen , & Zhao, 2013). São empregadas técnicas de análises estatísticas e no domínio da frequência, comparações para diferentes frequências de amostragem, além de ferramentas de otimização como algoritmos fuzzy e genéticos para obtenção dos indicadores que contém informações sobre a carga. O objetivo é o de obter indicadores contidos no sinal espectral que possibilitem a caracterização da carga do moinho, para obtenção de uma medição precisa da carga. Embora os autores apresentem resultados experimentais expressivos, as técnicas e os algoritmos empregados não são apresentados detalhadamente. Além disso, nenhum autor justifica a faixa de frequência em que as características da carga se manifestam, ou, muito menos, realizam a proposição de um modelo teórico para justificativa e/ou previsão da faixa de frequências que caracteriza a carga do moinho.

Sobre a análise vibracional, foi encontrada uma aplicação comercial. A ferramenta é baseada em processamento digital e algoritmos de redes neurais, e utiliza como entradas características do espectro do sinal de vibração. São analisadas características como energia, frequência e fase do sinal registrado por um acelerômetro instalado na carcaça do moinho. Após o processamento em algoritmos de redes neurais, uma medição precisa do enchimento é obtida e fornecida como saída num sinal de 4 a 20mA, que pode ser utilizado para controle da alimentação do moinho. Sobre a faixa de frequências analisadas, não é apresentado nenhum espectro característico. Segundo o fabricante, é necessário um processo de calibração em campo que determina, automaticamente, a faixa de frequências que maximiza a performance do instrumento (Digital Control Lab, 2003). Ou seja, a faixa de frequências que caracteriza a carga do moinho é obtida a partir de dados experimentais. Essa informação reforça a característica empírica do estudo, mostrando que, até então, a seleção da faixa de frequências é realizada de forma totalmente experimental, não havendo embasamento teórico para tal.

#### 3.3. Conclusão

Foram abordados ao longo do capítulo diversas técnicas indiretas para o monitoramento em tempo real de parâmetros da carga em moinhos de bola. Percebe-se que os estudos mais recentes utilizam sensores de vibração ou as variáveis elétricas do motor de acionamento, em detrimento das outras técnicas apresentadas. Conclui-se que as outras técnicas, apesar de apresentarem correlações interessantes, possuem menor enfoque na atualidade.

A análise vibracional apresenta-se como a técnica mais utilizada nos estudos recentes que visam à caracterização da carga em um moinho de bolas. No entanto, essa técnica demanda a instalação de sensores frágeis, que apresentam grande sensibilidade em relação ao local de instalação, além da necessidade de algoritmos complexos para garantir a precisão do método (Melero et al., 2014). Com isso, o monitoramento de variáveis elétricas do motor se apresenta como uma alternativa promissora no monitoramento de parâmetros da carga do moinho, por apresentar menor sensibilidade aos fatores externos e pela não necessidade da instalação de sensores mecânicos adicionais ao moinho.

Ao longo do próximo capítulo é apresentado um método de monitoramento de cargas rotativas baseado no uso do motor de indução como um estimador da carga acoplada ao seu eixo. A técnica é utilizada para detecção de faltas e será utilizada no presente trabalho para a obtenção de parâmetros da carga em moinhos de bolas.

### **Capítulo 4**

# Monitoramento do Moinho de Bolas Usando Variáveis do Motor de Acionamento

No capítulo 2 são abordadas as variáveis operacionais que impactam no regime de operação dos moinhos de bolas, com especial enfoque na movimentação da carga. Concluiu-se que o monitoramento contínuo e em tempo real de parâmetros relacionados à carga, como enchimento e percentagem de sólidos, permite a elevação da produtividade e da eficiência energética desses equipamentos, com possibilidade de ganhos financeiros significativos.

No Capítulo 3 foram revisados métodos desenvolvidos para monitorar a carga em moinhos de bolas, com destaque para a análise vibracional e ao uso de variáveis elétricas do motor de acionamento. Dos estudos apresentados, concluiu-se que a análise vibracional é a técnica mais empregada e estudada atualmente. Embora o uso da técnica não seja uma proposta recente, sendo esta estudada desde o início da década de 90, inúmeros estudiosos continuam a concentrar esforços no assunto, dada a grande quantidade de estudos atuais. Ainda que os princípios básicos do sensoriamento permaneçam os mesmos, limitações encontradas nos métodos de processamento dos sinais de vibração mostram que o método ainda não se encontra consolidado. O grande desafio atual está no desenvolvimento de algoritmos capazes de automatizar os mecanismos de detecção das condições operacionais da carga em moinhos de bolas, uma vez que os estudos sobre o assunto são predominantemente empíricos. Como não foi encontrado um modelo matemático determinístico capaz de correlacionar o sinal de vibração às variáveis operacionais relacionadas a carga, ferramentas e algoritmos de elevada complexidade são estudados com vista à automatização e aumento da precisão do método. Concluiu-se que, embora seja comprovado que a análise vibracional possui informações relevantes sobre a carga, ainda não houve a consolidação de um método capaz de extrair essas informações de forma automática. Tampouco foram encontrados estudos capazes de estabelecer uma justificativa teórica para as componentes vibracionais utilizadas na estimativa de parâmetros da carga do moinho, sendo os resultados apresentados puramente empíricos. Somam-se à essa dificuldade a elevada delicadeza dos sensores de vibração e a dificuldade existente na definição da melhor localização para esses sensores. Nesse cenário, o uso de variáveis elétricas do motor de acionamento se mostra como uma alternativa interessante para o monitoramento em tempo real da carga nos moinhos de bolas. O princípio básico do uso do motor elétrico para monitoramento da carga acoplada considera o fato de que oscilações e/ou alterações na carga afetam diretamente o motor, alterando variáveis que podem ser facilmente medidas.

O uso do motor elétrico como dispositivo de acionamento é baseado na conversão da energia elétrica em energia mecânica. Nesse sentido, o motor retira energia elétrica de uma fonte de tensão ou corrente, produzindo conjugado para movimentação de uma carga mecânica que fica diretamente acoplada ao seu eixo. Essa carga, por sua vez, aplica um conjugado frenante ao eixo do motor, que reage produzindo variações em variáveis internas como correntes e posição angular do eixo. Desse fato, conclui-se que o motor é sensível à alterações na carga acoplada ao seu eixo, e pode então ser utilizado para fins de monitoramento dessa carga. Conclui-se que o motor elétrico pode ser considerado não somente um elemento de acionamento, mas também como um transdutor da carga acoplada ao seu eixo.

Ao compreender o motor elétrico como um transdutor da carga, surgem possibilidades voltadas para o monitoramento e a detecção de faltas no próprio motor e na carga acoplada ao seu eixo. Como exemplo, cita-se a análise espectral da corrente de estator para a detecção de desbalanceamentos e desalinhamentos no conjunto de acionamento em cargas rotativas. Nesse caso, a característica oscilatória do conjunto determina o aparecimento de harmônicos na corrente de estator, que podem ser usados para caracterização do comportamento anormal do sistema. Alterações na amplitude de determinadas componentes harmônicas podem ser usadas para indicação e/ou detecção dessas faltas no conjunto de acionamento. Outras aplicações interessantes utilizam a corrente elétrica para monitoramento das condições da própria máquina, sendo possível a detecção precoce de barras de rotor quebradas, ou de defeitos nos rolamentos. (Melero, et al, 2014) (Baccarini, 2005). Conclui-se que as variáveis elétricas do motor de acionamento já são utilizadas com sucesso no monitoramento de faltas em equipamentos e no conjunto de acionamento, através da aplicação de técnicas já consolidadas no 35 mercado, como a análise espectral da corrente de estator. Essa conclusão reitera o fato de que as variáveis do motor contém informações relevantes sobre a carga acoplada ao seu eixo. Nesse sentido, surge a possibilidade do uso do motor de acionamento não apenas para o monitoramento de faltas na carga, mas também para fins de controle operacional do processo, como, por exemplo, a medição do enchimento de um moinho de bolas.

No caso do moinho de bolas, o impacto da carga nas paredes internas do moinho gera intensa vibração mecânica que é transmitida ao eixo do motor através do acoplamento mecânico do conjunto de acionamento (Behera, Mishra, & Murty, 2007). Como isso, técnicas baseadas no uso do motor como um transdutor da carga podem ser utilizadas para monitoramento desses impactos entre carga e carcaça. Conforme discutido no Capítulo 2, as características dos impactos entre a carga e a carcaça são determinadas por variáveis como o enchimento, preenchimento intersticial, velocidade e porcentagem de sólidos. Como os impactos da carga com a carcaça são transmitidos diretamente ao motor elétrico pelo dispositivo de acoplamento, espera-se que as variáveis operacionais que influenciam diretamente na movimentação da carga possam ser monitoradas através de técnicas que utilizam o motor de indução como um transdutor da carga.

Conforme discutido na seção anterior, dentre as variáveis que sofrem efeito de alterações na carga acoplada ao motor elétrico, encontram-se as correntes de estator. A análise espectral da corrente já é utilizada com sucesso para fins de monitoramento preditivo das condições mecânicas do próprio motor e do conjunto de acionamento. Pela facilidade de medição do sinal de corrente, essa variável se apresenta como a primeira alternativa ao monitoramento da carga em moinhos de bolas. De acordo com (Melero, et al, 2014), as características espectrais da corrente do motor de indução, assim como a informação da potência instantânea podem ser utilizadas no monitoramento da carga de moinhos de bolas. Nesse contexto, apresenta-se a análise da assinatura da corrente (M.C.S.A) como um método baseado na análise espectral da corrente do motor de indução e amplamente utilizado para diagnóstico de faltas em cargas rotativas. O método consiste na obtenção da amplitude de determinadas componentes espectrais da corrente, através de ferramentas de FFT. A amplitude dessas componentes de faltas são, então, comparadas com valores estabelecidos como padrão e uma diferença significativa entre os valores medidos e os valores padronizados é utilizada para caracterização de faltas (Stopa, Filho, & Lage, 2010). A técnica tem sido utilizada com sucesso e sua grande vantagem é a não 36

necessidade da instalação de novos sensores, uma vez que a corrente elétrica já é monitorada para fins de segurança e proteção do acionamento. Apesar da simplicidade, o método apresenta limitações quanto à faixa de frequências da análise e à influência de fatores externos, como alterações na temperatura, na inércia da carga e na tensão de alimentação. Nesse contexto, o método L.T.S.A. é apresentado por (Stopa M. M., 2011) como uma alternativa à análise espectral da corrente. O L.T.S.A. introduz a realimentação de estados para aumento da faixa de passagem e redução da dependência de parâmetros

Além das vantagens do L.T.S.A. perante o M.C.S.A., o conjugado de carga é considerado, junto da análise vibracional, uma das variáveis mais ricas em informações a respeito da carga (Stopa M. M., 2011). Uma vez que a análise vibracional já apresenta resultados expressivos para o monitoramento da carga de moinhos de bolas, espera-se que técnicas que produzam resultados semelhantes também apresentem boa aplicação para essa finalidade. Com isso, conclui-se que o L.T.S.A. possui elevado potencial para o monitoramento da carga em moinhos de bolas, já que apresenta resultados semelhantes à analise vibracional e uma resposta superior à análise espectral da corrente.

Os detalhes do método e sua implementação são descritos na seção a seguir, conforme apresentados originalmente por (Stopa M. M., 2011). Por questões textuais, será omitida a bibliografia referente a esse texto, uma vez que ele é usado como bibliografia básica para todo o desenvolvimento do presente capítulo, e a citação se tornaria repetitiva.

A seção 4.1 apresenta os princípios básicos e os aspectos da implementação do L.T.S.A., conforme apresentados na bibliografia original. A primeira parte da seção aborda a estimativa do conjugado de carga, a partir de um observador de velocidade. A segunda parte apresenta a técnica utilizada no processamento do sinal, que é realizado no domínio da frequência. A seção 4.2 apresenta as conclusões do capítulo.

### 4.1. Princípio Básico do L.T.S.A. (Load Torque Signature Analysis)

Tendo em mente que o motor de indução pode ser utilizado como um transdutor da carga acoplada ao seu eixo, o fundamento da aplicação é a utilização de variáveis do motor de indução para estimativa e monitoramento de parâmetros da carga do moinho. Um diagrama de blocos da ferramenta, contendo as etapas de processamento, é apresentado a seguir:



Figura 4.1 - Diagrama de blocos do LTSA. Adaptado de Stopa (2011).

Como pode ser visto na Figura 4.1, a estrutura do método é razoavelmente simples. Na parte de baixo é representado o conjunto de acionamento, composto pela carga, um redutor para acoplamento e redução de velocidade, além do motor de indução. Como pode ser visto, o conjugado de carga tem sentido oposto ao conjugado do motor, e por esse motivo sua ação é considerada frenante. No motor são previstos sensores elétricos na fonte de alimentação, além de um medidor de posição no eixo do rotor, uma vez que, conforme discutido anteriormente, as correntes do estator e a posição angular do rotor são afetadas por alterações no comportamento da carga. Essas duas variáveis, junto às tensões de estator, são utilizados para estimativa do sinal do conjugado de carga pelo método L.T.S.A. Dessa forma, o bloco do estimador de conjugado de carga possui sete entradas, sendo elas: três correntes de estator, três tensões de estator além da posição angular do rotor. A velocidade do rotor pode ser obtida diretamente através da instalação de um sensor de velocidade ou de forma indireta através da integração do sinal de um sensor de posição angular, uma vez que, matematicamente, a velocidade é a derivada da posição angular. Após a estimativa do conjugado de carga a partir dessas variáveis, são 38

usadas ferramentas de FFT para a análise no domínio da frequência. Assim como ocorre para a análise acústica e vibracional, espera-se que as componentes que têm relação com a carga se manifestem em componentes espectrais características, sendo necessária a análise do sinal no domínio da frequência.

A explicação do método será dividida em duas etapas: obtenção do sinal de conjugado de carga estimado, e o processamento desse sinal para obtenção das componentes que contém informações relevantes sobre a carga do moinho de bolas. As duas etapas são detalhadas a seguir.

### 4.1.1. Estimador do Conjugado de Carga

O sinal estimado do conjugado de carga é obtido como informação parcial de um observador de velocidade. O diagrama de blocos do observador é mostrado na Figura 4.2, para uma entrada de posição angular. Os símbolos  $\omega_r$ ,  $\widehat{\omega_r}$ ,  $T_e$ ,  $\widehat{T}_e$ ,  $T_L$ ,  $\widehat{T}_L$ , J,  $\widehat{f}$ ,  $b \in \widehat{b}$ , são usados para representar, respectivamente, os valores reais e estimados da velocidade angular, conjugados eletromagnético e de carga, momento de inércia e coeficiente de atrito viscoso do conjunto do acionamento.



Figura 4.2 - Modelo em tempo contínuo do observador de velocidade do tipo Luenberguer para entrada em posição angular. Adaptado de (Stopa M. M., 2011)

Como é possível visualizar no diagrama de blocos, as entradas do observador são a posição angular e o conjugado eletromagnético. A posição angular pode ser obtida através da instalação de sensor no rotor do motor de indução, como por exemplo, um encoder. A aplicação também pode ser realizada para um medidor de velocidade. Já o conjugado eletromagnético, que é a outra entrada do observador, pode ser estimado a partir das correntes e tensões de estator, conforme será explicado adiante.

O observador de Luenberguer também pode ser utilizado com um estimador de velocidade, ao invés de posição angular. Nesse caso, algumas alterações são necessárias e a ordem do modelo é reduzida. O esquemático é mostrado a seguir, conforme proposto originalmente por (Stopa & Cardoso Filho, 2008).



Figura 4.3 - Modelo em tempo contínuo do observador de velocidade do tipo Luenberguer para entrada em velocidade (Stopa & Cardoso Filho, 2008)

A escolha pelo observador de posição angular ou observador de velocidade foi realizada de acordo com a disponibilidade de sensores nas plantas utilizadas, conforme mostrado no Capítulo 5.

Para ambas as topologias, são parâmetros necessários ao observador: a constante de inércia do acionamento e o coeficiente de atrito viscoso. A constante de inércia inclui a inércia do próprio motor, além da inércia da carga referida ao eixo do motor. A obtenção desse parâmetro pode ser realizada através do modelamento físico ou mesmo por ensaios no conjunto de acionamento.

O outro parâmetro necessário é o coeficiente de atrito viscoso, que é praticamente nulo para a maioria dos acionamentos. Por esse motivo, ele é considerado nulo ao longo do presente trabalho. Para a implementação, é necessário, ainda, o cálculo dos ganhos responsáveis por garantir a convergência do observador. No observador de posição angular, é necessário calcular os ganhos proporcional, integral e derivativo. Já no observador de velocidade, é necessário calcular apenas os ganhos proporcional e integral. A implementação e o cálculo dos ganhos será demonstrada para o observador de velocidade. No entanto, o mesmo método é utilizado para o observador de posição angular, e toda a implementação detalhada pode ser encontrada em (Stopa M. M., 2011).

No controlador PID mostrado no diagrama da Figura 4.3 os ganhos proporcional e integral são representados, respectivamente, por *bo* e *ko*. A metodologia de alocação de pólos segue técnicas tradicionalmente usadas no projeto de controladores, com o objetivo de garantir a convergência do observador no rastreamento correto da velocidade, garantindo o menor erro possível.

Do diagrama de blocos, é possível obter a função de transferência de 2ª ordem que relaciona a velocidade estimada,  $\widehat{\omega_r}$ , e a velocidade medida,  $\omega_r$ :

$$\frac{\widehat{\omega_r}}{\omega_r} = \frac{Js^2 + b_o s + k_o}{\widehat{J}s^2 + b_o s + k_o}$$
(4.1)

A partir da equação característica dessa função de transferência é realizado o cálculo dos ganhos, seguindo a alocação de pólos proposta por (Stopa & Cardoso Filho, 2008). Os resultados para o rastreamento da velocidade e para o conjugado de carga obtidos originalmente são reproduzidos a seguir, para essa alocação:



Figura 4.4 – Resultados da realimentação de estados para o rastreamento da velocidade e conjugado de carga. Adaptado de (Stopa & Cardoso Filho, 2008).

A dinâmica do observador foi testada em simulação para a aplicação de um degrau de conjugado de carga por cerca de 20 segundos, como pode ser visto na Figura 4.4. Notase que o conjugado de carga atinge rapidamente o valor de referência, após um leve sobressinal. Para o rastreamento da velocidade, nota-se um pequeno tempo de acomodação após a variação da velocidade, durante a aceleração e a desaceleração do motor. Após esse tempo de acomodação, de cerca de 2 segundos, o observador é capaz de rastrear a velocidade com precisão. Com isso, conclui-se que o modelo utilizado apresenta boa estimativa do conjugado de carga em regime permanente e elevada capacidade de rastreamento da velocidade do motor.

Uma vez confirmada a capacidade do observador em rastrear a velocidade e estimar o sinal do conjugado de carga, algumas adequações ainda são necessárias para sua implementação real. A aplicação do L.T.S.A. em hardwares existentes ou mesmo a aplicação *off-line* do método, requer uma versão em tempo discreto do observador. A técnica utilizada é a transformação de primeira ordem conhecida como 'foh' (*first order hold*), conforme proposto por (Stopa M. M., 2011). A técnica realiza a interpolação linear entre duas amostras, e é conhecida como discretização triangular ou invariante à rampa, por não apresentar distorções para esse tipo de entrada (Franklin, Powell, D.J, & Workman, 1997). A relação entre o sinal amostrado e o sinal contínuo é mostrado a seguir:

$$u(t) = u[k] + \frac{t - kT_s}{T_s} (u[k+1] - u[k]), \quad kT_s \le (k+1)T_s$$
(4.2)

Em que u representa o sinal de entrada, t o domínio do tempo, k os instantes de amostragem e Ts o intervalo de tempo entre as amostras.

Para um sistema representado em espaço de estados, temos a seguinte representação contínua no tempo:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$
(4.3)

Em que A,B,C,D representam as matrizes de estado do sistema. O equivalente discreto, após a transformação de primeira ordem, pode ser representado por:

$$x(k+1) = A_d x + B_d u$$

$$y = C_d x + D_d u$$
(4.4)

Para implementação prática da técnica é necessária a representação do observador em matrizes de espaço de estado. Do diagrama de blocos nota-se que o conjugado de carga é uma informação intermediária fornecida pelo observador de velocidade. No caso do LTSA essa é a variável de interesse, uma vez que contém informações sobre o comportamento da carga acoplada ao motor. Com isso, as variáveis de saída são a velocidade estimada e o conjugado de carga. Para variáveis de estado são escolhidos o sinal de erro e a velocidade estimada. As entradas do observador, como também pode ser verificado no diagrama de blocos, são o conjugado eletromagnético e a velocidade medida. A velocidade é obtida através da instalação de um sensor mecânico no eixo do motor e o conjugado é estimado através das correntes e tensões de estator, conforme abordado a seguir. Com isso, a representação em espaço de estados resulta em:

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b_o}{\hat{j}} & -\frac{k_o}{\hat{j}} \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_o}{\hat{j}} & \frac{1}{\hat{j}} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ b_0 & -k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -b_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_e \end{bmatrix}$$

$$(4.5)$$

A discretização analítica requer cálculos matemáticos longos e complexos, e não será aqui representada. O modelo discreto foi obtido após a substituição dos valores numéricos dos parâmetros e será utilizado em todas as análises que se seguem. Após a discretização, foram encontrados erros inferiores a 0,1% na estimativa do conjugado de carga (Stopa & Cardoso Filho, 2008).

Da representação do sistema em espaço de estados, observa-se que o sistema possui duas entradas: velocidade do rotor e conjugado eletromagnético. A primeira pode ser facilmente obtida através da instalação de sensor diretamente no rotor do motor. Já o sinal de conjugado eletromagnético pode ser estimado através das tensões e correntes de estator, como será mostrado a seguir. Essa estimativa é uma das etapas mais críticas do método, uma vez que erros no sinal de conjugado eletromagnético afetam o conjugado de carga estimado.

A estimativa do conjugado eletromagnético é realizada conforme metodologia proposta por (Shin, Hyun, Cho, & Chloe, 2000). A modelagem utiliza a representação das variáveis trifásicas do motor em um sistema de eixos complexos ortogonais estacionários definidos como  $\alpha$  e  $\beta$  e conhecidos como variáveis espaciais. A transformação envolve as relações trigonométricas entre as variáveis e os conceitos matemáticos e físicos são pormenorizados em (Krause, Waysynczuf, & Sudhoff, 2002). A figura a seguir ilustra a 43 transformação das variáveis trifásicas para variáveis espaciais nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , através da definição de um sistema de eixos girantes:



Figura 4.5 - Tranformação de Variáveis Trifásicas para Vetores Espaciais (Adaptado de Matlab, 1994-2014)

De acordo com a representação espacial, as correntes, tensões e enlace de fluxo do estator apresentam o seguinte equiacionamento:

$$\vec{\iota_s} = i_{s\beta} - ji_{s\alpha} \tag{4.6}$$

$$\overrightarrow{v_s} = v_{s\beta} - jv_{s\alpha} \tag{4.7}$$

$$\overrightarrow{\lambda_s} = \lambda_{s\beta} - j\lambda_{s\alpha} \tag{4.8}$$

Os enlaces de fluxo de estator são obtidos através da seguinte integração:

$$\overrightarrow{\lambda_s} = \int \widehat{v_e} \, dt \tag{4.9}$$

$$\overrightarrow{v_e} = v_s - R_s i_s \tag{4.10}$$

Em que  $R_s$  representa a resistência de estator do motor e  $v_e$  é a força contraeletromotriz do motor. A resistência estatórica pode ser facilmente obtida através da realização de testes no motor e é utilizada para o cálculo da força contraeletromotriz, junto das tensões e correntes obtidas através da instalação de sensores na alimentação do motor.

A integração pode ser realizada no domínio da frequência pela aplicação da Transformada de Laplace, tornando-se:

$$\widehat{\lambda_s} = \frac{1}{s} \, (\widehat{\nu_e}) \tag{4.11}$$

No entanto essa integração envolve problemas de desvio e saturação, causados por desvios e *offset* nos sinais de entrada. Para resolver esse problema, o integrador pode ser substituído por um filtro passa baixas (Shin, Hyun, Cho, & Chloe, 2000). O novo valor de enlace de fluxo obtido pode ser representado por:

$$\widehat{\lambda_{sl}} = \frac{1}{s+a} \, (\widehat{v_e}) \tag{4.12}$$

Em que *a* representa o pólo do filtro e  $\widehat{\lambda_{sl}}$  o enlace de fluxo obtido pelo filtro passa baixas. No entanto a substituição do integrador introduz desvios de amplitude e de fase no enlace de fluxo estimado. A figura a seguir mostra os desvios introduzidos:



Figura 4.6- Desvios de amplitude e fase introduzidos pela substituição do integrador por um filtro passa baixas de primeira ordem (Shin, Hyun, Cho, & Chloe, 2000)

Quando a frequência angular do motor é menor que a frequência de corte do filtro o desvio de ângulo é acentuado, por isso a frequência de corte do filtro deve ser muito baixa. Como o motor opera a velocidade variável, a localização do pólo do filtro varia conforme a frequência angular do motor, segundo a equação:

$$a = \frac{|\widehat{w_e}|}{k} \tag{4.13}$$

Em que k é uma constante que deve ser ajustada na faixa de 0 a 3 para um bom desempenho do estimador (Shin, Hyun, Cho, & Chloe, 2000). Para correção dos desvios de amplitude e fase são projetados compensadores de fase e de ganho, a partir das equações analíticas do modelo do motor. Após as devidas correções, o enlace de fluxo estimado e corrigido pode ser representado por:

$$\widehat{\lambda}_{s} = \frac{1}{(s+a)} \frac{\sqrt{\widehat{w_{e}}^{2} + (\widehat{w_{e}}/k)^{2}}}{|\widehat{w_{e}}|} e^{-j\phi_{s}} \widehat{v_{e}}(s)$$

$$(4.14)$$

Essa estimativa é utilizada, junto às correntes de estator, para o cálculo do conjugado eletromagnético estimado:

$$T_e = \frac{3P}{22} \left( \lambda_{S\alpha} i_{s\beta} - \lambda_{s\beta} i_{s\alpha} \right)$$
(4.15)

O conjugado eletromagnético estimado através da Equação 4.15 é usado como entrada do estimador de conjugado de carga, junto da velocidade do motor. Com isso conclui-se a etapa de estimativa do conjugado de carga, restando a descrição da técnica de processamento desse sinal, de forma que esse possa ser utilizado no monitoramento em tempo real da carga em moinhos de bolas. Conforme discutido anteriormente, o processamento se dá no domínio da frequência, e será detalhado na seção a seguir.

#### 4.1.2. Análise Espectral

O processamento do sinal de conjugado de carga estimado no domínio da frequência é a última etapa na aplicação da ferramenta. Conforme discutido anteriormente, o sinal de conjugado de carga estimado contém informações relevantes sobre o comportamento da carga. Espera-se que os parâmetros operativos da carga de um moinho de bolas se manifestem em faixas específicas do espectro do sinal de vibração (Zhao, Feng, & Yuan, 2012). Uma vez que o sinal de vibração apresenta resultados semelhantes ao sinal do conjugado de carga estimado, espera-se que essa correlação entre parâmetros da carga e componentes espectrais também exista para o sinal do conjugado de carga estimado.

Para a conversão do sinal de conjugado de carga estimado ao domínio da frequência são utilizadas técnicas baseadas em Fast Fourier Transform (FFT). Trata-se da mesma técnica empregada nos estudos envolvendo análise do sinal de vibração em moinhos de bolas.

Os resultados foram analisados no domínio da frequência, em relação às suas componentes espectrais, para diversas componentes espectrais. Em primeiro lugar, a análise foi realizada de forma empírica, através da comparação visual entre os espectros dos sinais de conjugado de carga obtidos. A partir da análise visual foram escolhidas as componentes que apresentaram maior sensibilidade à variação dos parâmetros analisados. A amplitude dessa componente é utilizada para caracterização do processo, sendo apresentada como variável de correlação. Os resultados obtidos e um melhor detalhamento dessa etapa são apresentados no Capítulo 5.

### 4.2. Conclusão

Foi apresentada neste capítulo uma descrição da ferramenta L.T.S.A., baseada na análise do sinal do conjugado de carga estimado. O princípio de funcionamento, o projeto e os aspectos de implementação foram abordados e analisados.

O método apresenta maior faixa de passagem que a análise espectral da corrente, que é um dos métodos sugeridos na bibliografia para o monitoramento da carga em moinhos de bolas. Além disso, espera-se que o conjugado de carga apresente resultados que se assemelham à análise vibracional, uma vez que o conjugado de carga, assim como os sensores de aceleração, são sensíveis às oscilações da carga. Por esses motivos, o L.T.S.A. é o método escolhido pelo presente estudo.

O próximo capítulo trata da aplicação da ferramenta L.T.S.A. em moinhos de bolas de laboratório, com o objetivo de avaliar o potencial da ferramenta na detecção de variáveis operacionais da carga.

## **Capítulo 5**

# Aplicação do L.T.S.A. no Monitoramento da Carga em Moinhos de Bolas

No capítulo anterior foi descrita a ferramenta L.T.S.A., conforme proposta originalmente em (Stopa M. M., 2011). A ferramenta é voltada à detecção de faltas em cargas mecânicas rotativas, baseando-se na análise espectral do sinal do conjugado de carga estimado. O presente capítulo trata da aplicação dessa ferramenta ao monitoramento da carga em moinhos de bolas. São apresentados resultados experimentais para testes realizados sob diversas condições operacionais em dois moinhos de bolas em laboratório. Os moinhos possuem tamanhos diferentes, além de utilizarem sensores diferentes para a entrada de posição angular ou velocidade do rotor. O principal objetivo dos testes foi estabelecer correlações entre as variáveis operacionais da carga do moinho e as características espectrais do sinal de conjugado de carga estimado. O comportamento da carga, especialmente em relação aos regimes de operação em catarata e cascata, conforme discutido no Capítulo 2, também foi avaliado. Para validação dos resultados obtidos, foi também realizada a análise da vibração durante a execução dos testes, uma vez que esta é uma ferramenta já consolidada para o monitoramento da carga em moinhos de bolas.

O capítulo é dividido em 3 seções. A seção 5.1 trata da descrição do sistema protótipo, incluindo as características básicas dos sensores e condicionamento de sinais utilizados. A seção 5.2 trata da apresentação dos resultados experimentais obtidos nos moinhos. Por fim, a seção 5.3 trata das conclusões do capítulo.

#### 5.1. Descrição do Sistema Protótipo

Testes foram realizados em dois moinhos de laboratório diferentes, identificados como Moinho I e II. Os moinhos pertencem ao Laboratório de Tratamento de Minérios

(LTM) da UFMG. Foi utilizada a implementação proposta no Capítulo 4 para o L.T.S.A. Um esquemático da montagem é mostrado na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Esquemático do sistema utilizado nos testes com moinhos de laboratório

Da figura é possível perceber que o moinho de bolas encontra-se rigidamente acoplado ao eixo do motor através de um redutor de velocidades. Um módulo de condicionamento de sinais é utilizado para adequação da amplitude dos sinais, que são transmitidos a um computador, onde são realizados os cálculos necessários para a implementação do L.T.S.A. e para a análise vibracional. As etapas de sensoremento e condicionamento dos sinais são detalhadas a seguir, assim como os aspectos práticos da implementação.

A seguir são descritos os sensores utilizados, além do condicionamento dos sinais monitorados e softwares utilizados para implementação do método. Visando à otimização de recursos, buscou-se o aproveitamento dos sensores e componentes já instalados nos moinhos. Os moinhos também possuem inversores de frequência no acionamento, o que permite a alteração da velocidade durante os testes.

Para a análise vibracional e para a implementação do método L.T.S.A. é necessário o monitoramento das seguintes variáveis:

- i. Tensões nas três fases do motor
- ii. Correntes nas três fases do motor
- iii. Velocidade e/ou Posição Angular do Motor
- iv. Vibração da Carga

Para as variáveis elétricas foram utilizados transdutores de efeito Hall da fabricante LEM, sendo o modelo LA55-P para a corrente e o modelo LV25-P para a tensão. O condicionamento dos sinais compreende etapas de atenuação e amplificação, para adequação do sinal a uma faixa de ±5V. A outra etapa de condicionamento é a filtragem anti falseamento, que utiliza um filtro passa baixas, Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte de 2kHz. Para a velocidade foram aproveitados os sensores já instalados nos moinhos, sendo um encoder incremental de 12 bits para o moinho I e um tacogerador WEG TCW-20 para o moinho II. Para o sinal de vibração foi instalado no mancal do moinho o acelerômetro modelo 786A da fabricante *Meggitt Sensing Systems*. A faixa de aceleração é de 0 a 80g, a faixa de frequências de 0,5Hz a 14kHz e a sensibilidade de 100mV/g.

Os sinais dos sensores, após condicionamento, são então conectados a uma placa de aquisição de dados. Foi utilizada a placa de aquisição de dados PCI 6229 da *National Instruments*, com 16 canais A/D diferenciais e uma faixa de entrada de ±5V. O monitoramento dos testes, em tempo real, foi realizado em um programa de instrumentação virtual baseado no software Labview (National Instruments).

A frequência de amostragem utilizada foi de 250kHz. A frequência e o tempo de armazenamento dos dados podem ser ajustados pelo usuário na interface do programa. Os sinais monitorados são salvos em um formato compatível com a utilização em outros softwares.

Para cada teste foram realizadas três ensaios durante um intervalo de dez segundos. Os resultados apresentados nas seções seguintes representam a média aritmética dos resultados espectrais obtidos nos três testes. O processamento dos dados foi realizado em um programa desenvolvido em Matlab, que implementa as operações requeridas pelo método L.T.S.A. O programa é utilizado para obtenção do conjugado de carga estimado e do espectro de frequência dos sinais de conjugado estimado e vibração da carga, através de técnicas de FFT.

Uma vez obtido o espectro de frequência do conjugado de carga estimado, é necessário obter as componentes que possuem informações relevantes sobre a carga do moinho. Conforme discutido no Capítulo 3, tanto para a análise acústica quanto para a análise vibracional, a obtenção das componentes espectrais que possuem correlação com as variáveis operacionais da carga é realizada de forma empírica.

Com o objetivo de encontrar indicadores que apresentem sensibilidade à variação dos parâmetros da carga, foram analisadas as amplitudes e a energia das componentes espectrais características nos sinais de conjugado de carga estimado e de vibração. Para cada velocidade de teste foi escolhida uma componente ou faixa espectral característica, cuja amplitude ou energia pode ser utilizada para caracterização da carga.

# 5.2. Resultados Experimentais

# 5.2.1. Moinho I

A bancada de testes do Moinho I compreende um moinho de bolas de 20cm de diâmetro acionado por um conjunto de motor, redutor e inversor de frequência. A montagem é mostrada na Figura 5.2.



Figura 5.2 - Montagem Experimental do Moinho I com diâmetro de 20cm

Os parâmetros do moinho, do minério, das bolas e do acionamento são mostrados na Tabela 5.1.

Parâmetro	Valor
Diâmetro do Moinho (m)	0,2032
Comprimento do Moinho (m)	0,3048
Volume do Moinho (L)	9,884
Potência do Motor (hp)	1,5
Polos do Motor	4
Faixa do Inversor (rpm)	0 a 1800
Fator de redução	15
Diâmetro Máximo das Bolas (m)	0,0015
Densidade Relativa do Minério	1,6

Tabela 5.1 - Parâmetros físicos do Moinho I

A densidade relativa é aqui definida como a razão entre a densidade das bolas de aço e a densidade do minério, medida experimentalmente no laboratório.

Conforme o equacionamento proposto no Capítulo 2, sabe-se que o enchimento do moinho depende do volume e da massa das bolas. Já a velocidade crítica depende das dimensões do moinho. A partir das equações apresentadas obtém-se que, para o enchimento total do moinho, são necessários 29,20kg de bolas. A velocidade crítica é calculada como 94,19 rpm. Considerando-se o fator de redução de velocidade do redutor mecânico, sabe-se que, na velocidade crítica, o motor opera a 1412,79rpm. Por simplicidade, todas as velocidades a seguir serão referenciadas ao eixo do motor.

Para definição das cargas e velocidade dos testes foram utilizadas as características operacionais recomendadas para moinhos de bolas e conforme sugeridas por (Beraldo, 1987). A faixa de enchimento recomendada é entre 10% a 50%, o que equivale a uma carga de bolas entre 2,92 kg e 14,59 kg. A faixa de velocidade de operação deve estar entre 65% a 80% da velocidade crítica, ou seja, de 918,31 rpm a 1130,23 rpm. Foram realizadas três séries de testes, com enchimentos diferentes e localizados dentro da faixa de operação do moinho. Para cada série de testes, variou-se a velocidade de operação desde valores inferiores até alguns superiores à velocidade crítica, em seis testes. A velocidade variou de 1000 rpm a 1750 rpm, o que corresponde a uma faixa de 71% a 124% da velocidade crítica. Uma carga de minério de 1,00kg foi colocada no moinho apenas para amortecer o impacto das bolas na carcaça, sem a presença de água. A granulometria do material escolhido já estava bem fina, uma vez que o objetivo não foi o de avaliar a quebra do material, mas sim o do enchimento. As informações sobre as cargas dos testes são mostradas a seguir, na Tabela 5.2:

Série	Carga de Bolas (kg)	Enchimento (%)	Preenchimento Intersticial (%)
A	4,00	14	100
В	6,00	20	67
С	8,00	27	50

Tabela 5.2 – Cargas das séries de testes realizadas no Moinho I

O espectro característico para os sinais de conjugado de carga estimado e vibração é mostrado na Figura 5.3. Para ambos os sinais é possível observar a presença de componentes em praticamente toda a distribuição do espectro.



Figura 5.3- Espectro de frequências para o conjugado de carga e vibração do Moinho I. Carga de bolas = 4kg; Carga de minério = 1kg

A faixa de interesse é aquela na qual se manifestam as componentes que possuem informações relevantes sobre a carga do moinho e as características operacionais do moinho. Experimentalmente foi possível identificar que as componentes localizadas entre 250Hz e 350Hz possuem relação com a velocidade angular do moinho. Os resultados dos testes com uma carga de 4kg de bolas e 1kg de minério são mostrados na Figura 5.4, para essa faixa do espectro. Essa parte do espectro é considerada característica, uma vez que alterações na carga não afetam a localização das frequências de pico, apenas suas amplitudes.



Figura 5.4 - – FFT típica para os sinais de conjugado de carga (a) e vibração (b) para o Moinho I. Carga de bolas = 4kg; Carga de minério = 1kg

Da Figura 5.4, percebe-se que os sinais de conjugado de carga e vibração apresentam o mesmo comportamento em relação à localização das frequências de pico, conforme esperado. Percebe-se, ainda, uma relação entre a variação da velocidade do motor e a localização das componentes de pico. O aumento de 150 rpm na velocidade do motor desloca a frequência de pico em 30 Hz no espectro, como pode ser visto na Tabela 5.3, que detalha a velocidade do motor e a localização das componentes características. Os valores mostrados são representativos para todas as séries e independentes da carga do moinho.

Velocidade do Motor (rpm)	% da Velocidade Crítica	Localização da componente característica (Hz)	Localização da componente característica (rpm)
1000	71	201,2	12072
1150	81	230,6	13836
1300	92	260,0	15600
1450	103	290,2	17412
1600	113	320,5	19230
1750	124	350,0	21000

Tabela 5.3 - Relação entre velocidade do motor do moinho e componente espectral característica

Comparando-se a velocidade do motor com a localização da componente espectral característica, ou seja, dividindo-se a última coluna pela primeira, percebe-se que a frequência característica manifesta-se como um harmônico de ordem doze da velocidade do motor. Como o fator de redução para a velocidade do moinho é de quinze vezes, conclui-se que a componente característica encontrada é de cento e oitenta vezes a velocidade do moinho. Ou seja, a frequência característica oscila cento e oitenta vezes mais rápido que a rotação do moinho. Uma vez que para uma única rotação do moinho ocorrem diversos impactos da carga com a carcaça, a expectativa é que a componente espectral que carrega informações sobre a carga, ou seja, a componente característica, realmente seja maior que a frequência de rotação do moinho. No entanto, como se trata de um processo em que é difícil prever o comportamento da carga, não é possível apresentar uma justificativa teórica para o valor encontrado.

O próximo passo é avaliar como a variação do enchimento do moinho afeta a amplitude das componentes características dos sinais de conjugado de carga e vibração. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Variação da amplitude da frequência de pico para diferentes velocidades do motor e cargas do moinho.

Da Figura 5.5 percebe-se que os sinais de vibração e conjugado apresentam resultados com as mesmas características e tendências. Verifica-se que, para ambos os sinais, a amplitude decresce com o aumento da velocidade até os 1300 rpm. Na velocidade de 1450 rpm, as amplitudes de pico tendem a se igualar. A hipótese é que, como na velocidade crítica o material começa a centrifugar dentro do moinho, reduz-se o impacto de bolas na carcaça. Como a amplitude é função da quantidade e intensidade do impacto das bolas na carcaça, temos que, na velocidade crítica, a amplitude deve se manter aproximadamente fixa, independente da carga do moinho, já que não há impacto de bolas na carcaça pois o material centrifuga. Os valores não apresentam-se exatamente iguais, pois a velocidade medida foi de 1450 rpm, superando em aproximadamente 3% o valor da velocidade crítica.

Quando se ultrapassa a velocidade crítica, com 1600 rpm, ocorre uma inversão na ordem decrescente das amplitudes, e a amplitude de pico torna-se inversamente proporcional à carga de bolas. Ou seja, quanto maior a carga de bolas menor é a amplitude de pico dos sinais. Finalmente, aumentando a velocidade do motor para 1750 rpm, ocorre uma nova inversão da ordem decrescente das amplitudes, que se torna: Série B, Série C, Série A. Todos os fatos descritos são comuns às análises utilizando os sinais de vibração e de conjugado de carga. Da análise dos resultados também fica claro que ambos os métodos apresentam os mesmos resultados para alterações no enchimento do moinho.

## 5.2.2. Moinho II

A bancada de testes do Moinho II possui um moinho de volume seis vezes maior que o primeiro. Outra característica que o diferencia é o fato de possuir comprimento próximo ao tamanho do diâmetro. A montagem é mostrada na Figura 5.6.



Figura 5.6 - Montagem Experimental do Moinho II com diâmetro de 46cm

Os parâmetros do moinho, do minério, das bolas e do acionamento são mostrados na Tabela 5.4:

Parâmetro	Valor
Faiametro	Valui
Diâmetro do Moinho (m)	0,460
Comprimento do Moinho (m)	0,360
Volume do Moinho (L)	59,800
Potência do Motor (kW)	2,200
Pólos do Motor	4
Faixa do Inversor (rpm)	0 a 1800
Fator do Redutor	31
Diâmetro Máximo das Bolas (m)	0,0040
Densidade Real das Bolas (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Densidade Aparente do Minério (kg/m <sup>3</sup> )	2396

Tabela 5.4 - Parâmetros físicos do Moinho II

A densidade das bolas é fornecida pelo fabricante, e a densidade aparente do minério foi medida experimentalmente no laboratório. Assim como na montagem anterior, foram realizados testes com diferentes enchimentos e velocidades de operação. Adicionalmente, variou-se a carga de minérios e a porcentagem de sólidos do moinho, através da adição de água no interior. No total foram realizadas dez séries de teste, contemplando a variação dos parâmetros já citados. Para cada série foram realizados testes em quatro velocidades diferentes, sendo as seguintes velocidades referenciadas ao motor: 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz.

As tabelas contendo as informações sobre os testes são mostradas a seguir:

Série	Carga de Bolas (kg)	Carga de Minério (kg)	Enchimento	Volume de Água (L)	Porcentagem de Sólidos (%)
Α	14	5	5	0	100
В	28	5	10	0	100
С	42	5	15	0	100
D	56	5	20	0	100
Е	70	5	25	0	100
F	84	5	30	0	100
G	84	10	30	0	100
Н	84	15	30	0	100
I	84	15	30	3,75	80
J	84	15	30	6,43	70

Tabela 5.5 - Cargas das séries de testes realizadas no Moinho II

Os espectros característicos para os sinais de conjugado de carga estimado e vibração são mostrados na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Espectro de frequências para o conjugado de carga (a) e para a vibração (b) do Moinho II. Velocidade do motor = 10Hz; Carga de bolas = 14kg; Carga de minério = 5kg

Pode-se perceber que o espectro do sinal de vibração apresenta características semelhantes ao espectro do conjugado de carga, com componentes espectrais de pico em localizações semelhantes. Sabe-se que as componentes superiores a 4000Hz estão relacionadas com o chaveamento do inversor de frequência e não possuem relação com a carga do moinho. Por isso a faixa de interesse é limitada às frequências inferiores a 4000Hz.
Conforme apresentado na seção anterior, para os testes realizados no Moinho I, foi possível a identificação de uma componente característica com a velocidade e a carga do moinho. Já nos testes realizados no Moinho II não foi possível a identificação dessa componente característica. Ao invés de apresentar apenas uma componente, os testes apontam para uma faixa característica, localizada entre 800Hz e 1200Hz. Assim como ocorreu para o Moinho I, essa faixa é característica para determinada velocidade. A Figura 5.8 mostra como é a distribuição das componentes características ao longo do espectro, para a faixa de interesse. O espectro é chamado de característico pois a localização das componentes com amplitude significativa se repete para qualquer carga do moinho nessa velocidade, não sofrendo alteração da localização. Ou seja, dentro dessa faixa, para diferentes condições operacionais, apenas a amplitude é alterada, mantendo-se a localização e distribuição espectral.



Figura 5.8 - FFT típica para os sinais de conjugado de carga e vibração do Moinho II. Carga de bolas = 14kg; Carga de minério = 5kg

Para a menor velocidade testada, de 10Hz, pode-se perceber a presença de quatro componentes de pico, centradas em 1000Hz. O aumento da velocidade do motor altera as componentes de pico. No entanto, estas permanecem centradas em 1000 Hz para todas as velocidades testadas, como pode ser visto na Tabela 5.6. No único teste acima da velocidade crítica, com 40Hz no motor, percebe-se a ocorrência de diversas componentes de pico espalhadas no espectro, todas com amplitudes semelhantes. Nessa velocidade, sabe-se que a maior parte das bolas centrifugam dentro do moinho. A hipótese é que esse distribuição espectral altamente dispersa se deva à esse comportamento centrífugo das bolas no interior do moinho, gerando impactos aleatórios, numa condição de operação indesejada.

Velocidade do Motor (Hz)	% da Velocidade Crítica	Localização das componentes (Hz)
10	29,6	970
		990
		1010
		1030
20	59,3	970
		1000
		1030
30	88,9	1030
		940
		1060
		900
40	118,6	1100

Tabela 5.6 - Localização das componentes de pico para diversas velocidades do motor

Como pode ser visto na Tabela 5.6 e na Figura 5.8, existe mais de uma componente característica para cada velocidade de operação. Por isso, não é possível avaliar apenas a amplitude, como foi feito para o Moinho I. A solução utilizada foi a realização do cálculo da energia espectral média da faixa característica. Para tal, foi utilizada ferramenta computacional do programa Matlab, através do comando denominado *'bandpower'*. Resultados obtidos para a faixa característica, entre 800Hz e 1200Hz, não apresentaram coerência entre os sinais de vibração. A solução utilizada foi ampliar a faixa característica, para valores entre 100Hz e 1200Hz. Uma vez que vibração e conjugado de carga possuem unidades diferentes, a energia da faixa característica é analisada como porcentagem da energia total, facilitando a comparação dos sinais. A análise foi realizada em três etapas, com variação das seguintes variáveis: enchimento, carga de partículas e porcentagem de sólidos.

A Figura 5.9 mostra como a energia contida na faixa característica é alterada com o enchimento do moinho. É possível perceber que o aumento da velocidade provoca um aumento da parcela de energia contida entre 100Hz e 1200Hz. Isso ocorre pois, com o aumento da velocidade de rotação, maior energia cinética é transmitida aos corpos no interior do moinho. Ao ultrapassar a velocidade crítica, percebe-se um incremento ainda maior nessa energia. A hipótese é de que, como grande parte das bolas centrifuga nessa velocidade, menor energia é gasta com impacto e abrasão, elevando a parcela energética contida na faixa característica. No entanto, trata-se de uma condição operacional indesejada, uma vez que o comportamento centrífugo das bolas não gera moagem efetiva. Novamente, os sinais de conjugado de carga e vibração apresentam comportamento semelhante, com o crescimento dos indicadores com o aumento da velocidade do motor. Apesar do comportamento energético dos sinais ocorrer conforme o esperado, não foi possível encontrar informações capazes de fornecer uma indicação precisa do enchimento do moinho.



Figura 5.9 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do motor e enchimentos do moinho.

A Figura 5.10 mostra o comportamento da energia na faixa característica para alteração na carga de partículas do moinho. Como o aumento da carga de partículas no moinho eleva-se o preenchimento intersticial, o que amortece os impactos. Para velocidades abaixo da velocidade crítica, verifica-se um leve decréscimo nos níveis de energia em comparação com os testes com menores cargas de minério. Para velocidades acima da velocidade crítica não ocorre esse decréscimo, uma vez que grande parte da carga centrifuga, reduzindo o amortecimento, uma vez que praticamente não há impacto. Novamente, observa-se que a energia tem um comportamento crescente com a elevação da velocidade do motor.



Figura 5.10 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do motor e cargas de partículas no moinho.

A Figura 5.11 avalia o comportamento da energia na faixa característica para variação na porcentagem de sólidos no moinho. Para alteração da porcentagem de sólidos foi adicionada água no interior do moinho, numa condição em que o material é denominado polpa. Novamente pode ser observada uma elevação da energia com o aumento da velocidade na faixa característica. No entanto, para a velocidade de 40Hz, acima da velocidade crítica, não houve um acréscimo tão grande quanto nos outros testes. Enquanto nos testes a seco e acima da velocidade crítica houve uma concentração de 2% a 14% da energia na faixa característica, na presença de água esses valores não ultrapassam os 4,5%. Isso ocorre pois, a adição de água provoca uma modificação no meio de moagem, que passa a ser mais viscoso, o que gera perda energética. Apesar dos resultados encontrados apresentarem-se de acordo com o esperado, não foi possível encontrar um padrão que relacione numericamente a porcentagem de sólidos com o comportamento energético do sistema dentro da faixa característica.



Figura 5.11 - Variação da energia espectral contida na faixa característica para diferentes velocidades do motor e porcentagem de sólidos no moinho.

#### 5.3. Conclusão

Foi desenvolvido um estudo envolvendo a aplicação da ferramenta L.T.S.A. para o monitoramento de variáveis operacionais da carga em moinhos de bolas. O sensoriamento básico e as características das montagens foram descritos. Os resultados experimentais foram apresentados e analisados para dois moinhos de bolas de laboratório.

A partir dos resultados apresentados pelos Moinhos I e II pode-se dizer que o L.T.S.A. apresentou comportamento muito semelhante à análise vibracional, ferramenta normalmente utilizada nessa aplicação. Os resultados obtidos apresentaram coerência física com alguns fenômenos que ocorrem em um moinho de bolas. No entanto, não foi possível detectar um padrão que permita uma correlação numérica com as variáveis operacionais da carga. Ou seja, os resultados alcançados mostram que os sinais obtidos são sensíveis à variações nas condições da carga, no entanto, é necessário um aprimoramento do tratamento de dados para a obtenção de indicadores precisos.

### **Capítulo 6**

# Conclusões e Proposta de Continuação

A proposta do trabalho foi a de aplicar o método L.T.S.A. para o monitoramento da carga em moinhos de bolas. A importância e a motivação desse estudo foram apresentadas no Capítulo 1.

A descrição do equipamento, assim como suas variáveis de operação, foram apresentadas no Capítulo 2. Ênfase foi dada às variáveis relacionadas à movimentação da carga, assim como seu efeito nos mecanismos de quebra. Ressalta-se a importância do monitoramento dos parâmetros da carga para a manutenção das condições otimizadas de operação durante o processo.

Motivado pela importância do monitoramento da carga, discutida no Capítulo 2, o Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre técnicas voltadas ao monitoramento da carga em moinhos de bolas. Dentre diversas técnicas encontradas na literatura, conclui-se que a análise vibracional e o uso de variáveis elétricas do motor de acionamento são as técnicas que apresentam melhores resultados experimentais para o monitoramento da carga em moinhos de bolas. As técnicas que utilizam variáveis elétricas do motor não demandam a instalação de sensores adicionais, uma vez que as variáveis do motor são comumente monitoradas para fins de controle e monitoração. Trata-se de uma das principais vantagens dos métodos que utilizam as variáveis elétricas do motor. Dentre esses, destaca-se o L.T.S.A., baseado na análise do sinal do conjugado de carga estimado. O método apresenta maior faixa de passagem que a análise espectral da corrente, um dos métodos sugeridos na bibliografia para o monitoramento da carga em moinhos de bolas. Além disso, espera-se que o conjugado de carga apresente resultados que se assemelham à análise vibracional, uma vez que o conjugado de carga, assim como os sensores de aceleração, são sensíveis às oscilações da carga. Por esses motivos, o L.T.S.A. foi o método escolhido no estudo presente.

A implementação do L.T.S.A. foi abordada no Capítulo 4, conforme proposto originalmente por (Stopa M. M., 2011). Destaca-se a modelagem do motor de indução para

a obtenção do conjugado de carga estimado. Como sinais de entrada, são usadas as correntes e tensões de estator, além da posição angular ou velocidade do rotor. Todos esses sensores são comumente instalados em moinhos de bola de grande porte. Para a implementação do método são necessários os seguintes parâmetros do motor: coeficiente de atrito viscoso, constante de inércia, e a resistência de estator. O primeiro é muito pequeno para a maioria dos acionamentos, sendo considerado nulo no presente trabalho. O segundo pode ser obtido através de ensaios no conjunto de acionamento e da modelagem física e geométrica da carga. No entanto, o desgaste do revestimento, desgaste dos corpos moedores e alterações na alimentação de partículas podem levar a alterações na massa da carga, o que torna a constante de inércia um parâmetro não constante para um moinho de bolas, o que pode elevar a imprecisão do método.

Por fim, no Capítulo 5, realiza-se um estudo de caso onde se aplica o L.T.S.A. para o monitoramento da carga em dois moinhos de bolas de laboratório com tamanhos diferentes. Para validação dos resultados obtidos, a ferramenta é aplicada junto com a análise vibracional. Verifica-se que, no domínio da frequência, o L.T.S.A. apresenta resultados semelhantes ao sinal de vibração para os dois moinhos. Ao apresentar resultados similares ao de uma técnica já reconhecida, o L.T.S.A. apresenta-se como uma ferramenta promissora no monitoramento da carga de moinhos de bolas. No entanto, não foi possível obter uma medição precisa dos parâmetros da carga, seja através do sinal de vibração ou através do conjugado de carga estimado. Conclui-se que, embora o L.T.S.A. se mostre sensível aos parâmetros da carga do moinho, melhorias precisam ser feitas no processamento desse sinal. Para o desenvolvimento dessas melhorias dois caminhos se mostram possíveis: a execução de mais testes e o aprofundamento teórico nos estudos dos fenômenos envolvidos na movimentação da carga. Dessa forma, as características do sinal espectral que são sensíveis às modificações da carga podem ser previstas e evidenciadas, contribuindo para a modelagem de um sistema de monitoramento que apresente resultados precisos.

#### 6.1. Proposta de Continuação

O trabalho até aqui realizado resultou na avaliação da aplicação do método L.T.S.A. para o monitoramento de parâmetros relacionadas à carga de moinhos de bolas de laboratório. Embora tenha sido possível evidenciar fenômenos que mostram que o sinal do conjugado de carga estimado possui informações relevantes sobre a carga do moinho, não foi possível estabelecer uma relação direta que possibilite a medição dos parâmetros com precisão. A continuação do trabalho deve contemplar:

- Avaliação de outras ferramentas de análise espectral para a obtenção de indicadores sobre as características da carga;
- ii. Aprofundamento dos estudos teóricos para obtenção de um modelo matemático do processo que permita a obtenção de uma correlação física para as frequências características;
- iii. Incorporação do modelo do motor aos softwares de modelamento do comportamento da carga para simulação completa do processo;
- iv. Avaliação do impacto da variação da constante de inércia na obtenção do conjugado estimado;
- v. Obtenção de um modelo variável para a constante de inércia do moinho de acordo com alterações na carga, revestimento interno e desgaste das bolas;
- vi. Aplicação da ferramenta L.T.S.A. em outros tipos de moinhos tubulares, como autógenos e semi autógenos;
- vii. Melhoria nos modelos de medição e nos sensores utilizados, com vista à melhoria da qualidade das medições e das incertezas associadas.

Além disso, a realização de testes de campo em plantas reais também se apresenta como uma possibilidade.

## 6.2. Publicações decorrentes do trabalho

Esteves, P.; Stopa, M.; Cardoso Filho, B.; & Galery, R. (2014). Charge Behavior Analysis in Ball Mill by Using Estimated Torque. Proceedings of *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, pp. 1-7. Vancouver, Canada.

Esteves, P.; Stopa, M.; Cardoso Filho, B.; & Galery, R. (2014). Development of an aid tool for fault detection in ball mills. Proceedings of *International Mineral Processing Congress*. Santiago.

Esteves, P.; Stopa, M.; Cardoso Filho, B.; & Galery, R. (2015). Charge Behavior Analysis in Ball Mill by Using Estimated Torque. *IEEE Transactions on Industry Applications, 51*, pp. 2600 - 2606.

Esteves, P.; Stopa, M.; Galéry, R.; Mazzinghy, D.B., Russo, J.F.C. (2016). Relação entre potência elétrica e enchimento de carga moedora em moinhos verticais. Anais do *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Vol. 2, pp. 154-161.* Poços de Caldas, Brasil.

## **Referências Bibliográficas**

- Alves, V. K. (2006). Otimização de carga moedora utilizando ferramenta de modelagem matemático e simulação de moagem. Belo Horizonte: Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalurgica, de Materiais e de Minas da UFMG.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R., & Luckie, P. T. (1984). *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling.* Nova York: Society of Mining Engineers.
- Baccarini, L. M. (2005). *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Máquinas de Indução*. Belo Horizonte: Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Fonte: http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/857D.PDF
- Behera, B., Mishra, B. K., & Murty, C. V. (2007). Experimental analysis of charge dynamics in tumbling mills by vibration signature technique. *Minerals Engineering*, 20, pp. 84-91.
- Beraldo, J. L. (1987). *Moagem de Minério em Moinhos Tubulares.* São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA.
- Carvalho, R., & Tavares, M. (2012). Modelagem Mecanicista da Moagem. *Painel PEMM UFRJ.* Rio de Janeiro.
- Das, S. P., Das, D. P., Behera, S. K., & MIshra, B. K. (2011). Interpretation of mill vibration signal via wireless sensing. *Minerals Engineering*, *24*, pp. 245–251.
- Digital Control Lab. (2003). MillScan DSP2000 Installation Manual. Gainesville.
- Esteves, P., Stopa, M., Cardoso Filho, B., & Galery, R. (2014). Development of an aid tool for fault detection in ball mills. *Proceedings of International Mineral Processing Congress, Chapter 8.* Santiago, Chile.
- Esteves, P., Stopa, M., Cardoso Filho, B., & Galery, R. (2015). Charge Behavior Analysis in Ball Mill by Using Estimated Torque. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51, pp. 2600 - 2606.
- Franklin, G. F., Powell, D.J, D. J., & Workman, M. L. (1997). *Digital Control of Dynamic Systems*. Prentice Hall.

- Gugel, K., & Moon, R. (2007). Automated Mill Control using Vibration Signal Processing. Proceedings of IEEE Charleston World Cement Conference, (pp. 17 - 25). Charleston, SC.
- Gugel, K., Palacios, G., Ramirez, J., & Parra, M. (2003). Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing (DSP) technology. *Proceedings of Cement Industry Technical Conference*, (pp. 311-318).
- Inc, M. M. (2003). Continuos Charge Monitoring Manual. Canada. Acesso em 15 de September de 2015, disponível em http://www.metso.com/miningandconstruction/Matobox7.nsf/4e3187cb23562 5e4c225676800391313/2c0a166cca299937c1256d32002ce3a6/\$FILE/CCM\_br ochure\_2003.pdf
- Krause, P. C., Waysynczuf, O., & Sudhoff, S. D. (2002). *Analsys of Electric Machinery and Drive Systems.* Piscataway, NJ, United States: IEEE Press.
- Marmolejo, R. N. (2011). *Análisis de utilización de motores de inducción de rotor bobinado en el accionamiento de un molino de bolas.* Santiago: Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista en Universidad de Chile.
- Matlab. (1994-2014). Matlab R2014A Help Manual. United States: The MathWorks Inc.
- Mazzinghy, D. B. (2009). Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem Através da Determinação dos Parâmetros de Quebra e da Energia Específica de Fragmentação.
  Belo Horizonte: Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalurgica, de Materiais e de Minas da UFMG.
- Melero, M. G.; Cano, J. M.; Norniella, J.; Pedrayes, F.; Cabanas, M. F.; Rojas, C. H.; Alonso, G.; Aguado, J. M.; Ardura, P. (2014). Electric motors monitoring: An alternative to increase the efficiency of ball mills. *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality.* Córdoba.
- Metso. (09 de Setembro de 2015). Fonte: Metso: http://www.metso.com.br/produtos/moagem/moinho-de-bolas/
- Mishra, B. K., & Rajamani, R. K. (1992). Analysis of Media Motion in Industrial Ball Mills.
  Em S. K. Kawatra, *Comminution Theory and Practice* (pp. 426-440). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Mohanty, S., Gupta, K., & Raju, K. (2015). Effective Sample Length Selection to Avoid Dead Zone Effect in Ball Mill Vibration Signal Analysis and Applications. *Proceedings of International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN).*

- Oliveira, R. d. (2012). Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas. *Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais*.
- Ortega, L. A., Reyes, W. V., Olivares, J. P., Bacigalupo, E., Lambert, C., & Villalobos, G. (2005). Patente Nº US 6874366 B2.
- Peng, H., Min-ping, J., & Bing-lin, Z. (2009). Investigation on measuring the fill level of an industrial ball mill based on the vibration characteristics of the mill shell. *Minerals Engineering*, 22, pp. 1200–1208.
- Pontt, J. (2004). MONSAG: A new monitoring system for measuring the load filling of a SAG mill. *Minerals Engineering, 17*, pp. 1143–1148.
- Pontt, J. (2010). High-power drives for energy efficiency and abatement of carbon emissions in mineral processing. *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology.*
- Pontt, J.; Rodriguez, J.; Valderrama, W.; Sepulveda, G.; Chavez, P.; Cuitino, B.; Gonzalez, P.; Alzamora, G. (2003). Current issues on high-power cycloconverter - fed gearless motor drives for grinding mills. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Eletronics.*
- Shin, M., Hyun, D.-S., Cho, S.-B., & Chloe, S.-Y. (2000). An Improved Stator Flux Estimation for Speed sensorless Stator Flux Orientation Control for Induction Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 312-318.
- Si, G., Hui, C., Zhang, Y., & Jia, L. (2009). Experimental investigation of load behaviour of an industrial scale tumbling mill using noise and vibration signature techniques. *Minerals Engineering*, 22, pp. 1289–1298.
- Stopa, M. M. (2011). Detecção de Anomalias em Cargas Rotativas Utilizando o Motor de Indução como Estimador de Conjugado. Belo Horizonte: Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Fonte: http://www.ppgee.ufmg.br/tese\_defesas\_listagem.php
- Stopa, M. M., & Cardoso Filho, B. (2008). Online Torque and Drawing Force Estimation in Wire Drawing Process From Electric Motor Variables. *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 915-922.

- Stopa, M. M., Filho, B. J., & Lage, B. O. (2010). An Evaluation of the MCSA Method When Applied do Detect Faults in Motor Driven Loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 10, pp. 760-765.
- Tang, J., Chai, T., Wen , Y., & Zhao, L. (2013). Modeling Load Parameters of Ball Mill in Grinding Process Based on Selective Ensemble Multisensor Information. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 726-740.
- Tang, J., Tianyou, C., Wen, Y., & Lijie, Z. (2012). Feature extraction and selection based on vibration spectrum with application to estimating the load parameters of ball mill in grinding process. *Control Engineering Practice*, 20, pp. 991–1004.
- Tano, K. (2005). Continuous Monitoring of Mineral Processes with Special Focus on Tumbling Mills - A Multivariate Approach. Luleå: Doctoral Thesis - Department of Chemical Engineering and Geosciences in Luleå University of Technology.
- Vermeulen, L., Ohlson de Fine, M. J., & Schakowski, F. (1984). Physical information from the inside of a Rotary Mill. *Journal Of The South African Institute Of Mining And Metallurgy*, pp. 247-253.
- Xiao, H., Zhao, L.-J., & Diao, X.-K. (2010). Operating Condition recognition in Ball Mill based on Discriminant PLS. *Proceedings of Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS).*
- Zeng, Y., & Forssberg, E. (1994). Application of Vibration Signal Measurement for Monitoring Grinding Parameters. *Mechanical System and Signal Processing*, 8, pp. 703-713.
- Zhao, L., Feng, X., & Yuan, D. (2012). Soft Sensor Modeling Based on Feature Selection using Synergy Interval PLS. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 44, pp. 64-72.
- Zhi-gang, S., Pei-hong , W., Xiang-jun, Y., & Zhen-zhong, L. (2008). Experimental investigation of vibration signal of an industrial tubular ball mill: Monitoring and diagnosing. *Minerals Engineering*, 21, pp. 699–710.