

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA DENSIDADE DA
POLPA DE MINÉRIO DE FERRO NO PROCESSO DE COMINUIÇÃO EM
MOINHOS DE BOLAS**

Belo Horizonte
2024

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA DENSIDADE DA
POLPA DE MINÉRIO DE FERRO NO PROCESSO DE COMINUIÇÃO EM MOINHOS
DE BOLAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

Coorientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

Área de concentração: Projeto e Fabricação.

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L234d	Lamon, Geraldo Pedro da Silva Desenvolvimento de um sistema de controle da densidade da polpa de minério de ferro no processo de cominuição em moinhos de bolas / Geraldo Pedro da Silva Lamon. Belo Horizonte, 2024. 147 f. : il. Orientador: Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior Coorientador: José Rubens Gonçalves Carneiro Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 1. Mineração. 2. Minérios de ferro. 3. Beneficiamento de minério. 4. Minérios de ferro - Densidade. 5. Modelos matemáticos. 6. Moinho de bolas. 7. Moagem (Beneficiamento de minério). 8. Cominuição (Beneficiamento de minério). 9. Engenharia de minas. I. Magalhães Júnior, Pedro Américo Almeida. II. Carneiro, José Rubens Gonçalves. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título. SIB PUC MINAS CDU: 622.7
-------	--

Geraldo Pedro da Silva Lamon

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA DENSIDADE DA
POLPA DE MINÉRIO DE FERRO NO PROCESSO DE COMINUIÇÃO EM MOINHOS
DE BOLAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Pedro Américo A. Magalhães Junior (Orientador)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (Co-orientador)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel (Membro Externo)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Rudolf Huebner (Membro Externo)
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro (Membro Interno)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Prof. Dr. Luis Henrique Maia (Membro Interno)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 31 de julho de 2024

Aos meus três filhos, Rodrigo Lamon, Gustavo Lamon, Vinicius Lamon e minha esposa Vera Lúcia Lamon, pela paciência e compreensão em permitir que entrasse nessa nova empreitada e jornada com a meta de alcançar novo objetivo e título.

“O homem é o que pensa. Se você insistir em pensar no mal, na dor, na doença, sem produzir nada, você as atrairá para si. Pensa na saúde, na alegria, na prosperidade, então sua vida tomará novo rumo. Afirma sempre que é feliz, que as dores, as injustiças passam, que a saúde se consolida cada vez mais e, a felicidade baterá a sua porta. Seja otimista e permaneça trabalhando, sempre ligado às energias da natureza cósmica e na sua própria energia”.

Autor desconhecido.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à PUC Minas, do Instituto Politécnico da Universidade Católica de Minas Gerais, por ter me concedido o título de engenheiro em 1971.

Agradeço aos professores do departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas, pelas brilhantes e essenciais contribuições acadêmicas para minha formação e ampliar meus conhecimentos. Toda minha admiração, respeito e gratidão a eles.

Ao professor, doutor e orientador Pedro Américo Magalhães, por suas aulas brilhantes, seu trabalho sempre estimulante, encorajador, que com muito zelo e injeção de ânimo, com sofreguidão e entusiasmo, sempre me motivou e estimulou a levar avante minhas ideias, os projetos, e agora, este estudo. Foi o Professor Pedro Américo quem mais acreditou, desde o início de nossas coloquiais conversas, na relevância deste trabalho. Ele nunca admitiu que eu pensasse em desanimar ou desistir, o que, vez ou outra, aconteceu em decorrência de correntes contrárias à minha pretensão na academia.

Agradeço ainda mais efusivamente, ao professor Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, por ter aceitado com sua experiência na área de estudo, desenvolvimentos de projetos mecânicos, fabricação e operação estruturada, em participar como Coorientador desta investigação.

Aos colegas que ainda continuam na busca do título, saudades e um lembrete; nunca deixem de serem estudantes.

Agradeço aqueles que também, direta ou indiretamente contribuíram com seu apoio, sugestões, orientação na elaboração e formatação deste estudo.

Agradeço, também, a Valéria Gomes, secretária do Programa de pós-graduação da Engenharia Mecânica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A moagem de moinho de bolas é a última etapa numa usina de beneficiamento e concentração de minério de ferro, que produz partículas de minério com tamanho condizente para uma possível concentração posterior de minério de ferro bruto. Dentro do moinho, a variável mais importante é a sua densidade interna. Para tal, o controle automático da densidade a ser incorporada no sistema de moagem, é uma condição de ser executável, desde que se tenha a densidade interna, calculada e medida. O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema de controle da densidade da polpa do minério de ferro em moinho de bolas. Como metodologia optou-se por desenvolver uma modelagem matemática para o sistema de controle de densidade e, então, realizar testes experimentais em laboratório para verificar a eficiência do mecanismo proposto. O resultado esperado foi o aumento da produtividade, em torno de 46%, e uma diminuição dos custos operacionais.

Palavras-chave: Moinho de bolas; mineração; moagem; densidade; controle.

ABSTRACT

Ball mill grinding is the last step in an iron ore processing and concentration plant, which produces ore particles with a size suitable for possible subsequent concentration of raw iron ore. Inside the mill, the most important variable is its internal density. To this end, automatic control of the density to be incorporated into the grinding system is a condition to be implemented, if the internal density is calculated and measured. The objective of this work was to develop a system for controlling the density of iron ore pulp in a ball mill. As a methodology, we chose to develop a mathematical modeling for the density control system and then carry out experimental tests in the laboratory to verify the efficiency of the proposed mechanism. The expected result was an increase in productivity, around 46%, and a reduction in operating costs.

Keywords: Ball mill; mining; grinding; density; control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático de um Controle de Processo	55
Figura 2 - Resposta típica da ação de um controle PID	56
Figura 3 - Moinho de Bolas – Mineração.....	57
Figura 4 - Moinho de Bolas em Operação na Mineração	57
Figura 5 - Parte interna do moinho de bolas	58
Figura 6 - Corpos Moedores de Bolas de Aço.....	58
Figura 7 - Ciclone Separador Granulométrico	59
Figura 8 - Tanque de Equalização da Polpa	65
Figura 9 - Tanque com Medidor de Densidade e Tubulação de Saída	67
Figura 10 - Estratégia da Medição e Controle do Moinho de Bolas.....	68
Figura 11 - Representação Formal do Fluxograma Completo e Controle.....	70
Figura 12 - Repesentação do Fluxograma dos cálculos Algoritmizados	73
Figura 13 - Tubo de Pitot Cole.....	76
Figura 14- Revestimento Interno do Moinho de Bolhas.....	77
Figura 15 - Representação Esquemático de um Moinho.....	79
Figura 16 – Circuito de Moagem Aberto.....	79
Figura 17 – Interno Moinho Moagem Aberto.....	80
Figura 18 – Circuito Fechado Direto	81
Figura 19 – Circuito Fechado Reverso.....	81
Figura 20 - Circuito Fechado Misto.....	84
Figura 21 – Planilha Data File	85
Figura 22 – Planilha Flow Sheet.....	87
Figura 23 – Tempo da Moagem da Carga de Minerio de Circuito Aberto	94
Figura 24 – Esquemático das Formas de Descargas do Underflow.....	94
Figura 25 – Descarga Underflow Função da Razão entre Saida	106
Figura 26 – Programação, Teste Desempenho em Bancada	107
Figura 27 – Programação, Teste Desempenho do PLC em Bancada.....	113
Figura 28 – Densidade do Moinho e as Variaveis de Entrada	115
Figura 29 – Valores de Edição: Parametros do PID.....	116
Figura 30 – Esquema de Ligação das Entrada e Saida do PLC	117
Figura 31 – Esquema Funcional e Blocos de Programação do PLC.....	122

Figura 32 – PLC com Resultados Indicados e Gravados Registrador Eletrônico....	124
Figura 33 – IHM mostrando valores do processo e valor da densidade.....	124
Figura 34 – IHM Rendi. Moinho, Massa Circulante e Carga Minério Bruto	125
Figura 35 - Registro gráfico água controlada para moinho e densidade interna	125
Figura 36 - Cava de uma Mina Real	132
Figura 37 - Fabrica com um moinho de Bolas	133
Figura 38 - Moinho semelhante ao dá mineração	134
Figura 39 - Moinho de Bolas usinas Vale-Ferteco	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Concentração de sólidos.....	50
Tabela 2- Fator K	90
Tabela 3 – Distribuição da carga de bolas para início de operação	90
Tabela 4 - Função da razão entre saídas.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	<i>American Society Mechanical Engineers</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CCO	Centro de Controle Operacional
IA	Inteligência Artificial
IHM	Interface Homem-Máquina
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MEF	Método dos Elementos Finitos
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLC	Controlador Lógico Programável
PUC Minas	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
SI	Sistema Internacional
DTR	Distribuição tempo de residência
AG	Moinho autógeno
SAG	Semi-autógeno
PI	Controle Proporcional Integral

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i, a_f = Taxa de quebra inicial e final (Adimensional)

B = Diâmetro da bola (m)

C_p = Concentração de sólidos (kg/m^3)

C_v = Concentração de sólidos em volume (kg/m^3)

D = Diâmetro (m)

d = Diâmetro (m)

d_i = Taxa de descarga (Adimensional)

e = erro (Adimensional)

F = Tamanho da alimentação (m)

F_{cs} = Percentagem da velocidade crítica (Adimensional)

f_i = carga minério alimentação moinho (kg)

g = aceleração da gravidade local (m/s^2)

G = Ganho (Adimensional)

J = Percentagem de enchimento (Adimensional)

K = Fator relativo as bolas (Adimensional)

K_d = Ganho derivativo (Adimensional)

K_i = Ganho integral (Adimensional)

K_p = Ganho proporcional (Adimensional)

L = Comprimento (m)

p_i = Vazão de sólidos saída moinho (m^3/s)

R = Raio (m)

r = Raio (m)

r_i = Taxa de quebra (Adimensional)

S_g = Peso específico do minério (N/m^3)

t = tempo (s)

V = Velocidade da polpa (m/s)

V_c = Velocidade crítica (m/s)

V_d = Velocidade de deposição (m/s)

V_{oLs} = Volume de líquido (m^3)

V_{ols} = Volume de sólidos (m^3)

V_p = Percentagem sólidos em volume (Adimensional)

V_v = Porosidade (Adimensional)

W_i = Work index (Adimensional)

$X(i)$ = Sinal variável de saída (V)

μ = Viscosidade (kg/m.s)

ρ = densidade (kg/m^3)

ρ_m = densidade da mistura (kg/m^3)

ρ_l = densidade do líquido (kg/m^3)

ρ_s = peso específico do solido (N/m^3)

τ = Tempo integral (s)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. Problema	27
1.2 Delimitação do estudo.....	27
1.3 Objetivo geral.....	27
1.3.1 Objetivo específico.....	27
1.4 Justificação.....	28
1.5 Escopo.....	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 Revisão da literatura.....	30
2.2 Estados da Arte	40
2.3 Medida da densidade	45
2.4 Fundamento ao tema densidade.....	49
2.5 Variáveis do processo	52
2.6 Fundamentação ao tema controle	53
2.7 Fundamento ao tema equipamentos	57
2.8 Justificando uma carga de bolas em um moinho real	60
2.9 Fundamentação da ação efetiva do PLC no controle	66
2.10 Registros das variáveis no processo moinho de bolas.....	70
2.11 Fundamentação da teoria das incertezas nas medições.....	72
2.12. Descrição do Moinho de Bolas	75
2.12.1 Principais tipos de moinho.....	76
2.12.2 Elementos estruturais dos moinhos de bolas	78
2.12.3 Modelagens do moinho de bolas	83
2.12.4 Planilhas para modelagem do moinho de bolas	84
2.12.5 Tempo de permanência da carga no moinho circuito aberto.....	86
2.12.6 Exemplo real do DTR de um determinado moinho na prática.....	88
2.12.7 Corpos moedores e bolas de aço	89
2.12.8 Dimensionamentos das bolas (carga moedora).....	89
2.12.9 Modelos de cominuição	91
2.12.10 Hidrociclone: classificação, modelagem e projeto	92

3. METODOLOGIA	96
3.1 Metodologias nas Etapas do Trabalho	96
<i>3.1.1 Metodologia computacional</i>	<i>98</i>
<i>3.1.2 PLC utilizado no experimento na medição da densidade.....</i>	<i>99</i>
<i>3.1.3 Metodologia na medição da densidade.....</i>	<i>100</i>
<i>3.1.4 Metodologia e modelagem dos instrumentos de medição.....</i>	<i>101</i>
<i>3.1.5 Metodologia dos experimentos da medição em laboratório</i>	<i>101</i>
<i>3.1.6 Metodologia na realização do experimento de campo direto na mineração</i>	<i>102</i>
<i>3.1.7 Metodologia na modelagem do sistema de controle</i>	<i>103</i>
<i>3.1.8 Obtenção e análise dos resultados</i>	<i>103</i>
<i>3.1.9 Comparações entre densidade na saída do moinho com a densidade...</i>	<i>104</i>
3.2 Modelagens matemática do PLC	105
3.3 Metodologia e modelagem computacional	105
3.4 Metodologia experimental	107
3.5 Análises dos resultados medição/controlre.....	109
<i>3.5.1 Análise e comentários do conjunto dos experimentos visualizados</i>	<i>110</i>
<i>3.5.2 Configuração, entradas, monitor e PID</i>	<i>112</i>
<i>3.5.3 Menu monitor.....</i>	<i>113</i>
<i>3.5.4 Menu PID.....</i>	<i>115</i>
<i>3.5.5 Hemograma orientativo do PLC.....</i>	<i>116</i>
<i>3.5.6 Resumo demonstrativo funcional das teclas.....</i>	<i>118</i>
 4. RESULTADO PRELIMINAR.....	 122
4.1 Alguns Resultados da Medição.....	122
 5. DISCUSSÃO DO RESULTADO.....	 130
5.1 Contribuições Científica	131
 6. EXPERIMENTO NUMA MINERAÇÃO REAL	 133
 CONCLUSÃO FINAL.....	 137
 REFERÊNCIA.....	 141

1 INTRODUÇÃO

O tema desenvolvido tem como objetivo o controle da densidade na moagem. O algoritmo da medição da densidade é demonstrado no cálculo matemático, no modo de algoritmo, desenvolvido para a quantificação da densidade de moagem que ainda hoje é desconhecido. Mais adiante, o rendimento percentual físico da moagem é o valor da massa circulante do processo de moagem. Além da medição da densidade e de seu controle, a mecânica estrutural do moinho de bolas, corpos moedores e o ciclone foram abordados como um projeto paralelo.

A cominuição e moagem quando bem controladas resultarão em um produto moído com rendimento e granulometria mais eficiente durante a hidrociclonagem, em que se tem menos rejeito, e com isso, possibilitará maior rendimento com uma concentração mais produtiva nos processos subsequentes (Pourasiabi; Gates, 2022).

Mensurou-se a produção e o rendimento da rotação do moinho, dependendo da quantidade de bolas (seu diâmetro e peso individual devem ser calculados, ajustados mecânica e fisicamente. Assim, como as medições e controle das variáveis primárias entrando no moinho, como insumos vertentes, bem como, a respectiva medição do produto vazante, resultando em uma pasta ou polpa na saída operacional, homogeneizada e diluída.

No contexto das iterações das medições primárias e com os respectivos cálculos (algoritmizados), obtêm-se a densidade interna da moagem a qual representa a variável do processo (densidade), sendo essa mais importante variável na moagem interna no âmbito do moinho de bolas na mineração. Portanto, a densidade foi devidamente estudada, calculada e expressada como a variável medida a ser controlada no âmbito do sistema de controle operacional do moinho (Anda *et al.* 2022).

Na mina, após a detonação, o minério bruto fragmentado em britadores especiais cuja classificação, determinada por peneira, segue pesado e transportado por correia transportadora até o moinho de bolas, numa condição constante determinada em termos de pesagem, (t/h), pela operação. Depois de moído, o minério sai do moinho em forma de pasta ou polpa muito espessa, descendo por gravidade até o tanque de homogeneização (Tamás; Rácz, 2023).

Este estudo apresenta um novo conceito de medição e cálculo da densidade das variáveis de entrada, onde um novo algoritmo de cálculo determina e calcula a densidade interna que, a partir do seu respectivo cálculo, controla a densidade da

moagem do minério de ferro, dentro de um moinho de bolas em movimento rotacional na operação de moagem.

Nos processos industriais na mineração, é importante se medir e controlar a densidade de moagem do minério, de maneira contínua e *online*, pois só assim, se garante a uniformidade, qualidade e principalmente o rendimento da moagem.

Sem o devido controle da densidade da polpa, por exemplo, quando há baixa densidade, ou seja, presença de muita água, esta amortecerá o impacto de cominuição do minério base, assim como a fricção ou a moagem intersticial entre bolas e o minério. Quando muito seco, a cominuição e moagem, seria excelente, todavia, nessa condição, o moinho com seu conteúdo interno, torna-se uma massa única, girando na rotação do próprio moinho (Arunachalam *et al.* 2023).

Normalmente no equilíbrio, quando tudo está controlado, a quantidade de minério bruto que entra previamente classificado por peneira, o minério sai moído, numa granulometria bem fina, denominado polpa. Por outro lado, o minério que alimenta o moinho, normalmente sendo pobre, em termos percentuais de Fe_2O_3 , será necessário aumentar sua concentração, retirando do minério base a parte indesejável, como a argila, sílica, barro, bauxita e, outros compostos nele contido, ou associado, sem qualquer interesse econômico (Silva 2014).

No Início da década de 1980, não existia no mercado computador de processo, nem tão pouco Controlador Lógico Programável (PLC). O sistema instrumental de medição, cálculo e controle introduzido no moinho da época, era uma instrumentação totalmente analógica, com Painel instalado na Sala de Controle, hoje denominada, Centro de Controle Operacional, (CCO), onde os técnicos operadores da empresa acompanham e controlam a operação do moinho (LI *et al.* 2023).

O estudo principal desta pesquisa, foi desenvolver a medição da densidade e criação do algoritmo de cálculo da densidade dentro do moinho de bolas em movimento. A partir dos insumos que entram medidos e a polpa que sai pela grelha, indo para o tanque específico de diluição e equalização, sendo ali rigorosamente controlada *online*, em termo de sua densidade local autônoma, saindo bombeada com respectivo escoamento e mesurando, por meio de um medidor magnético de vazão, assim como, a referida densidade.

1.1 Problema

O problema ser pesquisado foi encontrar uma possível solução, numa plataforma de cálculo de modo a transformar os sinais analógicos correlacionados com as variáveis de entradas e saídas, transformando-as em sinais eletrônicos de corrente constante, equivalente a uma densidade interna da polpa sendo moída no moinho de bolas. Uma vez conseguido tal sinal eletrônico digital, equivalente a uma medição *online* da polpa dentro do moinho, onde o seu controle automático é um controle digital. Portanto, solucionar o problema do controle da polpa, onde se mede ou conhecendo o DTR (tempo de retardo do moinho entre entrada e a saída), será encontrado uma solução com um único controlador ou dois controladores em cascata com primeiro. Além disso, sintonizar seus parâmetros, seria uma operação muito bem conhecida e menos trabalhosa.

1.2. Delimitação do Estudo

A delimitação do estudo envolvendo soluções para o cálculo, medição e controle da densidade *on-line* dentro do moinho de bolas, até ao presente momento, porém, ainda não surgiram trabalhos técnicos, estudos acadêmicos ou periódicos nessa linha de conduta de pesquisa. Quanto ao possível controle da densidade de maneira aleatória ou por eventuais períodos de amostragens, na atualidade, existem várias alternativas em prática conforme será relato no capítulo 4 deste trabalho.

1.3. Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um sistema de controle de densidade da polpa de minério de ferro em moinho de bolas e assim aumentar a produtividade do sistema de mineração.

1.3.1. Objetivo Específico

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estudar as dinâmicas dos sistemas do hidrociclone, todos mencionados mais abaixo; além disso, focar-se-á na especificidade da medição e cálculo, de um

conceito elaborado nesta pesquisa, baseado no estudo do cálculo da densidade *online* do moinho em movimento.

- Identificar seu respectivo controle em termos da densidade da moagem, a qual é a variável de processo mais importante e responsável maior, para se alcançar o máximo de rendimento na cominuição e moagem requerida no minério, culminando com o seu bom desempenho no corte de separação da polpa fina desejável pelo hidrociclone.

- Investigar por programas de cálculos específicos para seu dimensionamento e otimização, com o auxílio de planilhas eletrônicas, especialmente desenvolvidas no Excel mostrando valores do dimensionamento muito próximo daqueles que serão otimizados na prática de campo.

- Demonstrar que o programa de cálculo planilhado possa ser utilizado para agilizar o processo de aproximação dimensional prático. Dessa forma, economizando tempo numa época em que critérios econômicos são importantes justificativas nos investimentos na mão de obra, na melhoria econômica dos processos produtivos.

1.4. Justificativa

A justificativa principal deste trabalho é definir, calcular e medir com exatidão os insumos de entrada e saída, (minério bruto e retorno), que durante a moagem, no moinho de bolas, não foi fragmentado.

Com foco no trabalho, traz-se ainda ao tema, além da mecânica física dos equipamentos correlacionados com o moinho de bolas, a mecânica dos fluidos nas medições de vazão, pressão, mensuração da densidade. Sendo esta, medida e controlada de maneira autônoma diretamente no tanque de homogeneização, bem como, a densidade digitalmente calculada com blocos digitais específicos e modernos, planilhado numa sequência lógica de um fluxograma de cálculos (Li *et al.* 2023).

Nesse contexto, o estudo envolvido nesta investigação, além de contribuir para os vários setores da indústria de mineração, alcança e fornece de início, na introdução do cálculo da densidade do moinho. Para a pesquisa científica nos equipamentos minerários, este estudo buscou contribuir para melhoraria do rendimento na cominuição, moagem e ainda no fator energético sobre o custo geral do sistema de moagem do minério de ferro (Rosa, 2012).

1.5 Escopo

O escopo que se pretendeu alcançar nesta investigação, somando tudo que se pôde referir a idealização de um projeto, foi atingir e obter um sinal eletrônico equivalente a densidade da polpa dentro do moinho de bolas. Uma vez conseguido o sinal eletrônico, equivalente a densidade, foi estabelecido e executado o controle digital do bloco PID do PLC, onde foi uma tarefa de enviar e direcionar o sinal da variável controlada saindo do PID modulando a válvula de água que controlará a densidade dentro do moinho em movimento rotacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e referências bibliográficas que tratam de temas importantes para pesquisas. Dentre os temas estão as características físico mecânicas do moinho, dos corpos moedores e do hidrociclone, os quais são equipamentos amplamente estudados tanto na teoria quanto na prática, porém para melhorias através da computação. Quanto ao desenvolvimento do estudo do cálculo e medição da densidade *online* dentro do moinho de bolas em movimento rotacional, nada foi encontrado nessas e tantas outras revisões das pesquisas realizadas, até a presente data, estudos ou bibliografias a respeito do cálculo e da medição da densidade *online*.

2.1 Revisão da literatura

Neste item serão apresentadas as referências de artigos e periódicos, assim como bibliografias que tratam de temas das pesquisas. Dentre tais temas estão as características do moinho, dos corpos moedores e do hidrociclone, os quais são equipamentos, muito bem avaliados, estudados, experimentados e testados na prática. Quanto ao desenvolvimento do estudo, cálculo e medição da densidade *online* dentro do moinho em movimento rotacional, não foram encontrados estudos acadêmicos ou bibliografia a respeito do assunto como matéria específica divulgada. Assim citam-se nessa revisão, artigos, revistas, publicações, periódicos, trabalhos acadêmicos, com pouco ou nenhum conteúdo sobre o tema central desta pesquisa.

Segundo Rodrigo *et al.* (2021), estudos de controle para um circuito de cominuição na moagem com bolas (run-of-mine), seguem uma abordagem holística que envolve o controle básico regulatório e, o controle de sequência FUZZY, baseado em regras lógicas e modelos com abordagem robustas de otimização preditiva atendendo a uma ampla gama de alimentação do sistema operacional do moinho.

Moreira *et al.* (2015), o circuito de moagem do moinho é um sistema de entradas e saídas múltiplas, caracterizado com acoplamento não linear que se interrompe por perturbações, como dureza do minério e respectivos tamanhos. Daí os autores procuram encontrar, um tipo especial de controle preditivo capaz de capturar as não linearidades causadas pelos distúrbios na prática real de uma operação. Vários

modelos baseados no controle adaptativo foram propostos para o controle do circuito de moagem.

Machado (2015), em seu estudo, sobre circuitos de moinho de bolas, onde o artigo é visto como um sistema essencialmente multivariáveis com alta interação entre as variáveis do processo. Tradicionalmente os circuitos de moagem são controlados a partir de agentes de controle especiais preditivos trabalhando em cascata. Os estudos dos autores em termo de controle em um circuito de moagem, normalmente são realizados em Laboratório por simulação com os controladores PI, controlando a densidade com a água diretamente entrando no moinho.

Machado (2016), enfatiza que o controle estável do processo de moagem é de grande importância na eficiência e rendimento da operação, podendo recuperar minérios valiosos e ao mesmo tempo reduzindo custos de moagem. Ainda cita que os controladores PID *multi-loop*, desacoplados são os gerenciadores das interações entre os loops de controle. O modelo de controle de matriz dinâmica, dos autores foi aplicado como experiências em uma planta de concentração de minério de ferro, buscando as condições ótimas de operação.

Barbosa *et al.* (2020), em seu trabalho enfatizam que o moinho de esferas, ou bolas, equipamento rotativo, comumente presente em usinas de mineração de minério de ferro, que utiliza esferas de aço para reduzir o minério.

Gomes; Carvalho (2021), várias abordagens têm sido utilizadas ao longo dos anos para descrever qualitativamente a moagem com diferentes níveis de sucesso. Porém o trabalho recente apresenta uma aplicação e validação de um modelo para descrever o fresamento das esferas do *pallet feed* do minério de ferro.

Wang *et al.* (2021), o processo de moagem como etapa de preparação de matérias primas é uma operação necessária em plantas de processamento mineral. Ele não apenas fornece o tamanho da partícula quantificada para a operação de separação, como também pode liberar minerais valiosos no processamento

Lamon (2017), relata que o controle estável de um processo de moagem em moinho de bolas, sistema multivariável onde os esquemas de controle nas literaturas incluem o PID *multi-loop*, controle preditivo, controle adaptativo e outros, demonstrando habilidades limitadas no controle do processo quando existe presença de fortes distúrbios. A razão é que tais controladores por si, devido ao seu projeto não lidam diretamente com distúrbios. Assim, um esquema de controle proposto consiste em dois controladores cascadeados, um para tamanho da partícula do minério e o

outro para o *loop* da carga circulante. Os resultados da simulação demonstraram que os modelos ou métodos apresentados foram mais assertivos na rejeição de perturbações.

Fujita *et al.* (2023), faz-se um estudo comparativo dos efeitos da lubrificação na microestrutura induzida por moagem de bolas. Com compressão e laminação realizada, canalizando e revelando o tipo de deformação. A partícula em flocos apresentou microestruturas uniforme para o tratamento da moagem com lubrificação.

Os pesquisadores Wang Guo *et al.* (2021), focam na camada de uma mistura, polpa composta por vórtices de tamanhos diferentes onde o fluxo principal opticamente ativo, gera um efeito eletro-óptico guiado por infravermelho. No artigo eles apresentam uma análise numérica frontal de onda distorcida induzida por vórtices do ponto de vista da densidade, gerando efeitos eletro-ópticos. Daí o novo parâmetro denominado diferenças óticas é proposto, WIEDEY (2017).

Peng Wang *et al.* (2023), os autores informam que a energia durante a moagem manual, é bem maior que aquela moagem mecanicamente controlada no automático.

Peng Huang *et al.* (2023), observa que a tecnologia de medição pelo princípio de Coriolis é amplamente utilizado nas medições de vazão em indústrias de transformação. Além do escoamento, o princípio da medição com o Coriolis pode medir com grande performance a densidade de um fluido, com base na frequência ressonante da vibração do tubo de fluxo. Todavia, ressalta que é muito importante e crítico, no caso de polpa de minério, o seu limite de densidade devido principalmente a deposição do material polpa no tubo de vibração e seu consequente entupimento.

Kronemberger (2006), esclarece que no moinho de bolas, a transmissão de energia das bolas para as partículas em polpa está intimamente ligada a maneira como a água, minério e polpa são misturados. Um dos condicionamentos que influenciam está nas propriedades reológicas da polpa e mais precisamente sua viscosidade, então a densidade da polpa durante o processo de cominuição e moagem é a variável mais importante no seu desempenho.

Zixin Yin *et al.* (2023), a quebra de partícula no moinho de bolas, é extremamente complicado, difícil quantificar e descrever o comportamento da quebra das partículas. O moinho de bolas é, portanto, um tipo de maquinaria, de engenharia, com alta energia consumida sobre as partículas. Sua utilização é amplamente realizada na mineração, cimento e química no sentido de reduzir o tamanho das partículas do minério.

Harindintwali, et al. (2023), aqui condicionou uma meta-análise para investigar os efeitos da moagem de bolas na capacidade de adsorção/remoção do biochar por contaminantes.

Nos resumos dos artigos internacionais apresentados, a maioria chinesa, muito se falou no controle do moinho. Todavia, pouco ou nada na medição *online* da densidade da polpa. Como disse Kronemberger (2006), a densidade é a variável mais importante no desempenho da moagem, portanto ela merece um bom e estável controle. Ainda como resumo literário e revisão da literatura, cita-se trabalhos, de origem nacional de alunos de mestrado, doutorado, assim como artigos de periódicos, e de congresso, cujo tema principal é a mineração e suas nuances.

Estudos de Lins *et al.* (2014), nas plantas de processamento de minério, se lida com duas formas básicas: (1) O minério a granel e (2) o minério de granulometria normal por peneiramento; possivelmente classificado. A polpa é uma mistura de partículas de minério e água, com alta densidade, normalmente controlada. Densímetros nucleares são os mais usados para medir a densidade da polpa que escoam em dutos. As maiores vantagens dos densímetros nucleares são suas qualidades não intrusiva, fácil montagem externa, sem a necessidade de operação de parada da planta e, manutenção robusta. Contudo sua grande desvantagem é a necessidade de cuidados especiais de segurança permanente devido aos riscos de acidente do trabalho. Normalmente tais medidores de densidade radioativos são os mais usados para medir densidade de polpa ou lama escoando em tubulações. Portanto, o uso dos Densímetros radioativos está restrito como forma de melhorar a segurança industrial em operações na mineração, REMIORZ (2015).

Carvalho (2015), em sua dissertação de mestrado avaliou a disposição do moinho bolas em circuito de moagem de minério de ferro. O estudo teve como avaliar e comparar dois circuitos de moagem em uma usina de minério de ferro com capacidade de 12 toneladas, para redução direta a partir de um controle composto. O trabalho foi conclusivo, afirmando que a experiência deu certo.

Oliveira, *et al.* (2018), em artigo publicado em anais de congresso, com o tema na construção de Moinho de Bonlas, eles estudaram e analisaram a teoria e a prática na determinação de parâmetros utilizado para estimar o consumo energético de etapas de moagem em escala industrial.

De Paula, *et al.* (2014), em artigo de periódico sobre as diretrizes para a construção de um moinho de bolas, para a moagem de sólidos em laboratórios,

estudou e desenvolveu técnicas específicas para pequenos moinhos.

Bahmani-Ghaedi *et al.* (2022), embora o tipo e a concentração do floculante tenham sido extensivamente relatados na literatura para sedimentação de minérios de ferro e seus respectivos minerais, pouca informação é conhecida sobre o efeito do floculante residual na água circulante. O principal mecanismo de adsorção do floculante baseou-se na formação de ligações de hidrogênio, e houve interação entre o tipo de floculante e o pH. Entre os floculantes, o aniônico demonstrou eficiência de sedimentação desejável devido à sua forte propriedade de ligação de hidrogênio e grandes flocos formados através da força repulsiva entre o floculante e as superfícies das partículas. Isso mostra a importância do moinho de bola na mineração do minério de ferro. Como o que sai do ciclone na parte superior, indo direto para a floculação, o estudo é oportuno.

O desgaste abrasivo de alta tensão é um importante processo de consumo de material nas indústrias de mineração e beneficiamento de minério, ROVERI (2011). Os aparelhos comuns de abrasão de alta tensão em laboratório, sofrem com a falta de capacidade de simular as condições de serviço dos meios de moagem e revestimentos de moinhos, sendo os principais consumíveis nestes setores. O teste de abrasão de moinho de bolas é um testador de desgaste abrasivo versátil que facilita a modelagem confiável da cinemática e da mecânica de contato dos moinhos industriais. Ao contrário dos dispositivos de teste padrão, rochas naturais de qualquer tipo e/ou misturas com distribuições de tamanho de partículas desejadas podem ser carregadas para testes sob diversas faixas de líquidos, meios de moagem e durações. É simples de projetar, de baixo custo de fabricação, confiável para avaliar o desempenho de ligas e reproduzível para classificar materiais resistentes à abrasão (Pourasiabi; Gates, 2022).

Kinyua *et al.* (2022), a fragmentação de rochas é um dos resultados de detonação mais comumente otimizados devido à sua influência significativa na eficiência das operações a jusante. Este artigo revisa a influência da fragmentação por explosão no processamento de minérios metálicos. Dois aspectos da fragmentação da rocha que influenciam as operações de processamento mineral a jusantes incluem o tamanho das partículas do minério bruto e o grau de microfratura interna nos fragmentos induzidos pela detonação. As principais influências identificadas incluem a produtividade dos equipamentos de trituração, o consumo de energia nos equipamentos de trituração e a recuperação mineral. Um aumento na

energia de detonação resulta em maior rendimento e redução de energia nos circuitos de cominuição. O aumento na energia de detonação resulta em economia de energia nas operações gerais de mineração. Contudo, ao aumentar a energia de detonação, os impactos ambientais e de segurança devem ser levados em consideração.

Li *et al.* (2023), os rejeitos de minério de ferro (IOT), os subprodutos sólidos predominantes da mineração e refino de minério de ferro, apresentam desafios ambientais significativos devido ao seu grande volume. Este artigo se esforça para examinar a implantação prospectiva de IOT como uma alternativa ao solo macio na fabricação de materiais controlados de baixa resistência (CLSM) para aplicações de aterro. A fluidez é avaliada ajustando o IOT, solo macio e conteúdo de água e a avaliação subsequente das propriedades mecânicas das amostras de CLSM curadas é realizada por testes de compressão não confinados, ciclos seco-úmido e testes de cisalhamento direto na fluidez de 20 cm. Além disso, testes de microscopia eletrônica de varredura e por simetria por intrusão de mercúrio são implantados para investigar o impacto do IOT na microestrutura do CLSM curado. Resultados experimentais demonstram que um aumento no teor de IOT reduz consideravelmente o teor de água necessário para atingir uma fluidez de 20 cm para CLSM.

Tanhua *et al.* (2022), o processamento a seco de minérios contendo metal é muitas vezes facilmente descartado como uma opção viável devido ao maior consumo de energia da moagem a seco e a vários outros desafios introduzidos no manuseio do minério seco. No entanto, possíveis aspectos positivos incluem propriedades de superfície melhoradas, desgaste reduzido dos meios de moagem e maior eficiência no uso da água, que se tornarão cada vez mais importantes no futuro devido à escassez de água e ao aquecimento global.

Anda *et al.* (2022), as propriedades físicas e químicas dos materiais rejeitados em áreas pós-mineração têm recebido atenção profunda, enquanto a mineralogia como impulsadora do potencial reserva de nutrientes tem sido ignorada nas práticas de recuperação. O objetivo do estudo foi avaliar propriedades mineralógicas, químicas e físicas e metais pesados de materiais rejeitados (espólio e rejeitos) como base para recuperação. Sete perfis de solo representativos foram descritos e amostrados a uma profundidade de 130 cm para diversas análises de solo e para avaliar os fatores limitantes do solo para o crescimento das culturas. Onze espécies forrageiras foram testadas em um ensaio de campo e sua adaptabilidade e produção de biomassa contra propriedades extremamente limitantes do solo foram avaliadas

por duas estações de cultivo consecutivas.

Arunachalam *et al.* (2023), avalia a viabilidade da reciclagem de rejeitos de minas de cobre (CMT), analisando a durabilidade e as características mecânicas da argamassa de cimento utilizando esses rejeitos como aditivos de carga. CMT são resíduos minerais gerados durante o processo de mineração. Neste trabalho foram incorporados corpos de prova de argamassa de cimento com até 30% em peso de CMT. Foram avaliados testes de densidade aparente, módulo de elasticidade dinâmico, densidade aparente, velocidade de pulso ultrassônico, resistência à flexão e compressão. Também foram obtidos ensaios de quantidade total de vazios, absorvibilidade, absorção de água e resistência química para avaliar a durabilidade da argamassa. Quando 10% em peso de CMT foram incorporados, a quantidade total de vazios na argamassa foi reduzida em 20% e o desempenho mecânico melhorou em 16% após 28 dias.

Song *et al.* (2021), a zeólita magnética contendo lantânio (LMZ) foi fabricada a partir de ganga de carvão por um método energético de moagem de bolas seguido de processo hidrotérmico. A adsorção de fósforo do LMZ é 8 vezes maior que a do precursor zeólito. A adsorção máxima de fósforo é testada como 44,64 mg/g, muito superior à do composto de lantânio e zeólita relatados. Isso mostra o uso do moinho de bola na mineração como um todo.

França *et al.* (2019), investiga-se as propriedades estruturais e magnéticas de nanopós de Fe_2TiO_5 preparados por moagem de bolas e pós-recozimento. A partir da análise estrutural, a assinatura cristalina do pseudo-fase Brookite. Além disso, ao explorar aspectos distintos do comportamento magnético, encontramos impressões digitais do congelamento de spin longitudinal, com transição vítrea de spin de cluster ocorrendo a 56 K, e da presença da interação Dzyaloshinskii-Moriya no sistema. Além disso, encontramos antiferromagnético recursos para o nanopó a 300 K e loop de histerese com uma mudança abrupta na magnetização caracterizando o comportamento ferromagnético a 4 K.

Tiwari *et al.* (2022), sabe-se que a aplicação de corrente elétrica, durante a deformação do material, auxilia no processo de deformação devido ao efeito eletro plástico. O comportamento observado experimentalmente durante a aplicação de corrente elétrica é geralmente correlacionado ao efeito combinado do aquecimento Joule e da interação localizada de elétrons-deslocamento. Como o mecanismo governante do eletro plasticidade carece de consenso, a modelagem constitutiva do

referido comportamento é desafiadora e escassa. Os modelos matemáticos relatados na literatura muitas vezes descrevem o comportamento da deformação eletricamente assistida considerando apenas o efeito de aquecimento de Joule. Um modelo termo metalúrgico totalmente acoplado é necessário para sustentar o mecanismo do processo de deformação eletricamente assistido. Neste trabalho, apresentamos uma nova estratégia para prever o processo de deformação elétrica assistida, desenvolvendo um modelo constitutivo baseado em densidade de deslocamento e térmico totalmente acoplado.

A trituração do corindo é uma tarefa desafiadora, pois possui excelente resistência mecânica e é altamente abrasivo e consequentemente é aplicado como agente de jateamento e polimento na indústria de abrasivos. Assim, a seleção dos melhores métodos de trituração para atingir as propriedades de dispersão exigidas são de grande importância. Para isso, primeiro deve-se compreender os efeitos dos diferentes tipos de tensões e sua influência nas frações das partículas de corindo. Experimentos de compressão de leito de material em escala laboratorial em uma prensa de pistão foram realizados para examinar o efeito da pressão e a altura do leito do material na distribuição do tamanho das partículas do produto, na densidade aparente e no formato das partículas. Os resultados mostraram que excelente rendimento, alta densidade aparente e formato de partícula esférico podem ser alcançados por quebra do leito de partículas em uma prensa de pistão, então a tecnologia de rolo de moagem de alta pressão (HPGR) é uma tecnologia promissora método de cominuição para corindo (Tamás; Rácz, 2023).

Rosa (2012), em sua dissertação estudou, o desempenho do circuito de moagem direto e inverso da Samarco e avaliou as diferenças na moagem direta e inversa no moinho em operação.

Brunatto (2017), em sua dissertação de mestrado, avaliou a eficiência da moagem de pó cerâmico em moinho de esferas. No trabalho em moagem úmida da sílica até ao nível de micropartículas, a eficiência está relacionada com o menor tamanho da partícula. Na experiência, dois tipos de moinhos foram selecionados: O moinho de bolas e o moinho agitador de esferas.

Machado (2016), em sua dissertação, faz um estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinho, a autora estuda a dinâmica dos corpos moedores em fluidodinâmica computacional (CFD), onde o estudo experimental nas simulações impostas, as equações não puderam satisfatoriamente prever as

transições na ocorrência de centrifugação no moinho.

Gomes *et al.* (2014), em seu trabalho, eliminou controle manual de reposição de bolas em moinho e, otimizou o processo com a adoção da reposição automática das bolas utilizadas na moagem. Os estudos foram conduzidos por equipes internas de mineradoras mineiras. O sucesso foi alcançado após programação auxiliar de um PLC, cuja lógica envolvida era repor os corpos moedores baseado inicialmente na potência ativa consumida pelo moinho. Posteriormente as equações programadas no PLC foram aperfeiçoadas.

Fragoso, Martinz Soarez (2022), em sua dissertação estuda a modelagem e simulação do circuito de moagem da Mineração Serra Grande, que teve por premissa a simulação para o aumento da capacidade do circuito de moagem. Após 04 cenários de simulação avaliou-se a viabilidade técnica dos circuitos selecionados mediante modelagem matemática e simulação dos processos permitindo a seleção de novos equipamentos para tal fim.

Rodriguez (2016), em sua dissertação, estuda o modelo mecanicista aplicado à cominuição em moinhos de bolas descontínuos. Além disso, o autor também estuda o modelo mecanicista aplicado a cominuição em moinhos descontínuos onde apresenta e relata a baixa eficiência em termos de energia na moagem mecânica. No entanto, a limitação do consumo de energia e baixo rendimento, não têm sido contornados, (Li *et al.* 2013). Assim, tendo isso em vista, a principal ferramenta para abordar o problema é o entendimento dos mecanismos do processo e as influências de cada variável com a finalidade em ter maior controle do sistema.

Melo (2010), em seu trabalho de conclusão de curso, estuda a modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones, e teve por objetivo avaliar e caracterizar o desempenho dos hidrociclone na classificação de polpas de minério de ferro contendo 35% de sólidos em peso. O modelo de Plitt, o mais utilizado na partição da polpa, mostrou nos ensaios sua alta performance na calibração das curvas de partição com um bom ajuste, onde o efeito cordão (*ropping*) não foi observado.

Os autores Chaves e Reveri (2011), publicaram em periódico um artigo em que estudam o mecanismo de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas, onde os autores estudam e interpretam a moagem como a componente mais representativa no custo de uma produção de polpa onde a maior parcela do custo significativo recai no consumo dos corpos moedores. No estudo apresentado, os autores também fizeram uma revisão dos modelos mais aceitos para uma previsão de desgaste

metálico dos corpos moedores e do revestimento do moinho.

Gontijo *et al.* (2017), em artigo publicado estuda a reposição automática de corpos moedores via controle avançado. Os técnicos e engenheiros baseado na experiência no complexo da extração, beneficiamento e moagem do minério de ferro, concluíram que a moagem primaria consumia uma grande quantidade de corpos moedores, o que fez os envolvidos na moagem desenvolver e avaliar, quatro etapas de trabalhos distintos para se chegar a uma automatização que estabilizassem o grau de enchimento do moinho, com uma taxa de reposição dos corpos moedores sendo alteradas por meio de um sistema de controle avançado e automático.

Gomes *et al.* (2017), estuda o desempenho do diâmetro dos corpos moedores no processo de moagem e teve como objetivo analisar uma possível redução no diâmetro dos corpos moedores de reposição com intuito de promover uma possível maior moagem no interior do moinho. No estudo experimental a finalidade que se queria chegar foi verificar e analisar o desempenho do moinho específico da AGA – Cuiabá. Nos cenários analisados, como resultado, obteve-se aumento da produção na etapa de moagem local.

O propósito apresentado nessa revisão atualizada e, na anterior foi mostrar resumos pesquisados onde nada se encontra, descreve ou se fala sobre a densidade. Por outro lado, sem a pretensão de incorrer com novos e profundos detalhes e cálculos técnicos na mecânica do moinho, corpos moedores, hidrociclone, os quais serão posteriormente resumidos, analisada, estudada e postado nesse trabalho, baseado numa revisão de uma literária extensa, onde nada se estuda e divulga sobre o cálculo da densidade interna no moinho de bolas em operação, senão uma forte contribuição sobre o moinho em si, seu projeto físico mecânico, modelagem da operação do hidrociclone na sua condição de melhor rendimento na separação de partículas passantes e o respectivo corte granulométrico de rejeição e ainda, corpos moedores, seu projeto e cálculo das bolas de aço. Assim sendo, nesse trabalho tratar-se-á de maneira mais extensa e profunda, como tema central, uma medição da densidade interna do moinho de bolas em operação, onde sua prerrogativa na referência bibliográfica deixa muito a desejar no âmbito do cálculo da densidade *online* dentro do moinho, pois tal premissa ou postulado como já exposto não se encontra explorado no conjunto das obras até agora estudadas e divulgadas literalmente, no meio acadêmico e, no próprio chão de fábrica das Empresas Minerarias.

2.2 Estado da Arte

As novas tecnologias têm proporcionado avanços nos processos de fabricação do moinho e seus acessórios, porém nada contribui no sentido de calcular e a partir do cálculo à medição da densidade. De um modo geral, na narrativa seguinte aqui apresentada, pode-se mencionar como coadjuvante complementar, o item anterior 2.1, publicações, onde as novas tecnologias, novos trabalhos de pesquisa e publicações têm proporcionado grandes avanços nos processos de fabricação dos moinhos, dimensionamento dos corpos moedores com compostos mais resistentes a abrasão, hidrociclone com melhor rendimento etc. Assim, tem-se no texto a última palavra em tecnologia sobre a medição da densidade, dentro do moinho de bolas, em movimento de cominuição e moagem, são insuficientes, mostrando que não existe sequer, trabalhos de pesquisa ou artigos publicados que menciona essa tecnologia. A medição da densidade agora florescendo no seio desse trabalho, que depois de feito uma avaliação cuidadosa, procura de forma mais intensa a busca de estudos, publicações, artigos recentes que tratam do assunto: a medição e controle da densidade dentro do moinho de bolas. Porém, nada foi encontrado. Dessa forma, sendo esta pesquisa, nesta tecnologia, a primeira a introduzir tal conceito, que daqui para frente, após sua publicação poder surgir novas pesquisas, melhorias e trabalhos nessa mesma linha de medição e controle.

O controle automático da densidade, dentro do moinho, após sua medição da iteração de vários instrumentos eletrônicos de funções específicas, transmitindo os respectivos sinais equivalentes para o sistema de processamento, segue para uma plataforma de cálculos numéricos, (algoritmo), e dessa plataforma, com o devido sinal eletrônico equivalente à densidade medida, fica muito fácil de ser aplicado no processo de controle propriamente dito, com os respectivos controlador PI, PID, Cascata, ou ainda o Feed-Forward existente no mercado, seja controlador analógico ou digital. Assim, artigos e trabalhos nessa linha das medições primárias nos processos em geral, como vazão, pressão, nível, temperatura, densidades fora do moinho, como nos tanques ou nas tubulações de transporte da polpa diluída, controladores etc., podem ser encontrados farta documentação técnica no meio científico, acadêmicos ou mesmo documentação dos próprios fabricantes, WIKA (2018).

Por exemplo, medir a densidade *online* no tanque de homogeneização ou em

tubulação pressurizada escoando a polpa existem vários modelos de medidores na atualidade, com tecnologia diversa onde o mais famoso e utilizado é o radioativo. Nessa mesma linha, pode ser citado ainda, o medidor MD-01LD, medidor e transmissor de densidade, utilizado na medição de densidade da polpa dentro do tanque de homogeneização, desenvolvido em 2016/2017, com solicitação de Patente requerida pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Vamos descrever agora, outros tipos de medidores de densidade fora do moinho de bolas. São eles: (1) medidor de densidade Ultrassônico, fabricado pela (Metroval, assim como outras empresas fabricantes); (2) medidor de Garfos Vibratórios, fabricado pela (Endress+Hauser, também por outras empresas); (3) o próprio medidor radioativo fabricado pela (Key Ray), entre outras empresas fabricantes, especialmente na China.

Na saída do moinho, onde a carga moída, muito espessa, sai por extravaso, descendo e canalizada por gravidade, seria na tubulação de descida o ponto ideal para instalação do medidor de densidade, nesse caso, o medidor radioativo, mesmo considerando sua periculosidade que nesse caso ficaria em segundo plano. Todavia, sua instalação, não atenderia aos requisitos técnicos de uma boa instalação de medição, pois o local seria impróprio tendo como negativismo, saída do moinho por grelha que direcionando a polpa para tubulação compatível, descendo com caimento gravitacional, por tubulação nem sempre cheia, conduzindo a polpa espessa até ao tanque de homogeneização. Por outro lado, a partir da polpa sendo diluída e homogeneizada em tanque específico, com a densidade sendo controlada de maneira autônoma no local, consegue-se a partir da medição na saída do tanque derivar, regredindo em termos da medição, chegando-se à densidade dentro do moinho. As medições que se fazem no tanque e, com as novas variáveis, ou insumos de entrada no próprio moinho, consegue-se chegar à densidade, podendo-se classificar então, a medição da densidade conseguida e medida, como de natureza indireta *online*. Apesar do retardo observado na medição, caracterizando desta forma, uma medição que por princípio do processo utilizado, pode-se dizer que, a medição assim articulada e conseguida é a própria densidade interna de uma moagem *online*.

Na literatura científica é possível atualmente ler muitos artigos e pesquisas de técnicas de moagem em moinhos de bolas, porém, nenhuma aborda ou foca diretamente o princípio da medição e controle da densidade interna da moagem com

o objetivo primordial da otimização e estabilidade no rendimento do moinho de bolas. Todavia, aborda-se neste estudo, agora evidenciada, estudada, articulada e implantada, tendo como princípio se estabelecer no preposto, a tecnologia da medição e o respectivo controle interno da densidade de uma moagem, com o objetivo de torná-la mais estável, rentável quanto a granulometria de saída, assim como o rendimento energético na cominuição e moagem. Por esse motivo acredita-se que com essa nova tecnologia introduzida no seio da medição e controle interno da moagem do minério de ferro, alcançar e obter com o devido controle, *online*, a melhor condição de operação do moinho, assim, nessa proposta desta pesquisa, se acredita residir aqui o existe de mais moderno, dessa nova tecnologia de medição, florescendo dentro do tema densidade.

Nesse trabalho, ainda foi colocado em evidências na sua conclusão, o estudo, cálculo e dimensionamento de um moinho de bolas, corpos moedores, e o respectivo hidrociclone, os quais são projetos puramente mecânicos, embora, ligeiramente fora do escopo primordial desse trabalho desta pesquisa.

Hoje as variáveis medidas e controladas são sem exceção, variáveis indicadas, registradas, totalizadas e controladas com apresentação em display digital, presentes no CCO, (centro de controle operacional), diminuindo sobre maneira espaço físico da sala de controle, até então ocupados por enormes painéis analógicos.

Tecnologicamente, indo-se mais além na estratégia de um controle eficiente na visão e acompanhamento operacional pelo CCO, introduz-se ou não no próprio programa corporativo da empresa, a instalação do algoritmo desenvolvido neste estudo. O que pode ser visto em um pequeno PLC individual, instalado no campo. Ou ainda no CCO com os respectivos blocos digitais, transformados em algoritmos com os quais se permite calcular, medir, indicar e controlar densidade atuando-se na condição, manual//automático no próprio IHM do PLC, na correção da massa circulante e, no rendimento da moagem.

Nesses dois itens mencionados acima, estão mais uma vez, outro novo ineditismo técnico operacional, do moinho na mineração, fato esse ainda não explorado *online* na mineração. Ainda, como informação literária, elenca-se nesse trabalho, que ora se articula e apresentam mais artigos e periódicos aqui neste estudo, onde nada se encontra voltado para a medição e o efetivo controle *online* da densidade interna do moinho. Pois, essa temática aqui, hoje abordada, ainda não é difundida nas literaturas, assim como em artigos e ou trabalhos técnicos divulgados

nos meios acadêmicos ou mesmos nas áreas técnicas das empresas de mineração.

Neste trabalho, com uma busca minuciosa da literatura e publicações recentes locais, verificou-se que atualmente os grandes fabricantes e estudiosos procuram entender e melhorar os conteúdos mecânicos e as medições das variáveis individuais como pressão, vazão, nível, velocidade, etc., sem, contudo focar na própria densidade *online*, dentro do moinho, senão, de maneira isolada, no tanque de equalização, na tubulação de transporte da polpa, porém sem iteração ou mesclagem entre as variáveis para se chegar a uma operosidade notável com total controle e estabilidade da densidade interna do moinho.

Cita-se mais artigos internacionais e nacionais recentes, publicados sobre o moinho sem, contudo, ter nas literaturas recentemente pesquisadas, narrativas e tecnologias sobre o cálculo da densidade.

Segundo Yahia Ali, Mendoza e Gates, (2019) em artigo sobre o efeito do impacto das bolas e das partículas abrasivas nos moinhos de aço de baixa liga, concluíram que quanto aos parâmetros operacionais explicáveis nos moinhos operando com minério de ferro, foram as partículas finas, abrasivas, que mais contribuíram para o desgaste interno, que os possíveis danos relacionados ou causados pelos corpos moedores de impactos. Ainda, para entender o desgaste nos moinhos de bolas operando com o minério de ferro, os autores desenvolveram *know-how* relacionando resultados de ensaio de desgaste do moinho e dos corpos moedores, diretamente relacionados entre si, buscando justificar que o consumo dos corpos moedores é um dos principais itens de custo no processamento.

Segundo Tembo *et al.* (2019), em parâmetros a serem considerados durante a operação de um moinho de bolas, são: preenchimento intersticial, meio de moagem, corpos moedores e tamanho das partículas de alimentação. Nas experiências conduzidas para verificar possíveis interações entre as três variáveis, conclui-se que é de suma importância encontrar parâmetros operacionais ideais para essas variáveis durante a operação do moinho. A técnica (AR), *attainable region*, ajuda a identificar e economizar tempo dos engenheiros, reduzindo os custos de operação. Ou seja, otimizar e efficientizar o rendimento da planta.

Farhad Moosakazem (2017), no artigo sobre o efeito do projeto e parâmetros operacionais na morfologia de partículas em moinhos de bolas, constatou que fatores envolvidos na moagem de minério causam vários mecanismos de ruptura. Esses diferentes mecanismos diferem a morfologia das partículas. No estudo, o efeito dos

tipos de moinho, alimentação e tamanho das bolas foram investigados assim como a morfologia das partículas moídas usando o microscópio óptico e câmera *Olympus E-510*. A projeção de partículas bidimensional medidas foram expressas matematicamente como circularidade, redondeza e proporção pelo software onde as partículas foram medidas morfologicamente para análise de imagem. Os resultados mostram que a circularidade e a redondeza das partículas moídas são aprimoradas. O aumento da área da superfície da bola causa também o aumento da circularidade como valores de redondeza e a diminuição do valor da proporção, CONEXÃO MINERAL (2019).

Silva (2014), para entender o atrito e o desgaste dos corpos moedores no trabalho em moinhos de bolas com minério de ferro, foram realizadas experiências usando o método de crateragem de esferas sob condições de moagem a seco e úmido, que imitam as condições de operação com esferas nos moinhos. O revestimento do moinho feito de aço Mn16, as esferas tinham um diâmetro de 25 mm e outras feitas de aço GCr15. O pó de minério de ferro foi filtrado das partículas de magnetita com número de malha 20. Os resultados indicaram que, numa condição de desgaste diferente, faz o COF mudar de maneira inversa e causa um padrão de desgaste diferente nas crateras, seguidas pelo aumento correspondente da temperatura.

Silva, Lobo e Andrade (2013), concluíram que; os moinhos de bolas são equipamentos presentes nas plantas de mineração, sendo importantes nos circuitos de trituração. Dependendo de vários fatores, como por exemplo, projeto, fabricação, sobrecargas, manutenção deficiente e procedimentos operacionais inadequados podem causar falhas nos componentes estruturais do equipamento, basicamente cascais, cabeçotes e munhões, além de altos custos, com prazos de entrega que podem atingir três anos, de acordo com a demanda do mercado.

Portanto, torna-se cada vez mais necessário que quaisquer falhas nesses componentes sejam adequadamente avaliadas. O artigo também analisou a mecânica de fraturas de falhas, como rachaduras observadas em um munhão de moinho de bolas, e comparou a teoria nos valores da taxa de crescimento desses defeitos com valores reais obtidos através de inspeções periódicas realizadas neste componente. A nucleação de trincas foi causada pela falta de lubrificação nos rolamentos do munhão, gerando tensões térmicas circunferenciais. Portanto, a temperatura estimada do contato do munhão e da bucha atingiu 150°C. A falta de lubrificação foi

originada por uma falha que permitiu ao moinho dar partida e sem que bucha do munhão ficassem com o sistema de lubrificação desligado, ou seja, sem filme de óleo. A falha lógica foi causada por uma falha do operador. Durante o período analisado, os resultados obtidos pela norma BS7910 provaram ser mais próximo dos valores reais do que o *American Society Mechanical Engineers* (ASME) padrão.

Na dissertação de Leite (2016), sabe-se que o custo da cominuição e moagem é uma das etapas de maior custo no beneficiamento do minério. Considerando como base o custo da energia no processo e o custo dos corpos moedores, assim profissionais da Cia Vale no Pará, equipe da mina de Sossego, em 19/06/2015, estudou profundamente o processo na etapa de moagem, que posterior as medidas tomadas na ação de melhorias, reduziu em 25% a quantidade de bolas usadas no processo, diminuindo uma redução de 5% no consumo de energia, gerando assim, uma economia de R\$3.9 milhões/ano para a empresa e R\$ 3 milhões/ano na compra de bolas.

Como se nota até aqui, nos artigos pesquisados, em periódicos, literaturas, assim como nas referências bibliográficas, nacionais e internacionais, não se verifica ou encontra-se nada que possa reforçar ou corroborar com essa nova modalidade técnica de medir e controlar *online*, a densidade da polpa do minério dentro do regime de moagem no moinho de bolas.

2.3 Medida da densidade

Dentro da fundamentação baseada numa teoria de uma medição dentro do moinho em movimento de rotação de moagem, a medição e o controle da densidade, é uma variável cujo controle é muito importante para garantir, uniformizar e maximizar o rendimento produtivo do moinho. Todavia, é muito difícil ou quase impossível medir e controlar, de maneira direta, confortável, *online*, a densidade interna da moagem, pois medir a densidade na saída do moinho ou um pouco mais a frente, seria o ideal. Todavia, isto é quase impossível, pois a polpa muito espessa ou a pasta sai pela grelha do moinho e desce, por gravidade, pela tubulação, nem sempre cheia, impossibilitando sua medição direta, antes de chegar ao tanque de equalização, como já mencionado. Indiretamente pode-se calcular o valor da densidade por meio da medição das variáveis ou insumos que entram e saem do moinho. A partir das medições de entrada, um algoritmo especial digital de cálculo, em tempo quase real,

determina-se ou calcula-se a densidade interna da moagem. Esse processo, hoje denominado como meio indireto da medição, foi estudado e introduzido no passado, no início da década de 1980.

No processo do desenvolvimento primitivo, do projeto de 1981, o sistema de cálculos que se estudou e, se desenvolveu a época, analogicamente, um algorítmico de medição da densidade interna do moinho de bolas em operação. O algoritmo, cuja solução formalizada na época, evoluiu e hoje se modernizou e ampliou, com uma nova arquitetura estruturada, com algoritmos mais assertivos com novas possibilidades desde medição e controle mais sofisticado de uma solução matemática atualizada, (algoritmo digital), que ao receber sinais dos insumos de entrada e da saída homogeneizada do processo da moagem, realiza hoje, cálculos algébricos com instrumentos eletrônicos digitais, com sinal eletrônico de 4 a 20 mA, equivalente a densidade interna do moinho. Conhecendo a densidade medida para o moinho em movimento, compara-se a mesma com a referência ou o *set-point* desejado no processo. Havendo desvio na comparação, o controlador PID, automaticamente atua, sobre uma ou mais variáveis de entrada, de modo a obter sempre a densidade desejada para aquele processo.

Uma segunda estratégia de medição da densidade, pensada à época passada, para o devido controle, seria a medição por meio do medidor primário radioativo. Por outro lado, não existia à época e ainda hoje, tal possibilidade da medição de densidade via radioativo na saída do moinho, pois é quase impossível, sabendo que a polpa espessa sai pela grelha e, por gravidade desce desordenadamente direcionada para o tanque de homogeneização com tubulação nem sempre cheia.

Assim sendo, a mensuração por meio do medidor radioativo e o controle ótimo da densidade dentro da cominuição e moagem, parece ainda hoje ter certo grau de dificuldade, na visão do processo em si, por ter uma visão da empresa e de seus técnicos, apenas dos problemas intrínsecos de segurança pessoal na utilização do medidor radioativo.

Uma preocupação surge atualmente, na utilização dos medidores radioativos por serem, problemáticos quanto a segurança operacional e individual, dentro do plano gerencial das empresas e do Ministério do Trabalho.

Ainda assim, o radioativo é muitíssimo usado na medição de densidade, no geral, em polpa diluída e bombeada. Por outro lado, a medição interna no moinho, ainda hoje não está superada, pois o que se estudou e desenvolveu de maneira

analógica no passado, se perdeu no tempo com a mudança de paradigma estrutural analógico para o digital na atualidade.

Atualmente, nas empresas, o controle interno da moagem é definido e controlado aparentemente pela potência elétrica do motor que aciona ou gira o moinho. Essa estratégia, apesar de difundida por alguns setores técnicos e, ainda pela própria empresa de mineração, ou pelo próprio fabricante do moinho de bolas é uma estratégia em curso em algumas empresas. Todavia, esse tipo de controle é precário, como efetivo controle *online*, pois funciona com correções manuais à medida que a potência cai abaixo de certo valor determinado pelo padrão de potência ativa indicada no painel de controle.

Em algumas, outras grandes empresas, o controle funciona por aplicativo específico, onde periodicamente, por conveniência da operação e valores do processo são carregados no aplicativo que, como resposta propicia valor adequado do volume de água a ser manualmente variado para corrigir temporalmente a alimentação do sistema de entrada do moinho. Existe ainda outro processo de controle, baseado no som dos corpos moedores dentro do moinho que numa profusão sonora característica serve como coadjuvante para o controle do moinho. Tais modelos para controlar a densidade, com operação e controle por empirismo ou por amostragens eventuais, principalmente pelos desgastes das bolas, (corpos moedores), as quais compõem a maior carga físico-mecânica do moinho, SARDINHA (2013).

Não parece que tais processos, serem o mais moderno em termos da medição e controle. Porque a potência caindo pelos desgastes ou erosão das bolas de moinho, e, mais bolas novas são acrescentadas no interior do moinho até atingir assim, a potência predeterminada ou setada pelo indicador da potência ativa consumida.

Na hipótese de o sistema ser controlado automaticamente pela densidade medida internamente, o controlador PID, controla a densidade, *online*, pela adição de água até certo ponto de valor da potência prefixado pelo sistema de controle, para então, alarmar indicando a necessidade de nova reposição de bolas.

Por outro lado, também pela amostragem volumétrica da quantidade de bolas de moinho, que saem passando pela grelha, se separando da polpa será destarte um indicativo anunciando uma próxima reposição necessária, sem paralisação do moinho. Como coadjuvante no controle automático, *online*, pela densidade, a informação do desgaste das bolas e sua consequente reposição manual é uma boa informação, já que o moinho tem sua maior carga em corpos moedores, (as bolas).

O processo de cominuição e moagem, realizado por corpos moedores, devido a vários fatores, tais como abrasão, corrosão e oxidação, desgastam as bolas de aço com o decorrer do tempo, que ao atingirem um diâmetro mínimo são comumente expurgadas naturalmente. Segundo fonte de uma grande empresa mineradora, declara que são gastos por ano mais de 10.000 toneladas de bolas nos circuitos de moagem. Gontijo *et al.* (2017) afirma que, em operação normal e contínua é desejável manter o enchimento do moinho com bolas numa condição estável ao longo do tempo.

Assim, a reposição dos corpos moedores deve ser mantida dentro de uma distribuição quantitativa e qualitativa ideal de carga. Dessa forma, a equipe de engenharia com os estudiosos na área de controle, durante observações nas pesagens e reposição das bolas, desenvolveram um algoritmo de controle para repor automaticamente uma determinada carga de bolas, baseado na quantidade de horas de funcionamento em moagem. Posterior a essa fase inicial de estudo, moinho, valendo-se dessa primeira experiência, a reposição manual com frequência periódica, desenvolvendo-se novas lógicas de programação dentro do PLC corporativo, permitindo variar a taxa de reposição das bolas, numa tentativa de manter o grau de enchimento constante dentro do moinho. Dessa forma, a programação desenvolvida, constantemente acessa dados do processo. Por exemplo: a potência ativa do motor do moinho, calcula e compara, repondo nova quantidade de bolas automaticamente. A reposição calculada, (quilos de bolas), normalmente é baseada na equação:

$$\text{Reposição} = \frac{\text{Cons.Esp.} \times \text{Pot.Cons.}}{1000} \quad (\text{kg}) \quad (1)$$

Cons. Esp. = Consumo específico do corpo moedor em kg/kWh

Pot. Cons. = Potência consumida kWh.

A reposição assim realizada, apresentou uma melhoria em relação a reposição manual pela operação, porém, ainda causava distúrbios mecânicos ao receber grandes quantidades de cargas de bolas em períodos prolongados. Assim, com novas melhorias na programação foi possível reduzir as perturbações ou distúrbios no processo com reposição mais frequentes, porém com menores cargas automatizadas de bolas. Mesmo assim, a potência do moinho continuou a ser a primeira variável dentre outras a ser utilizada como indicação da necessidade de nova complementação de bolas no moinho. Ainda, na etapa da programação do PLC, os

técnicos adicionaram uma nova constante de correção para compensar a variação na potência causada por mudanças do percentual de sólidos (carga do minério), e bolas.

2.4 Fundamento ao tema densidade

No tanque de homogeneização, onde a polpa é diluída, homogeneizada e controlada, se instala ali o processo de medição e controle automático autônomo local, da densidade, dentro do tanque (ver figuras 10 - 11 e 12), a partir dali o processo da medição da densidade interna do moinho de bolas começa ser traçado ou delineado, pelos cálculos previamente desenvolvidos pelo algoritmo, o qual recebe e interage com outras variáveis calculando então a densidade interna do moinho. Após, comparação com o valor desejado (*set point*), adiciona-se ou não a água controlada, diretamente na entrada do moinho.

A partir do tanque de homogeneização, a polpa que também já teve sua densidade autonomamente diluída e controlada, segue para uma classificação hidrociclona e, posterior para a flotação, onde se realiza a concentração propriamente desejada do minério moído (a polpa), obtendo-se a partir da flotação, um minério de ferro fino, puro e concentrado como se fosse uma hematita compacta, (Fe_2O_3), constituída por, aproximadamente, 70% de ferro, e, aproximadamente 30% de oxigênio, VASCONCELOS (2012). Esse material agora fino e concentrado é um tipo de produto que pode ser vendido ou exportado, *in natura*, ou ainda sobre ele, a própria empresa pode e deve agregar novos valores econômicos de produção, através da fabricação de pelotas ou o *sinter feed* comercial, COUTINHO (2008).

Considerando que a polpa do minério, no seu estágio inicial, sai do moinho, passa pela diluição e normalização equalizada, com controle da densidade no tanque de equalização. Então, segue bombeada com medição para a concentração. O Fe_2O_3 , agora concentrado é novamente preparado e se necessário, diluído e controlado, seguindo para o transporte quando requerido via mineroduto de grande distância.

A polpa de Fe_2O_3 exigirá muita atenção na sua nova diluição, pois as partículas mais pesadas podem apresentar maior comportamento de sedimentação no interior da rede que a transporta. Assim, nessa situação, uma nova densidade da polpa, agora com minério Fe_2O_3 concentrado, deve passar por uma nova medição e controle da densidade ótima, antes de ser succionada pela bomba que vai impulsionar a nova polpa, via mineroduto de longa distância. Além da nova diluição, (densidade, água e

minério), uma velocidade própria de transporte, dentro de uma magnitude suficiente para manter até mesmo as partículas de maior granulometria, e em regime de turbulência, onde as partículas maiores são transportadas em suspensão no meio fluídico, evitando assim que as mesmas partículas de Fe_2O_3 depositem na parte baixa, fundo da rede de escoamento.

Estudo científico e técnico, a respeito do transporte, via mineroduto, (Silva, 2014) tem mostrado em procedimentos experimentais que existe uma velocidade de escoamento mínima crítica, denominada velocidade crítica (V_c) mínima. Ou seja, aquela onde se verifica o início da precipitação ou a formação de um leito móvel na base da tubulação. Tal velocidade (V_c) deve ser ligeiramente superior a Velocidade de deposição, que iremos abreviar como V_d , esta, por sua vez, caracterizada pela formação e deposição das partículas na base, fundo da tubulação.

Normalmente a velocidade máxima de transporte ou escoamento da polpa, nunca deve ultrapassar a velocidade limite de $\pm 3,0$ m/s. Com esse limite de velocidade, se minimiza o efeito da erosão ou o desgaste excessivo da parede interna da rede e dos componentes do sistema. Por outro lado, com um bombeamento, onde o escoamento característico for turbulento, as partículas finas nesse estágio se mantêm suspensa em agitação ou turbulência, ajudando a manter as partículas mais grossas ou pesadas em subsequente suspensão, Bozzola (2016). Isto contribui com a diminuição de possíveis precipitações das partículas maiores. Quanto à polpa de Fe_2O_3 que transportada, deve ter uma densidade superior à, $\rho = 2,3$. Normalmente é de bom termo, que a velocidade do escoamento e das partículas observáveis, têm como atributos sob controles, minimizarem problemas de sedimentação e entupimento. Assim, como desgaste prematuro do mineroduto e outros componentes. A Tabela 1 condiciona concentração de sólidos (densidade), versus velocidade.

Tabela 1- Concentração de sólidos

Cp %	Velocidade Mínima, m/s
65	0,69
66	0,78
67	0,86
68	0,95
69	1,05
70	1,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$C_p = \frac{\text{Peso do sólido}}{\text{Peso da mistura}} = \frac{\rho_s \cdot Vol_s}{\rho_s \cdot Vol_s + \rho_L \cdot Vol_L} \quad (\text{nr. absoluto}) \quad (2)$$

$$C_v = \frac{Vol_s}{Vol_s + Vol_L} \quad (\text{nr. absoluto}) \quad (3)$$

$$\rho_m = \rho_L + (\rho_s - \rho_L) \cdot C_v \quad (\text{nr. absoluto}) \quad (4)$$

$$\text{Assumindo que o fluido é a água, } \rho_m = 1 + (\rho_s - 1) \cdot C_v \quad (5)$$

C_p = Concentração de sólidos

C_v = Concentração de sólidos em volume

ρ_m = densidade da mistura

ρ_s = densidade do sólido (kg/m³)

ρ_L = densidade do líquido (kg/m³)

Vol_s = Volume do sólido

Vol_L = Volume do líquido

É interessante observar que, com o aumento da concentração de sólido na mistura, ou seja, aumento da densidade, a velocidade terminal ou deposição, V_d , para transporte ou condução da polpa, aumenta conforme apresentado na tabela. Velocidade terminal é aquela um pouco abaixo ou menor que a velocidade crítica, V_c . Consequentemente, com o acréscimo da densidade, o número de *Reynolds* cresce, aumentando ainda mais o diâmetro da rede, ALVES (2012).

$$Re = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{nr. absoluto}) \quad (6)$$

V = velocidade da polpa

D = Diâmetro da rede

ρ = densidade da polpa

μ = Viscosidade abs

2.5 Variáveis do processo

Os tipos de variáveis que entram e processam dentro da moagem:

- a) Medição e controle estável da carga de minério que entra no moinho;
- b) Medição e controle da água que entra no moinho;
- c) Medição e controle da água que entra no tanque de homogeneização;
- d) Acompanhamento e controle da carga moedora;
- e) Medição e controle do nível do tanque
- f) Medição da vazão da polpa homogeneizada na saída do tanque
- g) Medição e controle da densidade da polpa homogeneizada.
- h) Medição e controle da pressão de entrada no hidrociclone.

Todo o processo da medição da densidade interna do moinho terá, por conseguinte, seu atributo de início da medição, no tanque de homogeneização, onde preliminarmente, instrumentos de medição de nível e pressão hidrostática, instalados no tanque, redundando numa medição e transmissão da densidade local autônoma ou pela medição direta na tubulação de saída do tanque, pelo radioativo ali instalado.

Os tanques de equalização ou homogeneização, existente em grande número das grandes mineradoras, podem chegar a ter +/- 30 tanques. Todavia, nem todos são básicos para a estratégia de controle da densidade interna do moinho. Portanto, dezenas deles estão instalados nos processos internos, operando nas grandes plantas de concentração, espalhados pelo Estado de Minas e outros Estados. Assim, como em outras empresas da área da mineração.

Para essas empresas que se propõem essa nova alternativa tecnológica, atualizada em termos da medição e controle da densidade, incluindo melhorias oportunas no algoritmo de cálculo, obtendo assim, além da densidade, o valor da massa circulante e o rendimento percentual do moinho, AMIRI *et al* (2017).

Atualmente, as medições da densidade pelas empresas de mineração no bombeamento da polpa diluída e homogeneizada, é realizada por medidores radioativos, que são ótimos medidores, talvez os melhores do mundo: estáveis, repetitivos e confiáveis nas medições. Porém, considerados na atualidade problemáticos no aspecto da segurança pessoal e ambiental, na visão da empresa e do Ministério do Trabalho.

Sua substituição é fundamental, quando da aprovação e homologação dos

novos modelos que hoje estão chegando para teste de desempenho e a consequente certificação pelas companhias mineradoras. Assim, medidores radioativos poderão ser substituídos na medição nas redes de escoamento de polpa ou em outras aplicações, tão logo sejam os novos medidores aprovados e homologados.

É a apresentação dessa nova modalidade de controle *online*, frente aos vários tipos de controle atuais, hoje operando em *loop* aberto no controle do moinho, conforme já exposto anteriormente e será detalhado posteriormente neste trabalho.

O escopo nessa fundamentação teórica desse estudo é a medição da densidade interna do moinho em movimento. A partir de uma medição satisfatória da densidade, *online*, o controle automático na modulação da água de entrada no moinho torna-se um processo bem fácil. Quanto ao controle em si, ele se aplica a qualquer moinho de bolas, de barras ou outros tipos de moinhos operando com minérios diversos, em via úmida.

Neste estudo, o contexto da medição e o controle da densidade, que esta pesquisa representa para a ciência e, contribui para a engenharia de processo na mineração, além disso, fornece para a sociedade minerária, que tem a mineração e concentração do minério de ferro, um valioso percentual do PIB nacional.

2.6 Fundamentação ao tema controle

O controlador digital, internamente no PLC desse trabalho, está disposto para utilização na condição de controle PID, (proporcional, integral, derivativo), com suas respectivas constantes de controle, K_p , K_i , K_d , as quais ser na tela da Interface Homem-Máquina (IHM) do PLC, para possíveis edições e melhorias de ajustes na sintonização do controle *online* quando requerido.

A equação geral de um PID é:

$$x(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (7)$$

Onde se define, $x(t)$ como sinal de saída controlado.

O algoritmo PID pode então assim ser definido.

K_p = ganho proporcional, ajustável

K_i = ganho integral, ajustável

K_d = ganho derivativo, ajustável

e = erro, diferença entre o valor desejado, (set point) e a variável

t = tempo

τ = tempo integral.

$K_p \cdot e(t)$ = ação de controle proporcional

$K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$ = ação de controle integral mais ação derivativa

K_p , definido como ganho pode variar de 0 a 50, por exemplo, ou ainda ser definido como faixa proporcional equivalente, $K_p = \infty\%$ a 2%, nesse caso.

Exemplos: Variável medida estando com uma diferença de uma unidade em relação ao SP e, sendo a constante de proporcionalidade K_p , fixada ou ajustado com ganho 1, o que corresponde a uma faixa proporcional 100%, a saída controlada de sinal terá um incremento de 1 unidade sobre o valor anteriormente da saída.

Por outro lado, se o ganho K_p estiver ajustado para ganho igual a 0,2, o que equivale a uma faixa proporcional de 500%, a saída reagirá nesse caso com um incremento de apenas 0,2 unidades sobre a variável controlada.

Quanto aos outros dois parâmetros da equação, K_i = ganho integral e K_d = ganho derivativo, suas funções ou ações de controle coadjuvantes, agirão de forma distinta quanto ao erro.

No caso da integral K_i , a ação de controle dessa ação, agirá integrando o valor do erro sobre a saída atual, até que o erro sobre a variável controlada, densidade, não mais existirá.

Já a ação derivativa, K_d , somente agirá com base na taxa de variação do erro, ou seja, proporcional a velocidade de sua variação. O erro poderá existir, porém, se ele não variar a ação de controle derivativo não causará nenhuma ação ou incremento na saída.

O valor de ajuste da constante K_i =constante de integração é ajustado como repetições por minuto ou às vezes, como minutos por repetições.

Já o ajuste K_d =ganho derivativo, também baseado no tempo, atuará no sistema de controle, aumentando ou diminuindo a saída, fazendo com que a reação do

controle seja rápida ou não por consequência da velocidade de variação da variável. Havendo erro, porém, sem variação da variável no tempo, a ação derivativa não atuará.

Na prática o tempo derivativo K_d deve ter como ajuste um valor muito pequeno ou na maioria dos casos de variáveis como pressão, vazão e outras que reagem com um tempo de resposta no controle muito rápido. É de bom procedimento que o ajuste derivativo, seja desabilitado ou então ser ajustado com um valor muito pequeno.

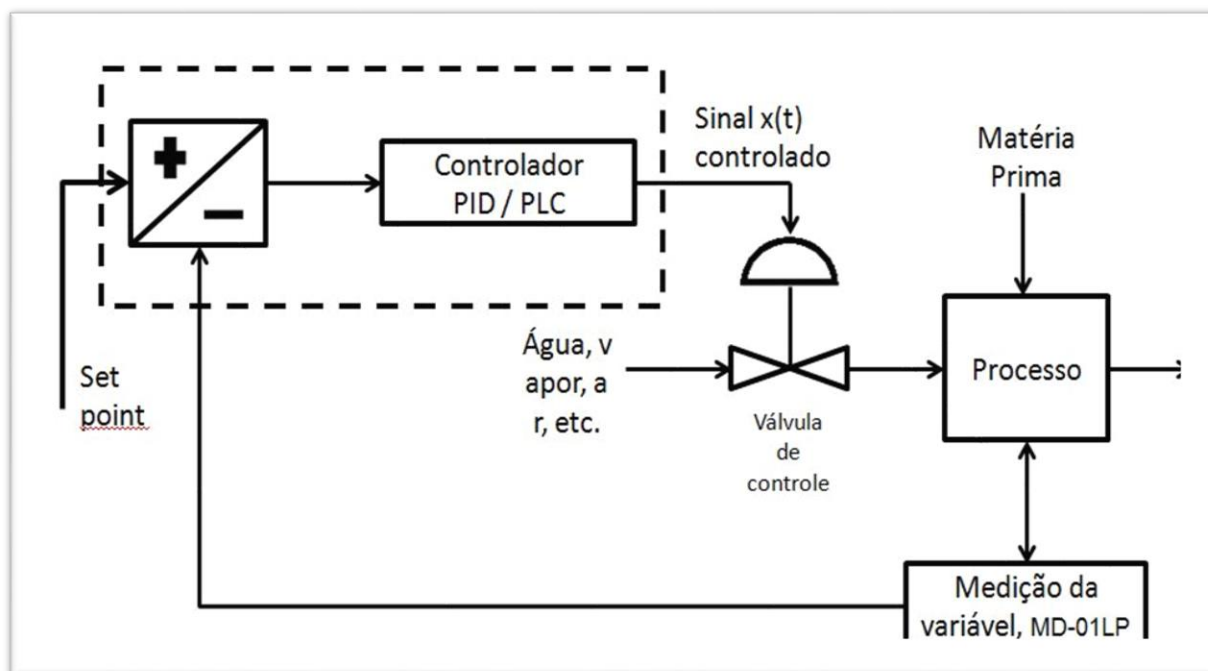
Na hipótese do controle de temperatura, PH ou mesmo controle de nível em tanques de grande capacitância, ou no caso da densidade no moinho, onde o tempo de resposta para essas variáveis sejam lentos, o derivativo quando bem sintonizado oferece uma grande melhoria na ação de controle, ajudando a retornar mais rapidamente a variável do processo ao seu ponto de equilíbrio controlado (*set point*).

Em seguida, os conceitos de mais duas variáveis que entram no processo de cálculo em geral:

Variável de Processo: É a grandeza física de um processo industrial, como por exemplo, temperatura, pressão, nível, densidade etc., que variam em função de outras variáveis em relação ao tempo. O objetivo do controle da variável do processo é mantê-la constante ou, no mínimo variando dentro de certos limites estabelecidos e aceitável.

Variável Controlada: É a grandeza física de um sinal que sai do controlador, analógico ou digital, variando com o tempo, de modo a afetar, controlando a variável do processo.

Figura 1 - Esquemático de um controle e processo



Fonte: Elaborado pelo autor.

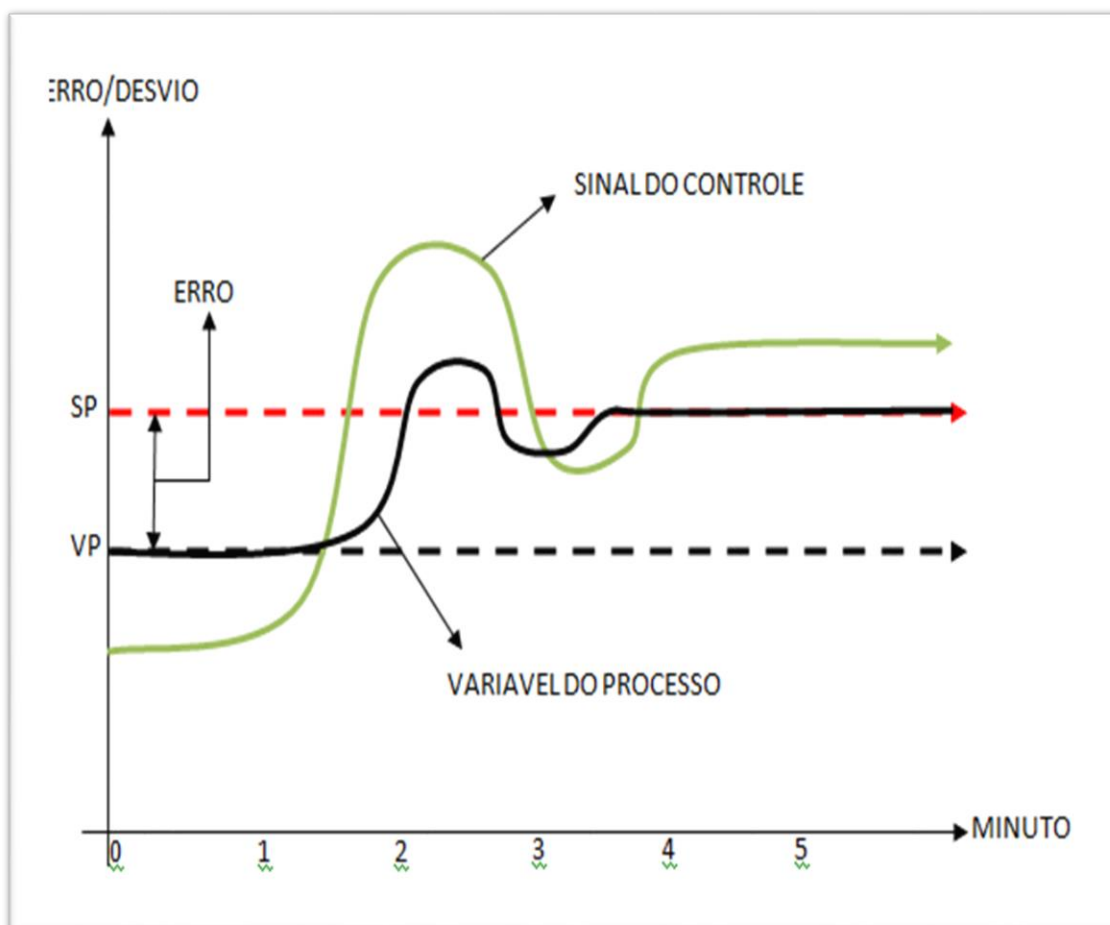
A figura 1, é uma representação de um *loop* de controle fechado, com controle proporcional, integral e derivativo (PID), contido internamente no PLC, operando no controle de um processo. Por exemplo: densidade interna do moinho, pela adição e modulação da água de alimentação pela válvula de controle. Nesse contexto, tem-se um *loop* fechado, medido, transmitido, comparado e com controle final, através da válvula (elemento final de controle).

Na figura 2, têm-se como apresentação as curvas:

- 1) Valor em linha reta, pontilhada, na cor vermelha define o valor do *set point* desejado no controle. Esse valor é operado ou variado pelo operador na sala de controle. Normalmente ele é fixo em um valor desejado ou demandado pelo processo.
- 2) Valor da variável do processo variando no tempo, na cor preta. O desejável é sua estabilidade em valor sem oscilações ou se variar é aceitável pequena oscilação dentro de certos limites ou tolerância, pois seu valor representa a grandeza que o processo deseja.
- 3) Sinal de controle ou também denominado variável controlada, é o sinal que sai do controlador PID, na cor verde, indo direto para a válvula de controle, manipulando, nesse caso, a água para controlar a densidade dentro do valor desejado pelo processo, moinho de bolas.

4) Erro mostrado na figura abaixo, é o desvio entre o valor desejado, (*set point*) e o valor da densidade medida, (variável do processo).

Figura 2 - Resposta típica da ação de um controle PID



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.7 Fundamento ao tema equipamentos

Nessa fundamentação apresentar-se-á os equipamentos principais dentro da mineração, responsáveis por cominuir, moer e separar as partículas finas de Fe_2O_3 das partículas ainda maiores, possivelmente contendo agregados indesejáveis.

Ao tema equipamentos será feito um relato quanto ao moinho de bolas, corpos moedores, hidrociclone, com o objetivo de avançar nesta pesquisa no tema em questão, cujo objetivo principal é a medida da densidade dentro moinhos de bolas, ARRUDAS (2008).

Figura 3 - Moinho de Bolas na Mineração



Fonte: METSO CORPORATION BRASIL (2019).

Figura 4 - Moinho de Bolas em Operação na Mineração



Fonte: Elaborada pelo autor desta pesquisa.

Na figura 03, está a foto de um moinho de grandes proporções, de fabricação alemã, apresentado ou representado no modo estático. Na figura 04 é um moinho, também de grandes proporções de fabricação chinesa em operação contínua na indústria mineraria. Na parte frontal direita está o motor, cremalheira e a entrada dos insumos. Na parte ou lado esquerdo fica a saída da polpa moída. Já na figura 05, é uma vista interna do moinho, exibindo o seu enchimento interior com bolas de aço, (corpos moedores), inspecionadas pelos responsáveis pela operação, onde tal

enchimento atinge praticamente a metade de seu diâmetro.

Figura 5 - Parte interna do moinho de bolas



Fonte: METSO CORPORATION BRASIL (2019).

Figura 6 - Corpos Moedores de Bolas de Aço



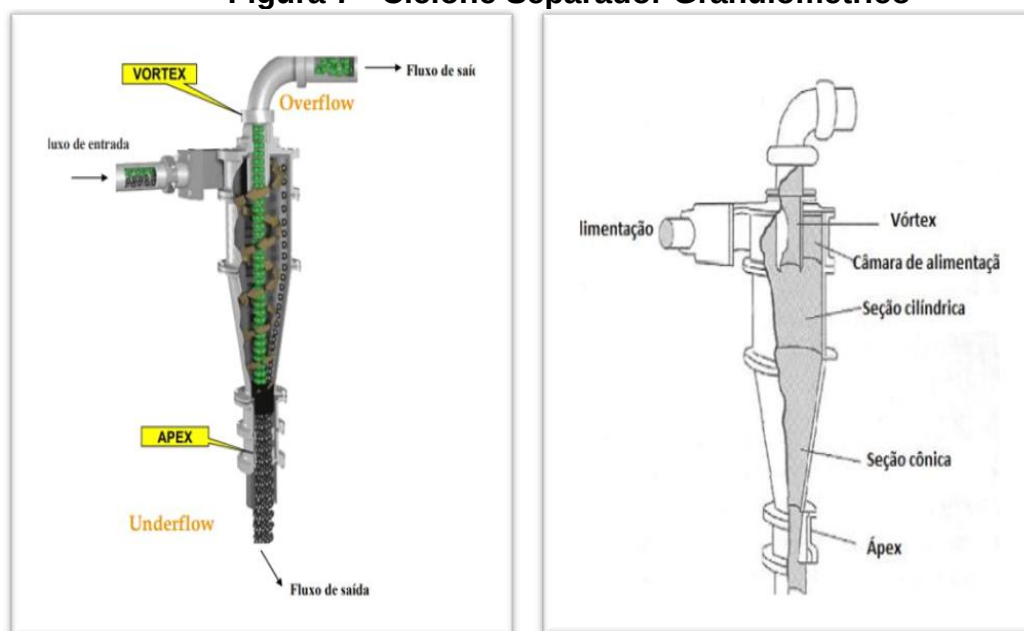
Fonte: Huazhen (2019).

A figura 6, exhibe as bolas (corpos moedores), em tamanho ou diâmetro que pode variar de 2 a 3 polegadas. Pelo lado direito está representado o enchimento estático de um moinho de grande porte.

O moinho de bolas varia muito de tamanho, tendo em média, nas usinas de mineração de grande porte, um comprimento aproximado de 06 a 08 metros, com

diâmetro interno de mais ou menos 4,5 metros. Quase metade de seu diâmetro interno está preenchido com esferas de aço, com diâmetro entre 2 à 3 polegadas, num total de mais ou menos, 200 a 260 toneladas de esferas (corpos moedores).

Figura 7 - Ciclone Separador Granulométrico



Fonte: Li et al. (2023).

A figura 7 exibe o equipamento ciclone, usado na mineração, responsável por separar as partículas com diâmetro e peso maior das partículas com diâmetro e peso menor. A separação acontece pela força centrífuga devido à pressão que impulsiona a alimentação da polpa que entra no ciclone de forma tangencial pela parte superior do cilindro. A pressão dessa alimentação por ser importante é muito bem controlada para formar na entrada, um movimento em espiral descendente, arrastando as partículas maiores e mais pesadas para a saída inferior. Já as partículas menores saem através de um movimento espiral ascendente denominado *overflow*.

2.8 Justificando uma carga de bolas em um moinho real

Abaixo segue uma descrição de um moinho de seis metros de comprimento por quatro metros de diâmetro:

- a) densidade das esferas de aço = 7.860 Kg/m^3 ;

- b) Volume interno do moinho = $06 \times \pi D^2 / 4 = 75,4 \text{ m}^3$;
- c) Metade do volume = aproximadamente 37 m^3 preenchimento com esferas;
- d) Peso interno com preenchimento esferas = aproximadamente 250 toneladas.

O moinho gira numa velocidade tal que as esferas sobem pela superfície interna, caindo fragmentando o minério, que entra em tamanho classificado por peneiramento, saindo naturalmente fino na forma de pasta ou polpa.

É importante observar que sua velocidade de giro deve ser bem caracterizada segundo tamanho, peso das esferas e, principalmente, das características de granulometria desejada no produto.

Normalmente os moinhos de bolas giram numa velocidade entre 70 a 85% da velocidade crítica. Velocidade crítica é aquela na qual a partir dela a carga é centrifugada, girando solidária as paredes internas do moinho. Por outro lado, velocidades bem mais baixas tendem a diminuir o efeito de cominuição nas zonas de quebra ou impacto, resultando uma operação de fragmentação apenas por atrito intersticial. Daí a necessidade de se determinar uma velocidade ótima de rotação, a fim de maximizar a eficiência da fragmentação e moagem. Sugere-se que a equação abaixo ofereça a condição de cálculo para determinar a velocidade crítica, V_c , de um moinho de bolas. Equação escrita por Bond (1971).

$$V_c = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{R-r}} \quad (\text{rpm}) \quad (8)$$

g = aceleração da gravidade local

R = raio interno do moinho

r = raio das esferas

Internamente dentro do moinho, em carga, têm-se as zonas de impacto, com quebra e moagem. Por esse motivo que se justifica o controle da densidade da pasta ou da polpa interna. À medida que o moinho é alimentado, haverá um equilíbrio mássico, saindo à mesma quantidade de finos em forma de pasta ou polpa, equivalente a entrada de minério alimentado. O rendimento da moagem de um moinho de bolas está relacionado ou dependente de quatro ou cinco variáveis, quais sejam: rotação, tamanho das esferas ou bolas de aço, quantidade, peso e especialmente, a

densidade interna da moagem. A rotação, tamanho, peso e quantidade de esferas, são variáveis que após definidas e ajustadas tornam-se constantes. O tamanho máximo do corpo moedor (bolas) deve ser o suficiente para quebrar as partículas do minério alimentado. Seu tamanho nominal e consequentemente peso, deve ser tal que, venha propiciar uma boa fragmentação sem, no entanto, provocar um desgaste elevado no revestimento interno do moinho.

A fórmula de Bond é a mais usada ou conhecida para determinar o tamanho máximo das esferas ou bolas de aço. Por outro lado, a densidade interna da moagem é a grandeza que pode estar variando quando sem o devido controle. Daí à necessidade de sua medição e ajuste por meio de controle automático, *online*, garantindo, dessa forma, a estabilidade de seu valor interno, aumentando, assim, o rendimento máximo da moagem.

Nos moinhos de bolas, especialmente nas empresas de mineração, do Estado Minas Gerais, sabe-se não existir a preocupação em adotar a estratégia da medição correta, *online* da densidade interna do moinho, pois acredita que a sua medição pode ser muito difícil ou talvez quase impossível. Por isso, consequentemente o respectivo controle interno automático, *online*, baseado na densidade interna medida, dentro do moinho ainda é um mito.

De um modo geral, as empresas têm adotado como base para controle interno da densidade, a potência elétrica do moinho. Todavia, o *loop* desse tipo de controle é aberto, a água normalmente entra num regime constante, portanto, sem modulação de controle *online*.

A polpa saindo do moinho segue direto para o tanque de homogeneização, aonde seu transporte, conduzido por gravidade, impossibilita por completo a medição da densidade. A partir da grelha, por tubulação, a polpa espessa desce e, muitas das vezes, não operando completamente cheia, apresentando bolsões ou espaços vazios internamente no escoamento. Isto causaria erros grosseiros na sua medição.

Na hipótese da transferência da polpa do moinho para o tanque de homogeneização via bombeamento centrifugado, o que é pouco provável, pois a poupa é muito espessa, mantendo a tubulação cheia, o que poderia, então, existir condições favoráveis de medição da densidade, a qual seria nesse caso por meio de medidor radioativo.

Na instalação do medidor radioativo, deve ser respeitado ou observado no local de sua instalação e medição, além da tubulação em condições de estar sempre cheia,

um determinado trecho reto, a montante e a jusante, deve ser respeitado, segundo as normas técnicas do fabricante do medidor de densidade radioativo, o que nem sempre é possível na instalação.

A estratégia do controle da densidade da moagem do minério, somente pela adição proporcional da água, manipulada pela pesagem contínua do minério que entra no moinho, também não é plenamente satisfatório, tendo em vista que sua umidade natural é variável, assim como, o retorno da polpa vinda do rejeito do hidrociclone, ser irregular tanto em termos do minério parcialmente rejeitado, assim como a quantidade de água nele associado, FLUID (2018).

Considerando as variáveis sem controle na entrada, e na impossibilidade da medição direta da densidade por meio do medidor radioativo, nova estratégia de cálculo e medição da densidade foi estudada e desenvolvida analiticamente para a operação automática do moinho de bolas no processamento do minério de ferro.

Com a finalidade de se conseguir e variar as novas alternativas de medição para comandar o controle automático, considerando a possibilidade do insucesso da primeira opção (o radioativo), apresentado qual seja, a densidade medida, optou-se por três condições de intertravamentos, como na figura 12, página 69, apresentando opções de alternâncias manuais variadas entre si. Assim sendo, elaborou-se as estratégias de controle baseado em 03 possíveis alternativas: posição 01, acionamento da água manipulada pela pesagem do minério bruto de alimentação do Moinho, transportado por correia; posição 02, acionamento da água, comutada pela densidade medida pelo radioativo na saída do moinho, caso ela viesse a existir; e, posição 03, acionamento da água pela densidade medida dentro do moinho.

A estratégia de posição 03, teve por base o novo algoritmo de cálculo, solucionado no passado analogicamente, à época do estudo preliminar, (início da década de 1980). Neste período, pouco se conhecia de PLC ou computador de processo. As três alternativas acima, para o controle de densidade, incorporadas no projeto à época, tinha-se dúvidas ou receios na operação como uma boa resposta da condição favorável da estratégia da operação 03.

Saindo do moinho, a polpa segue descendo por gravidade até o tanque de homogeneização, (ver figura 8), onde se observa no topo do tanque uma tubulação de diâmetro maior (aproximadamente 18 polegadas), por onde desce por caimento a polpa para dentro do tanque. Na tubulação de diâmetro menor, (aproximadamente 8 polegadas), cai a água controlada para diluição da polpa. O tanque de

homogeneização, naturalmente está aparelhado autonomamente com medição e controle do nível e, com medição e controle da densidade da polpa pela água admitida, modulada e controlada.

Tais controles de nível e densidade são monitorados e registrados eletronicamente pelo CCO, na sala de operação da empresa. A agitação da mistura, polpa e água dentro do tanque, normalmente acontece satisfatoriamente pela própria emulsão e queda da polpa e da água dentro do tanque.

Em termos gerais, é o que se espera de um sistema de homogeneização bem desenvolvido, aparelhado e controlado. Todavia, nem sempre se tem um controle, talvez por problemas da medição da densidade via CCO ou pela inabilidade da sintonização dos parâmetros de controle originados no CCO da empresa. Isto observado e registrado na operação *in loco* controlado pelo CCO da empresa.

Ainda no mesmo tanque, agora na figura 9, tem-se instalado um medidor de densidade, em primeiro plano, denominado carrapato de fabricação SMAR-SP, medindo e transmitindo o valor da densidade da mistura e polpa para a sala de controle. Cumpre ressaltar que nesse caso, e, evidenciar que a medição da densidade da polpa, através do medidor, denominado carrapato; não funcionou como pretendido. Porque foi muito instável e, ao mesmo tempo muito dependente de um bom controle do nível e do gradiente alheatório do particulado dentro do tanque. Portanto, o medidor denominado carrapato, da figura 9, estava desativado por ocasião da visita de inspeção. Observação e trabalho local de instalação (figura 8), novos instrumentos foram instalados no topo e na base do tanque como sensores para medição.

Para solucionar este problema do carrapato (figura 9) no tanque de equalização, foi instalado o equipamento MD-01 LP, aqui investigado, que em 2017, defendeu sua dissertação de mestrado. Tal aparelho ou instrumento digital, para medição da densidade da polpa com maior precisão, foi instalado no tanque de homogeneização. O aparelho em questão foi transferido para a PUC Minas para patenteá-lo como um novo tipo de medição e transmissão da densidade local.

Na figura 8, a presença de técnicos sobre o tanque de homogeneização foi para instalação de um novo medidor de nível ultrassônico, independente, medindo e transmitindo o nível da polpa dentro do mesmo, para uma nova e independente medição local do nível, também uma cápsula de pressão hidrostática para interligação com o novo equipamento, MD-01 LP, de densidade em teste. Porém, a medição e o controle da bomba na saída do tanque, permaneceram ainda, sendo

independentemente sendo realização automática via CCO, variando a rotação da bomba na saída baixa do tanque (ver figuras 8 e 9).

A montagem do novo ultrassom no topo do tanque foi para tornar independente a estratégia da nova medição e transmissão da densidade interna da polpa *online*, com o novo equipamento. O êxito com esse novo e moderno equipamento medidor e transmissor da densidade local *online* foi total, durante a operação dos testes de comparação entre medições transmitidas e medição local por amostras sucessivas. A operação dos testes teve uma duração de aproximadamente de 30 dias corridos com registros eletrônicos no local e posteriormente, a transmissão foi enviada para o CCO onde também foi registrada.

Figura 8 - Tanque de Equalização da Polpa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 09 - Tanque com medidor de densidade e tubulação de saída



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.9 Fundamentação da ação efetiva do PLC no controle

Nas figuras 10, 11 e 12, pode-se notar um pequeno grau de complexidade no resumo dos cálculos digitais, onde se pretende chegar ao sinal eletrônico equivalente a uma densidade que se traduz numa dimensional, como sendo, tonelada por metro cúbico (t/m^3). Esse sinal, é então enviado para a chave de comutação, posição 03, que o envia como variável a ser controlada pelo FIC-104, comandando automaticamente a admissão da água (*head water*). Hoje, com o advento da tecnologia, aproveita-se parte das medições e cálculos realizados, acrescentando no conjunto de processamento digital, do PLC local ou remoto. Então, realizando mais cálculos, determinando-se assim, a massa circulante no processo em termos de tonelada hora (t/h), e seu respectivo registro.

A partir da massa circulante, com mais cálculos, permitiu-se determinar o rendimento da moagem e seu respectivo registro em tempo real, o que proporcionou aos operadores, o devido acompanhamento pelo CCO, o rendimento máximo da moagem.

A figura 11, mostra e representa um fluxograma básico e o resumo da estratégia

inicial da medição e cálculo da densidade interna do moinho. Neste trabalho, utilizou-se de um PLC individual com quatro entradas analógicas ou digitais; duas saídas, uma direcionada para o bloco PID interno do PLC. O sinal de saída calculado que entra no PID do PLC, compara seu valor com o valor desejado da densidade interna do moinho, (*set point*) setado no PLC, que executa o controle, proporcionando uma saída analógica de 4 a 20 mA, (variável controlada), que irá controlar a quantidade exata de água a ser introduzida no moinho em movimento.

O fluxograma com a estratégia numérica completa e descrita, com os respectivos algoritmos mostrando na íntegra dos cálculos algébricos é ainda, por ora, mantido em reservado, cujo direito autoral ainda está por ser solicitado junto ao INPI, como solicitação de patente, que em breve será solicitada oportunamente.

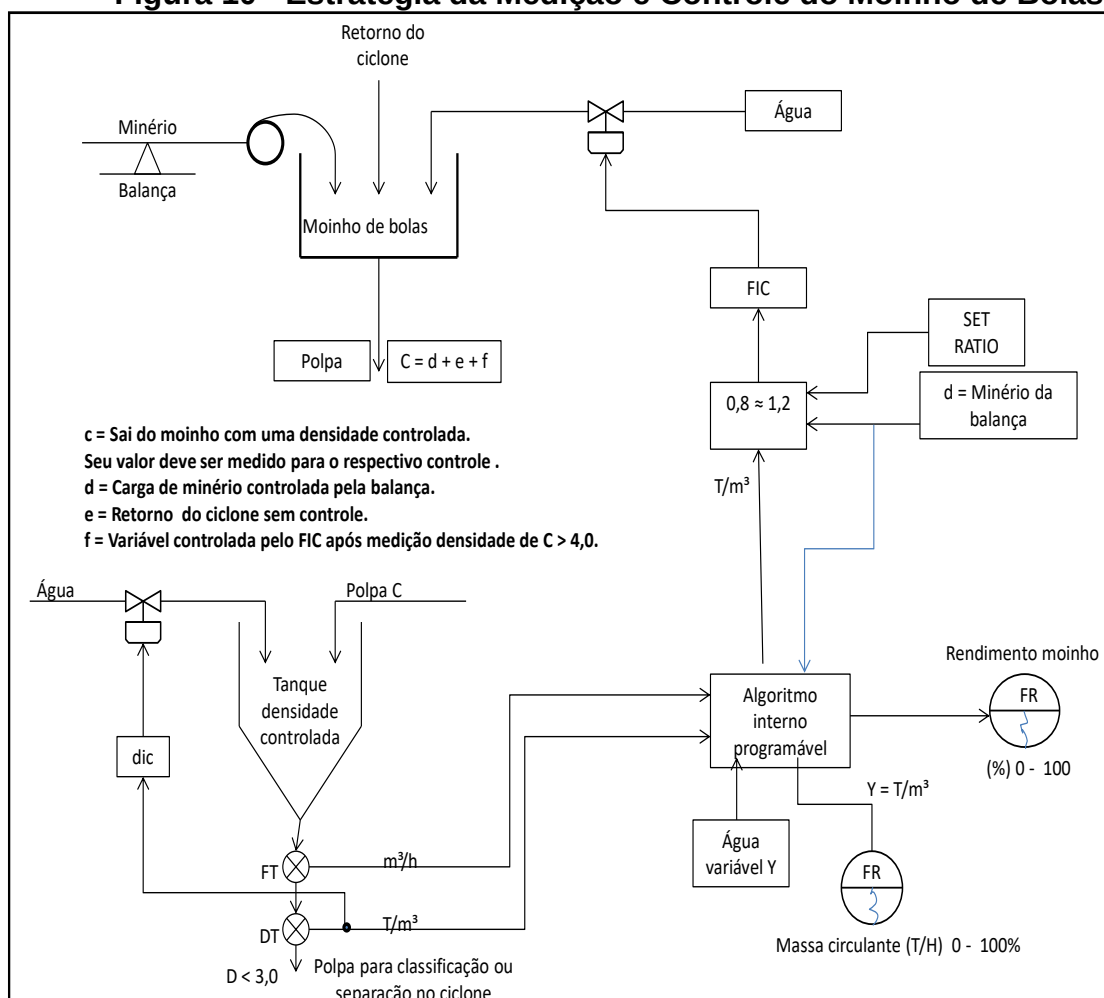
Os fluxogramas apresentados nas figuras 10, 11 e 12, como estratégias da medição, cálculo da densidade reinante dentro do moinho, em movimento e, seu respectivo controle elaborado dentro do algoritmo apresentado, em forma de blocos digitais, denominado de cálculo, está contido em apresentação no resumo esquemático.

No início da década de 1980, a compra dos cartões analógicos, controlador eletrônico, chave seletora de sinal, instrumentos individualizados e, respectivas instalações eram extremamente cara. Hoje, com um custo, bem inferior compra-se um pequeno PLC, com processamento digital e interface IHM com quatro entradas analógicas ou digitais, uma placa principal com os respectivos processamentos interno programável comum controlador PID digital, com saída analógica ou digital a qual vai modular a válvula de controle de água para o moinho.

O PLC é um aparelho de baixo custo, bem como sua programação, apesar de ser um pouco trabalhosa.

O que se sabe hoje, em termos de preço, no início da década de 1980, comparando o preço da época, para um sistema analógico de medição e controle, para o preço do mesmo sistema de medição e controle de hoje em dia, a variação está em termos de preço, de 1200% a 1500%.

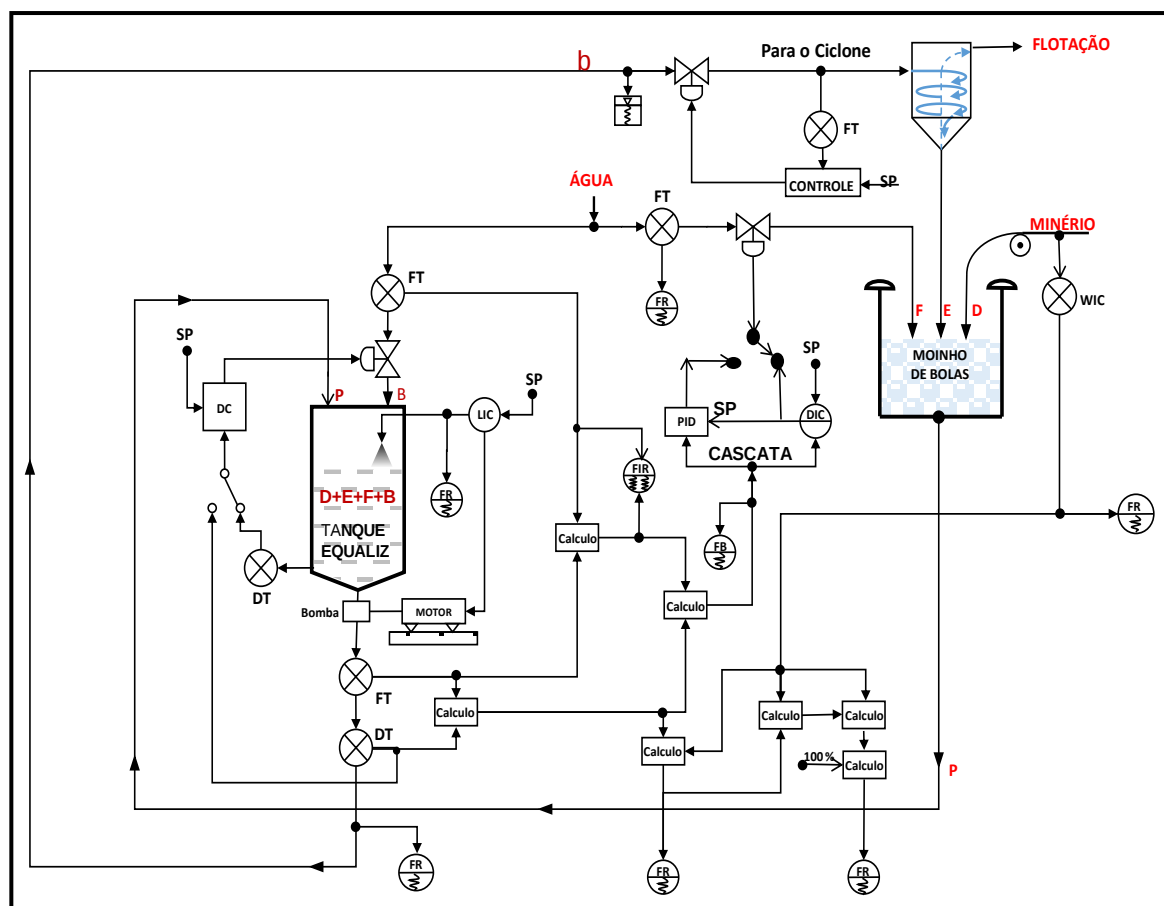
Figura 10 - Estratégia da Medição e Controle do Moinho de Bolas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 10, acima, se tem uma nova representação simplificada do fluxograma do moinho, tanque de equalização da polpa e, as respectivas variáveis do processo que entram, fazendo parte do sistema de medição da densidade, via cálculo, representado pelo bloco do algoritmo programável, cuja saída do bloco segue, como variável controlada para o devido controle da água que entra no moinho, controlando a densidade no valor desejado, (*set point*), requerida para o melhor rendimento na cominuição e moagem do sistema de moinho de bolas.

Figura 11 - Representação Formal do Fluxograma Completo e Controle



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 11 é a representação do fluxograma dos cálculos com o fluxograma completo e atualizado do controle geral do moinho de bolas e seu respectivo controle, com o PID normal, ou ainda com possibilidade de chaveamento para o controle PID CASCATA. Exibe-se ainda, o controle de pressão da polpa entrando no ciclone e suas duas saídas.

Já na figura 12, é a representação por ordem numérica dos blocos de cálculos digitais, calculando a densidade interna do moinho. As variáveis indicadas e registradas na figura 12 estão definidas e classificadas. O valor da densidade calculada tem como saída, um sinal eletrônico de 4,00 a 20,00 mA ou sinal digital indo diretamente para o controlador da água para moinho, onde: 4,00 mA representa uma densidade igual a 1,00, e 20,00 mA representa uma densidade igual a 5,00, por exemplo, valor programável.

O controle da densidade no tanque de equalização da polpa, ver figura 10, como já mencionado, é feito por um sistema de controle independente e autônomo,

instalado no campo, junto ao Tanque ou diretamente controlado via CCO central.

Todas as experiências, envolvendo a programação interativa do PLC local, desse trabalho e, respectivos testes de operação foram realizados em laboratório, com o PLC recebendo de maneira simulada em termos de geração das quatro entradas, fornecendo a saída, indo para o PID interno do PLC. Do PID sai o sinal da variável controlada, indo direto para a válvula de controle da água alimentando o moinho.

2.10 Registros das variáveis no processo moinho de bolas

Segue os conceitos das variáveis no processo de moinhos de bolas:

a = Polpa saída do Moinho- (t/h)

b = Polpa equalizada no tanque, bombeada para o ciclone - (m³/h)

B = Água para tanque de equalização da polpa - (m³/h)

D = Entrada de minério bruto no moinho - (t/h)

F = Entrada de água no moinho - (m³/h)

G = densidade interna no moinho - (t/m³)

H = Massa circulante (retorno do ciclone -(t/h)

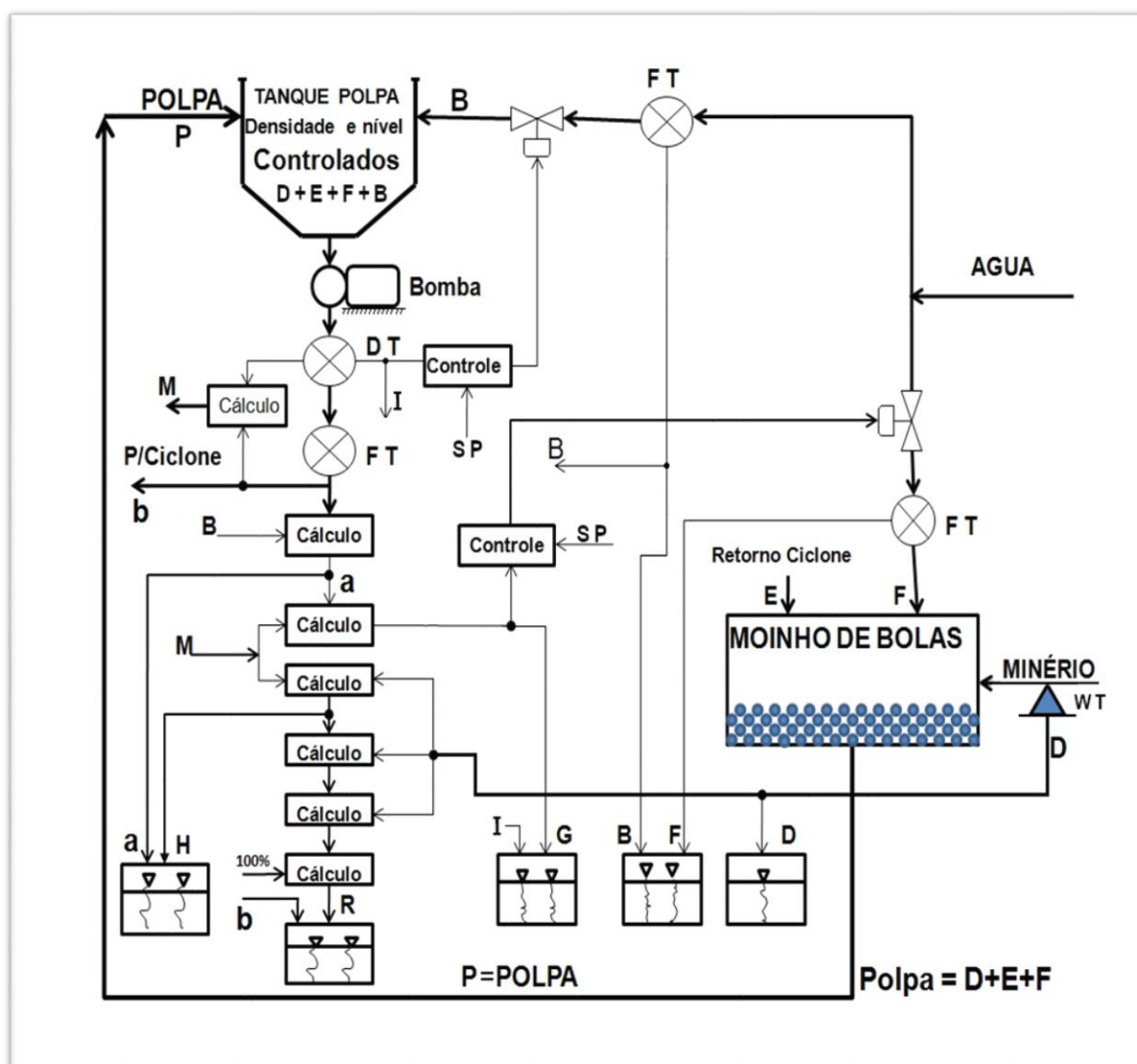
R =Rendimento do moinho - (x %)

I = densidade da Polpa Equalizada (t/m³)

E = Retorno rejeitado pelo ciclone sem medição instalada, valor calculado (m³/h)

M = Massa de polpa, (Fe₂O₃ + Lama), saída do tanque, (m³/h) x (t/m³) = (t/h)

Figura 12 - Representação do Fluxograma dos Cálculos Algoritmizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os registradores gráficos, indicados na figura 12, em número de 09, tanto podem ser registradores físicos analógicos, ocupando espaço nas instalações do CCO ou registradores digitais incorporados no PLC corporativo da empresa onde seus respectivos endereços são programados no próprio PLC.

No processo de registro digital, não se ocupará espaço físico, na sala controle, assim como o preço de tais registros físicos em painéis. Quanto ao registro digital, não aumentará em custo para a empresa senão, o próprio valor na compra do próprio computador ou PLC pela empresa. Assim, o custo por espaço, compra e instalação dos registradores poderá ser utilizado para outras melhorias na sala de controle.

2.11 Fundamentação da teoria das incertezas nas medições

A variável de processo, densidade, quando bem controlada tem sua importância fundamental na estabilidade e rendimento da moagem do minério base. Doravante, a variável do processo, denominada como mensurando o processo, é o valor da grandeza específica, densidade, a ser medida. A exatidão na medição da mensuração da polpa, tem seu início na especificação dos equipamentos primários, instalados no campo, com as suas devidas incertezas e procedimentos das medições correlatas. (ABNT., 2017).

A incerteza da medição por definição é um parâmetro associado ao resultado da medição que caracteriza a dispersão de valores que podem ser atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012).

A incerteza sobre a medição da densidade da polpa aqui calculada, normalmente engloba ou incorpora várias componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação tipo A, assim como por uma avaliação tipo B, ou ambas, configurando no caso duplo, uma incerteza da medição, ainda melhor na avaliação metrológica.

Seguem os conceitos de avaliações do tipo A e tipo B:

Tipo A: A incerteza padrão tipo A é baseada em métodos estatísticos utilizados para tratamento de dados originados em observações das flutuações ou desvios do valor exato, relacionando-os ao conceito de desvio padrão do ponto alvo ou do valor exato da grandeza medida.

Tipo B: É aquela incerteza efetuada utilizando informações normalmente, a partir, de dados de uma medição real anterior ou da incerteza dos equipamentos, em operação de campo, relacionada ao padrão de referência.

O ato de medir é um processo em que através da instalação de um equipamento primário, se determina ou se mede o valor de momento de uma grandeza física operacional. Os instrumentos aplicados na medição das variáveis do processo da moagem, em campo, são aqueles que serão relacionados com suas respectivas exatidões, integrantes no processo da medição, representados com incerteza declarada, levantada e garantida pelos respectivos fabricantes.

Como a densidade dentro do moinho de bolas é calculada pela mesclagem algébrica de várias medições, com equipamentos instalados, medindo as respectivas variáveis que entram no moinho, as quais tendo incertezas diferenciadas que

compõem e se somam entre si. É necessário observar que a densidade calculada terá como valor uma incerteza padrão combinada entre os valores das variáveis medidas. Por outro lado, ainda para se chegar a um valor real com uma determinada incerteza declarada existe ainda a possibilidade de erros nos cálculos através de blocos digitais internos que são passíveis de associar erros, todavia, tais erros serão negligenciados por serem operados ou processados sobre uma plataforma de cálculo digital com resolução de 32 bits onde o erro, a eles relacionados, como cálculo digital é insignificante.

Por outro lado, o conversor analógico/digital do PLC opera na conversão dos sinais das variáveis de entrada com 12 bits. Aqui existir erros, não na conversão, mas conforme os ruídos diversos que ocorrem no campo, devido ou causados por rádios transmissores, variadores de velocidade, cabos de alta tensão, projetos malfeitos com cabos de sinal eletrônicos com baixo aterramento etc.

Segue abaixo, a fórmula da incerteza combinada:

$$\text{Incerteza combinada, } X_c = \sqrt{M1^2 + M2^2 + M3^2 + M4^2 + M5^2} \quad (9)$$

Instrumentos de medição instalados no processo, campo Figuras 11 e 12:

M1 = Medidor eletromagnético de vazão da polpa, saída do tanque
Classe de exatidão garantida pelo fabricante = 0,5% abs.

M2 = Medidor de densidade radioativa da polpa equalizada
Classe de exatidão garantida pelo fabricante = 1,0% abs.

M3 = Medidor eletromagnético de vazão de água para moinho
Classe de exatidão garantida pelo fabricante = 0,5% abs.

M4 = Medidor eletromagnético de vazão de água para tanque
Classe de exatidão garantida pelo fabricante = 0,5% abs.

M5 = Balança para pesagem do minério transportado em correia para moinho
Classe de exatidão garantida pelo fabricante = 1% FS

Embora a incerteza combinada, (X_c), possa ser universalmente usada e aceita, expressando a incerteza de uma medição múltipla em aplicações especiais. Todavia, na simplificação, ao se apresentar uma medida da incerteza, define-se um intervalo de confiança sobre o resultado da medição.

Como opção, mas duas entradas de água, uma para a caixa de equalização da

polpa, referência 08, outra para água do moinho, referência 04, moinho de bolas, o tubo de Pitot Cole pode, evidentemente ser usado para fazer as medições correlatas. O tubo de Pitot Cole, conforma figura 13, tem uma precisão entre 1% à 1,5% conforme as equações;

$Q = S_{ef} \times K_d \times K_p \times F_t \times F_g \times F_v \times V \times F_{cL}$, onde:

Q = Vazão em metro cúbico por hora ou segundos

S_{ef} = Diâmetro da tubulação (m^2)

K_d = Coeficiente correção do diâmetro interno da tubulação

K_p = Coeficiente correção da introdução do tape na tubulação

F_t = Coeficiente correção da temperatura da água na tubulação

F_g = Correlação aceleração da gravidade local

F_v = Coeficiente cálculo da velocidade da água na tubulação

V = Velocidade da água na tubulação (m/s)

F_{cL} = Lamon coeficiente para correção da vazão da água na tubulação

Figura 13 – Tubo de Pitot Cole



Foto elaborado pelo autor.

O tubo de Pitot Cole não requer calibração, pois é um equipamento intrinsecamente autocalibrado, transformando energia de velocidade em de pressão. O que ele precisa, para sair de sua classe de precisão de 3:1, quando na medição em um processo industrial, é ter a curva F_{cL} -Lamon, polinomial de terceira ordem, que vai conferir ao tubo de Pitot Cole, uma exatidão dentro da curva corrigida de 40:1. As medições com o tubo de Pitot Cole, com as Maletas Lamon modelo MDH-600-300-C+ ou a Maleta MDH-3966.

Anteriormente, a incerteza expandida compreendida de valor de um novo parâmetro denominado K variado de 2 a 3. Portanto, K é um fator de expansão da

incerteza combinada, com base no grau de confiança que se deseja para que todos os valores medidos estejam agrupados dentro de um intervalo pré-determinado, normalmente relacionado com a distribuição normal de *t-Student*. Sendo $K=2$, a incerteza expandida ou fator de abrangência, nesse caso, corresponderá a um grau de confiança, onde 95% de todas as medições realizadas no levantamento da densidade calculada estariam com valores, dentro de um intervalo específico de confiança da curva de Gauss (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012).

$$X_{cs} = kX_c, \text{ ou seja, } X_{cs} = 2.X_c \quad (10)$$

X_{cs} = Incerteza expandida, X_c = incerteza combinada, $k=2$, fator de expansão

$$X_c = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2 + M_5^2}$$

$$X_c = \sqrt{0,5^2 + 1^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 1^2} = \pm 1,65\%$$

$$X_{cs} = 2 \cdot 1,65 = 3,3\%.$$

(11)

Portanto, a densidade medida, considerando as condições impostas ao cálculo inicial e final, estaria com um erro total máximo estendido de $\pm 3,3\%$ FS. O teste da veracidade da informação da incerteza, da densidade controlada pode ser conseguido, com as devidas amostragens da polpa retirada na saída da grelha. O operador retira amostras periódicas no local próprio, na saída do moinho e, com recipiente próprio específico e com balança digital precisa, pesa as amostras, declarando e registrando a densidade operacional do moinho no seu turno de trabalho ou as levam para o laboratório específico da empresa onde as amostras serão analisadas, medidas, confrontadas, e posteriormente com valores arquivados.

2.12. Descrição do Moinho de Bolas

Considerando o moinho físico, os corpos moedores e o hidrociclone, também físicos, eles serão analisados neste capítulo, como:

- a) Projeto de um moinho com suas prerrogativas físicas;
- b) Definição e cálculo do corpo moedor (bolas);
- c) Definição e cálculo do hidrociclone no corte das partículas finas e nas rejeitadas.

Neste capítulo, também, será descrito a composição do moinho, dos corpos moedores e do ciclone.

O moinho de bolas nas grandes mineradoras é o equipamento mais eficaz na fragmentação e moagem do material ferroso, duro e quebradiço. Os moinhos, de um modo geral, são semelhantes, porém com tamanhos diferentes e, ainda variando quanto aos corpos moedores, tornando-os numa vasta gama de aplicações e combinações dentro de suas respectivas utilizações.

2.12.1 Principais tipos de moinho

A seguir serão descritos os tipos de moinhos, porém nesta pesquisa foi estudado, apenas os moinhos de bolas.

- a) Moinho de bolas;
- b) Moinho de barras;
- c) Moinho autógeno (AG) e semi-autógeno (SAG);
- d) Moinho vertical;
- e) Moinho por compressão de rolos;
- f) Moinho de laboratório.

O estudo desse trabalho foca no moinho de bolas, usados com mais propriedade, na indústria de mineração, fragmentação e moagem, do minério de ferro, onde tal minério é normalmente pobre em percentual de Fe_2O_3 . Dentro do moinho, como já observado, se estuda como foco principal, medir, controlar e estabilizar a densidade, com o objetivo alvo de aumentar o seu rendimento operacional produtivo e energético.

O moinho se compõe de um corpo cilíndrico grande, girando em torno de seu próprio eixo. A carcaça ou o corpo cilíndrico é construído com chapa grossa, calandrada e soldada, semifechada nas extremidades. Porém, com abertura em um

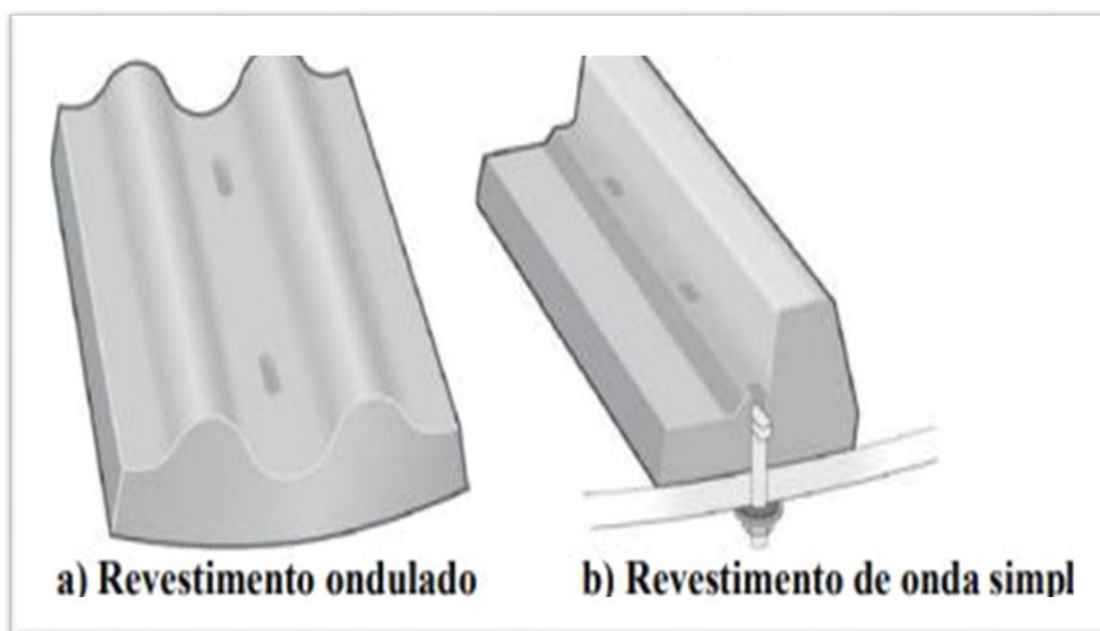
dos lados para entrada dos insumos, minério, água e o retorno rejeitado pelo ciclone, do lado oposto, abertura com grelha para saída do minério moído (polpa), e, dos corpos moedores desgastados.

A entrada dos insumos e saída da polpa, fazem parte do conjunto, dois munhões e respectivos mancais que sustentam todo o seu peso, enfatizando que o peso do conjunto sustentado é de centenas de toneladas, composto por: carcaça, revestimento, corpos moedores de minério e água.

O material usado na sua fabricação é o aço fundido ou calandrado, usinado e soldado com modelos pré-definidos, pois devido a sua complexidade de instalação e montagem, apenas seu comprimento é alterado, pois os moldes, quando da fundição e da fabricação são de alto custo, (Chaves e Reveri, 2011).

Internamente o moinho é revestido por material resistente ao desgaste onde ele é também soldado ou rebitado. As suas saliências longitudinais permitem maior aderência na subida das bolas, é a razão de ser da cominuição (figura 13).

Figura 14 - Revestimento interno do moinho de bola



Fonte: METSO CORPORATION BRASIL (2019).

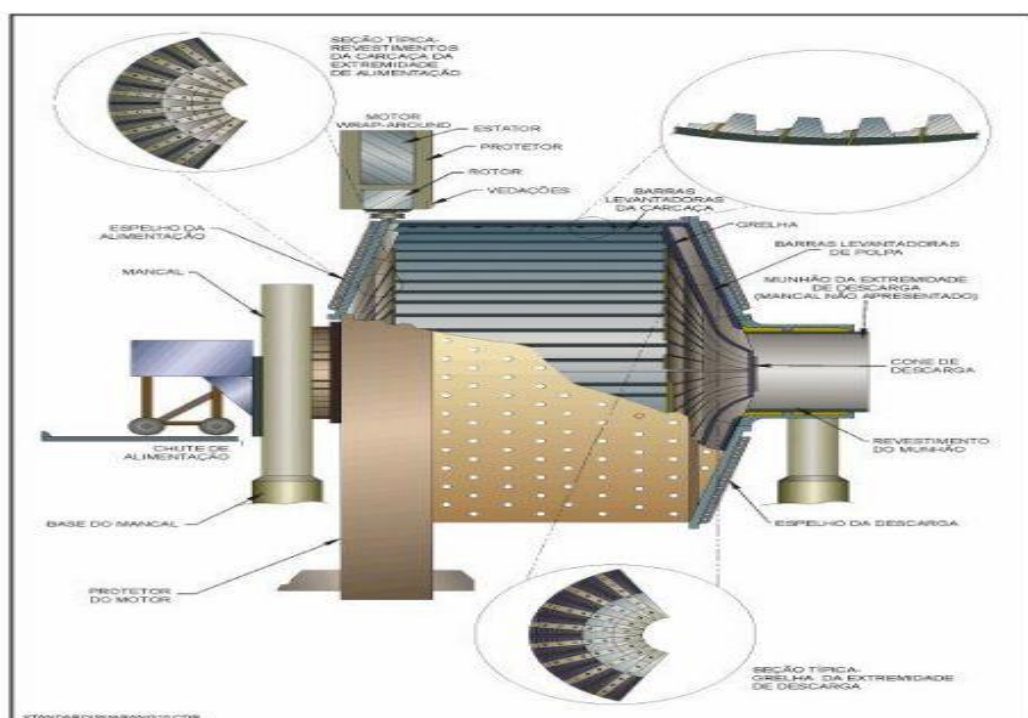
O desgaste do revestimento interno dos moinhos de bolas na mineração tem uma influência direta na eficiência da moagem, tanto pela efetiva movimentação de subida dos corpos moedores (bolas de aço), assim como pela própria vida útil do revestimento, (GODEFROID, 2020).

Por outro lado, o desgaste não se mostra uniforme internamente, apresentando variações nas três seções analisadas: alimentação, centro e descarga. Onde os engenheiros e técnicos do processo demonstraram que o desgaste existente é mais acentuado na seção de alimentação do moinho.

Segundo Cassola, Moraes e Albertin (2006), os revestimentos e sua disponibilidade interna são essenciais, pois, seu papel é crítico na moagem, cuja finalidade, além de proteger a carcaça do moinho, transfere energia potencial aos corpos moedores.

Com isso, encontra-se no perfil um revestimento perfeito, que busca a melhora e a eficácia da moagem, onde simultaneamente, proporciona uma maior conservação da proteção do moinho e a diminuição do desgaste e a ilação do custo (Silva 2014).

Figura 15 - Representações Esquemáticas de um Moinho



Fonte: Bergerman (2009)

2.12.2 Elementos estruturais dos moinhos de bolas

Segue abaixo os elementos estruturais dos moinhos de bolas:

- Carcaça feita de chapa de aço calandrado e soldado ou aço fundido;
- Cabeças, espelhos ou tampas fechando as extremidades da carcaça;
- Munhões ou pescoço fazendo parte das tampas, sustentando todo o peso

do moinho;

- d) Mancais com lubrificação forçada no seu interior, sobre o qual gira os pescoços apoiados;
- e) Revestimento interno com material resistente, ondulado ou em degrau;
- f) Acionamento por motor elétrico no sistema coroa-pinhão.

Como já enfatizado, o moinho é a ferramenta ou equipamento mais eficaz para uma moagem fina de forma contínua, *online*, onde possivelmente vários tipos de minério e outros materiais minerários são moídos para uma posterior concentração ou separação desejada, BUMBERGER (2004).

A fragmentação decorre da movimentação da carga composta pelos corpos moedores juntamente com o minério, onde no giro acontece a cominuição por queda através das bolas que sobem, caindo fragmentando ou cominuindo o minério que na parte inferior entra o atrito intersticial das bolas como minério.

Esse tipo de moagem pode ser denominado de moagem semi-autógeno, (SAG), onde o moinho girando com o próprio material da alimentação, minério, juntamente com os corpos moedores, constituem o conjunto da moagem, HUAZHENG (2019).

Existem dois tipos de moagem: (1) a moagem a seco utilizada no processo em que o material base, não pode ser molhado devido a reação com a presença de água no processo. Todavia esse não é a proposta desse trabalho. (2) A moagem via úmida é a mais usada nas operações do processamento mineral, devido a economia e o rendimento global da operação. Esta moagem é a estudada nesta pesquisa.

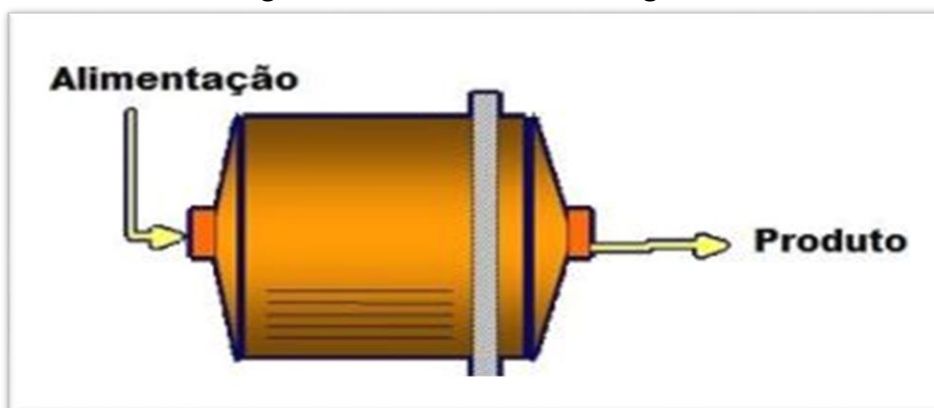
As vantagens desse tipo de processo via úmida, conforme Cassola, Moraes e Albertin (2006), são:

- a) Menor consumo energético por tonelada de material;
- b) Maior capacidade por volume do moinho;
- c) Possibilidade de uso com peneiramento ou concentração via úmida com controle mais preciso;
- d) Eliminação de problemas relacionados com a poeira;
- e) Dissipa o calor gerado na cominuição dentro do moinho;
- f) Possibilita o uso de meios de transporte do material moído mais simples como bomba, tubulação e calhas.

O circuito de moagem é dividido em dois grandes grupos: circuito aberto e circuito fechado. No circuito aberto, o material a ser moído tem apenas uma passagem

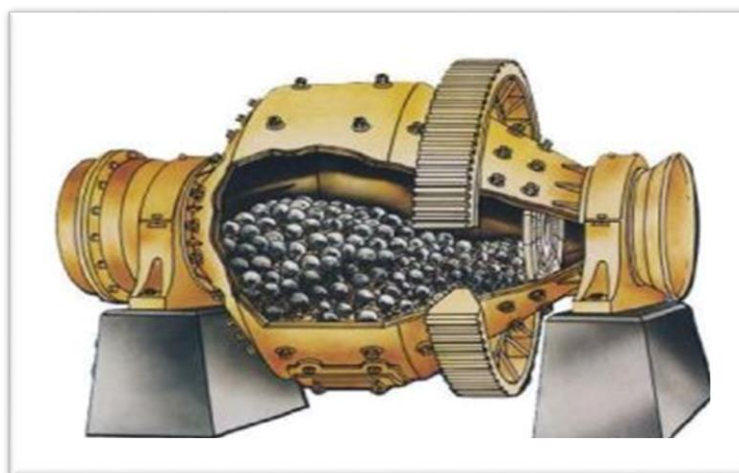
pelo circuito, atingindo as especificações desejadas. Ainda nessa condição, o material ou mineral base, necessita de uma menor taxa, permitindo garantir que todas as partículas permaneçam o tempo suficiente dentro do moinho para atingirem tamanho granulometria desejada.

Figura 16 - Circuito de Moagem Aberto



Fonte: METSO CORPORATION BRASIL (2019).

Figura 17 - Interno Moinho Moagem aberto



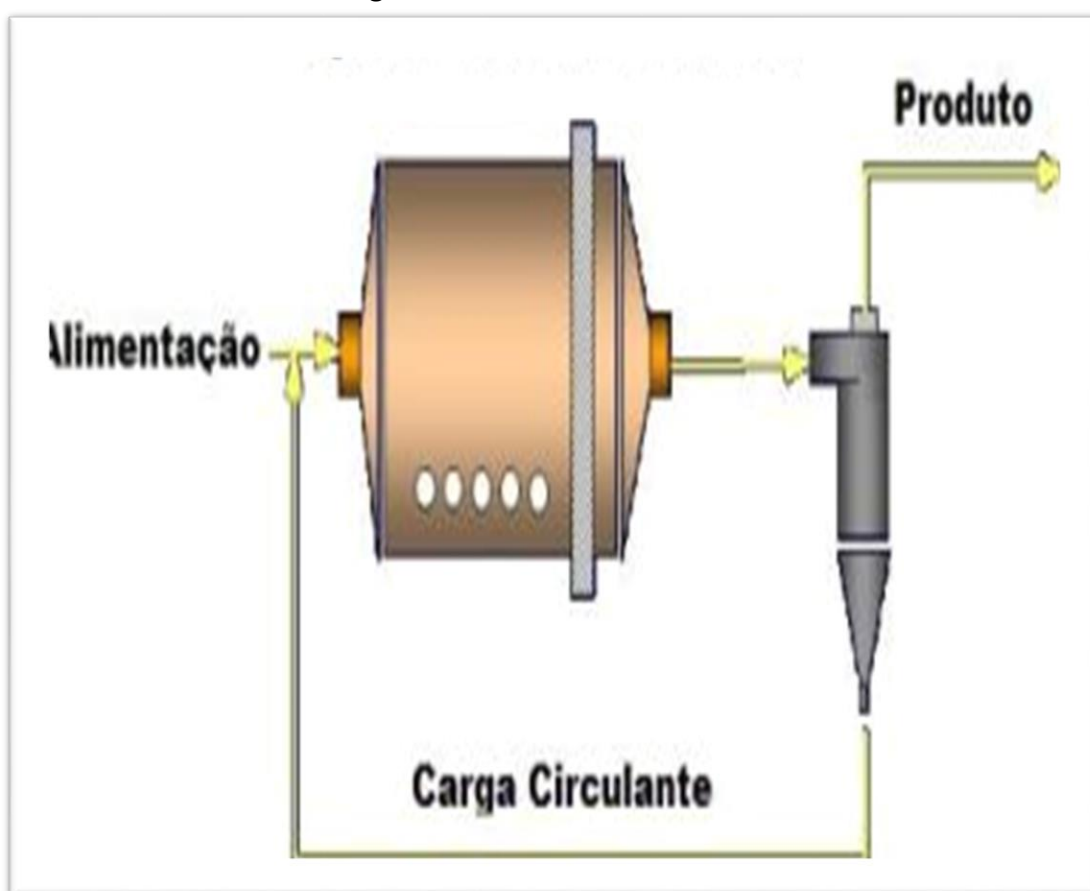
Fonte: METSO CORPORATION BRASIL (2019).

Na operação circuito fechado (figuras 18 e 19) ou semifechado tem-se como objetivo remover do moinho, o mais rápido possível, ainda que fechado, as partículas residentes que já atingiram a granulometria desejada. Desse modo, além de conseguir uma moagem mais equilibrada há uma redução sobre moagem do material a cada nova passagem pelo moinho, o que pode aumentar a energia no consumo pelo excesso de fragmentação efetiva das partículas (Chaves e Reveri, 2011).

Na condição ou sistema de carga em circuito fechado ou semifechado pode

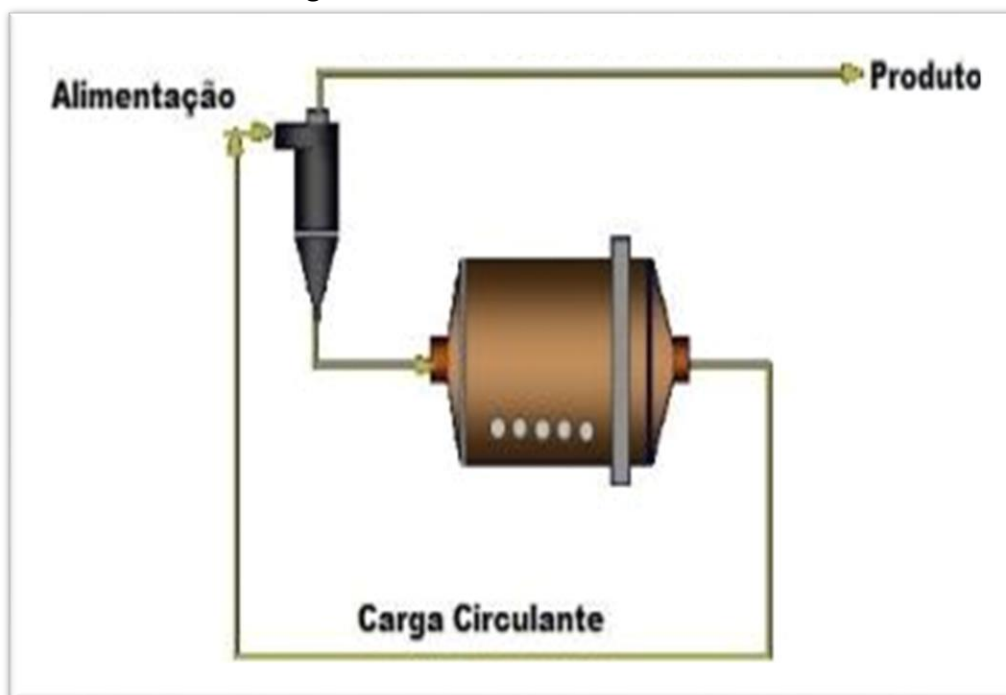
gerar uma elevação da massa de sólidos no interior do moinho e consequentemente uma redução de finos pelo excesso de carga onde nesse tipo de configuração, circuito fechado, as partículas podem retornar ao moinho diversas vezes até alcançar a especificação, podendo acontecer, quando sem controle, uma sobre moagem desperdiçando energia e, as vezes o produto. No circuito semifechado pode gerar uma elevação da massa de sólidos no interior do moinho, consequentemente podendo ocorrer uma redução de finos no seu interior pelo excesso de carga.

Figura 18 - Circuito Fechado Direto



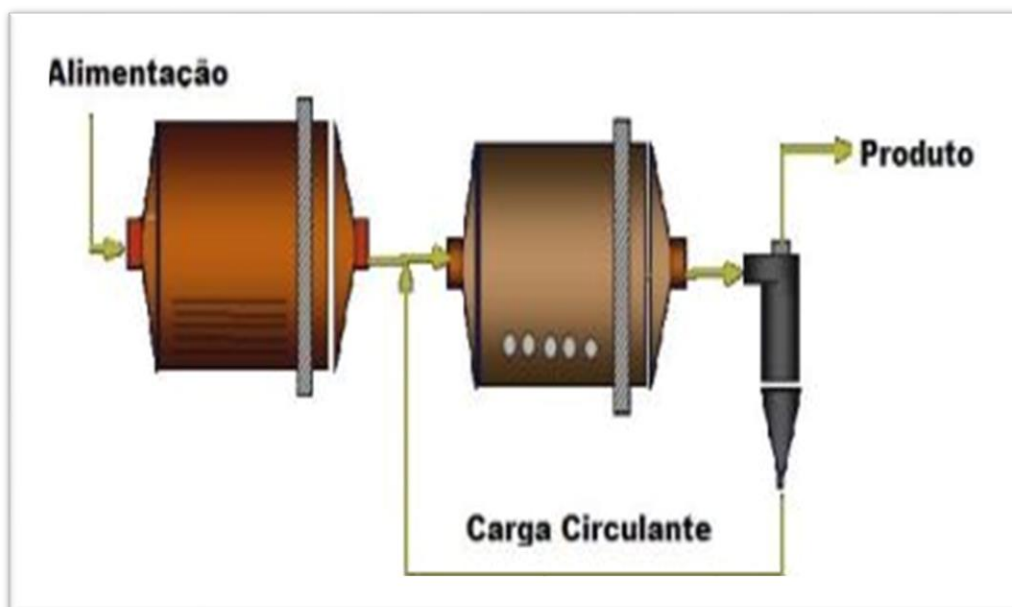
Fonte: Silva (2014).

Figura 19 - Circuito Fechado Reverso



Fonte: Silva (2014).

Figura 20 - Circuito Fechado Misto



Fonte: Silva (2014).

No circuito fechado misto na figura, carga circulante pode gerar uma elevação na massa de sólidos no interior do moinho reduzindo o tempo de permanência das partículas e consequentemente uma redução na geração de finos ocorrendo, por conseguinte mais uma sobre moagem.

2.12.3 Modelagens do moinho de bolas

Os circuitos de moagem têm sido otimizados inicialmente utilizando modelos matemáticos que relacionam dados industriais de uma moagem. Esses dados levantados na prática, como parâmetros de fragmentação e a energia específica utilizada na cominuição a partir de laboratório da empresa ou diretamente no processo real de campo, seguindo com ajustes práticos experimentais e operacionais. Um modelo matemático é uma equação ou conjunto de equações que procuram representar uma ação aproximando-a de um processo real (Mazzinghy, 2009).

Na teoria de simulação de um processo real na moagem, significa construir um modelo matemático que, na maioria das vezes será sempre empírico, o qual representará as características do fenômeno moagem em detalhes, onde se usa posteriormente um computador a fim de resolver o problema simulado intrinsecamente.

Tipos de modelos que podem representar um processo simulado de moagem (Silva e Carneiro, 2013):

- a) Empírico ou prático, compõem-se de equações de regressão e/ou redes neurais ou Inteligência Artificial (IA);
- b) Fenomenológico, utiliza de alguns princípios da engenharia física e química;
- c) Fundamental, utiliza de equações algébricas e diferenciais, baseadas em leis fundamentais da física e química requerendo um mínimo de calibração, (por exemplo: MEF, dinâmica dos fluidos, DEM), etc.

Silva e Carneiro (2013), afirmam que atualmente, são várias as ferramentas de modelagem matemática utilizadas no mercado. Uma das mais usada é o *Moly-Cop Tools* que compreende um conjunto de planilhas da Microsoft-Excel, projetadas para caracterizar e avaliar a eficiência operacional de qualquer circuito de moagem de minério. Desta forma, a metodologia padronizada com avaliação dos resultados é amplamente aceita. Várias são as planilhas adicionais disponibilizadas pelo *Moly-CopTools*, para os mais diversos cálculos na mineração.

Como exemplo, cita-se:

- a) Solução na resolução da teoria de Bond;
- b) Correlação do consumo de energia do moinho;
- c) Otimização na dimensional da carga dos corpos moedores (bolas); e,

d) Modelagem do hidrociclone e outras funções gerais na área da mineração.

De um modo geral na simulação do moinho de bolas ocorrem etapas e, para cada etapa uma planilha do *software Moly-copTools* é disponibilizada.

O tema simulação e otimização do moinho de bolas e seus acessórios vem sendo estudados, simulados e otimizados historicamente há muitos anos, onde cientistas da área, na maioria de seus estudos, tentam através de equações empíricas, em teste e experimentos aproximar os resultados teóricos com os dados obtidos na prática do processo.

2.12.4 Planilhas para modelagem do moinho de bolas

As planilhas de *software* do *Moly-Cop Tools*, de um algoritmo do eficiente modelado no Excel, ajudam a calcular valores parametrizados que melhor e mais se aproximam daquele modelo real otimizado no experimento no campo. Desta forma, o *Moly-Cop Tools* de simulações possibilita ao usuário colher detalhes e resultados abstendo-se dos complicados métodos matemáticos de otimização que na maioria são cálculos empíricos.

Por esse motivo, as planilhas ajudam, auxiliando ao usuário no entendimento e interpretação dos resultados do projeto do moinho com sua respectiva moagem que possivelmente será ajustado posteriormente na prática de campo, pelos técnicos e engenheiros responsáveis pelo melhor desempenho do moinho e acessórios.

Exemplo de planilha formatada para um determinado moinho (figuras 21):

Figura 21 - Planilha Data File

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLSIM : Conventional Open Circuit Grinding Simulator

Circuit Type: **OPEN** (see Flowsheet) Simulation N°: **0**

Remarks: **Moinho 47**

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	Eff. Length ft	Speed % Critical	Charge Filling %	Balls Filling %	App. Dens. ton/m ³	Interstitial Slurry, %	Lift Angle, (°)
15.0	16.5	70.0	50.0	32.0	4.11	100.0	34.9
	rpm	13.98					

Ore Density, ton/m³: **3.80**

Balls Density, ton/m³: **8.65**

% Solids Mill Discharge: **30.0**

Feedrate, ton/hr (dry): **900.0**

Feed Moisture, %: **70.0**

Main Simulated Outputs

P80	422.4
W80	23.42
% Fines MD	3.19

Feed Size Distribution

i	Mesh	Opening	Mid-Size	ton/hr	% Retained	% Passing
1	1.05	25400				100.00
2	0.742	19050	21997	0.00	0.00	100.00
3	0.525	12700	15554	0.00	0.00	100.00
4	0.371	9500	10984	0.00	0.00	100.00
5	3	6700	7979	0.00	0.00	100.00
6	4	4750	5641	0.00	0.00	100.00
7	6	3350	3989	0.00	0.00	100.00
8	8	2360	2812	0.00	0.00	100.00
9	10	1700	2003	0.00	0.00	100.00
10	14	1180	1416	32.85	3.65	96.35
11	20	850	1001	64.53	7.17	92.83
12	28	600	714	67.59	7.51	92.49
13	35	425	505	122.76	13.64	86.36
14	48	300	357	183.24	20.36	79.64
15	65	212	252	158.49	17.61	82.39
16	100	150	179	90.54	10.06	89.94
17	150	100	126	45.00	5.00	95.00
18	200	75	89	45.00	5.00	95.00
19	270	53	63	45.00	5.00	95.00
20	400	38	45	9.00	1.00	99.00
21	400	0	19	36.00	4.00	96.00

Make-up Ball Size, mm: **40.0** inches: **1.57**

Selection Function Parameters:

alpha0	alpha1	alpha2	dcrit
0.006726	0.073	2.08	6746
0.010405	<<< 0.01	5000 >>>	5620
0.650	<<< 0.65	0.78 >>>	0.780

*** Defaults ***

Expanded Form:

alpha02	alpha12
0.001494087	1.067632738
0	1

Suggested Default Values

Breakage Function Parameters:

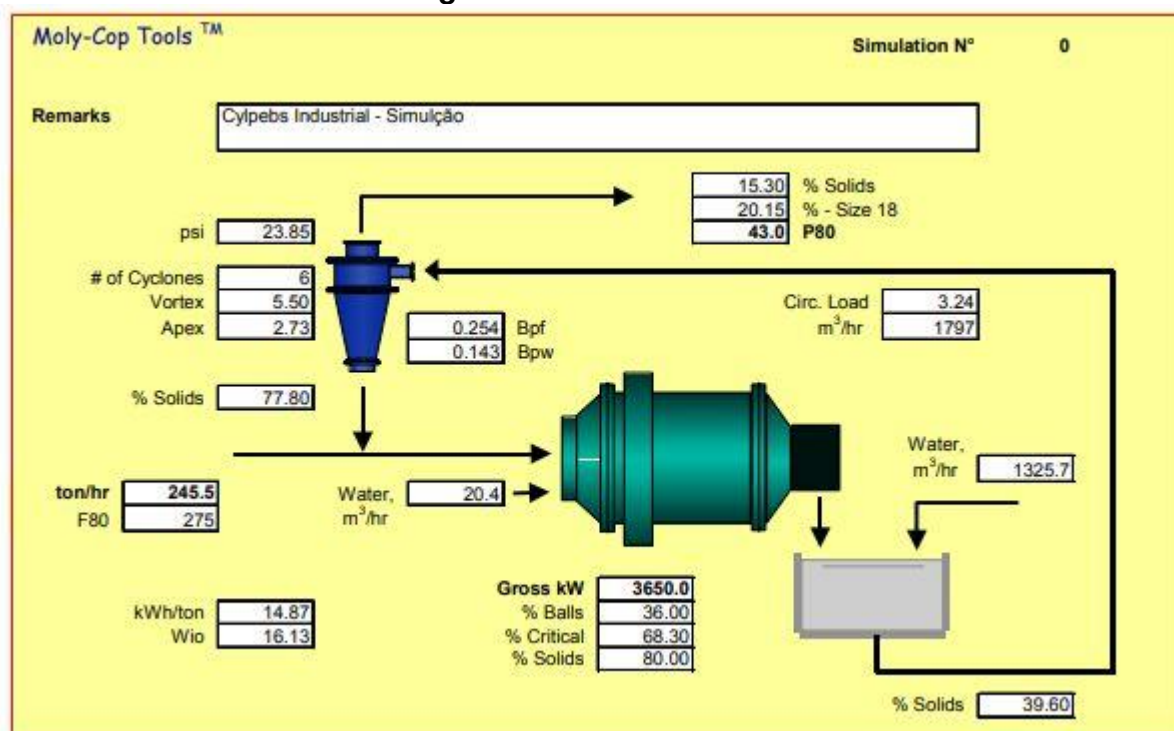
beta0	beta1	beta2
-0.35160796	0.575101006	5.186009852

Expanded Form:

beta01
-3.317
0

Suggested Default Value

Fonte: MOLY-COP TOOLS (2018).

Figura 22 - Planilha *Flow Sheet*

Fonte: MOLY-COP TOOLS (2018).

2.12.5 Tempo de permanência da carga no moinho circuito aberto

Os cientistas que estudam o tempo de passagem da carga de alimentação no moinho, normalmente denominam e conceitua esse tempo como Distribuição do Tempo de Residência (DTR). Por mais que se estudem esse tempo, mais incertezas aparecem. Dessa forma, os estudos ainda padecem de uma conclusão, apesar de várias equações serem apresentadas como pesquisadas. Portanto, a moagem ideal, considerando o DTR propriamente dito, é um processo aleatório sujeito as leis da probabilidade.

Por outro lado, a otimização e o rendimento da moagem são mais assertivos quando se controla a densidade interna da moagem. Ainda, quanto ao tempo de permanência, (DTR), este depende do diâmetro, comprimento, velocidade crítica, carga alimentada, granulometria classificada, retorno do ciclone, granulometria da polpa desejada, taxa de redução ou desgaste dos corpos moedores etc.

Assim sendo, nos circuitos industriais de moagem, o DTR, está longe de ter conseguido valores positivos, próximos do ideal ao longo de uma moagem, apesar de fórmulas empíricas estudadas, em ambiente de laboratório, onde às vezes não

aproximam como o esperado do ambiente na prática do processo industrial de campo que é de difícil controle, tendo em vista as variáveis envolvidas no processo.

Desta forma, uma moagem e a consequente amostragem ideal torna-se quase que impossível numa moagem industrial, mesmo tomando-se todos os cuidados recomendados nas literaturas. Portanto, a importância econômica nos circuitos de cominuição representa para as mineradoras um fator histórico, que ainda é alvo de atenção de engenheiros, técnicos e cientistas no mundo todo (Rosa, 2012).

Como exemplo, de um determinado estudo, o tempo de permanência ou de passagem do material, minério bruto, a partir da entrada até a sua saída em forma de polpa foi empiricamente analisada pela equação de Rosa.

$T = H/F$, onde;

T = tempo de permanência, (minuto)

H = *Hold up*, (tonelada)

F = taxa de alimentação do moinho, (kg/m³)

Hold up representa a quantidade de sólidos em massa.

$$H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot J \cdot V \cdot V_v \cdot \rho_s \quad (\text{kg}) \quad (16)$$

Onde:

D = diâmetro interno do moinho, (m)

L = comprimento interno do moinho (m)

J = percentagem de enchimento, (%)

V = percentagem de sólidos em volume, (%)

V_v = porosidade, (%)

ρ_s = peso específico dos sólidos

Devido às várias equações empíricas e a expressiva dificuldade dos valores assertivos dos respectivos componentes, se buscaram valores na prática de campo, para um possível tempo de permanência da carga interna de um moinho de bolas, operando na moagem em circuito aberto. O tempo observado, às vezes, calculado e sugerido por profissionais da área minerária, trabalhando no moinho foi de entre +/- 5,0 a 6,0 minutos para uma cominuição e moagem completa (Rosa, 2012).

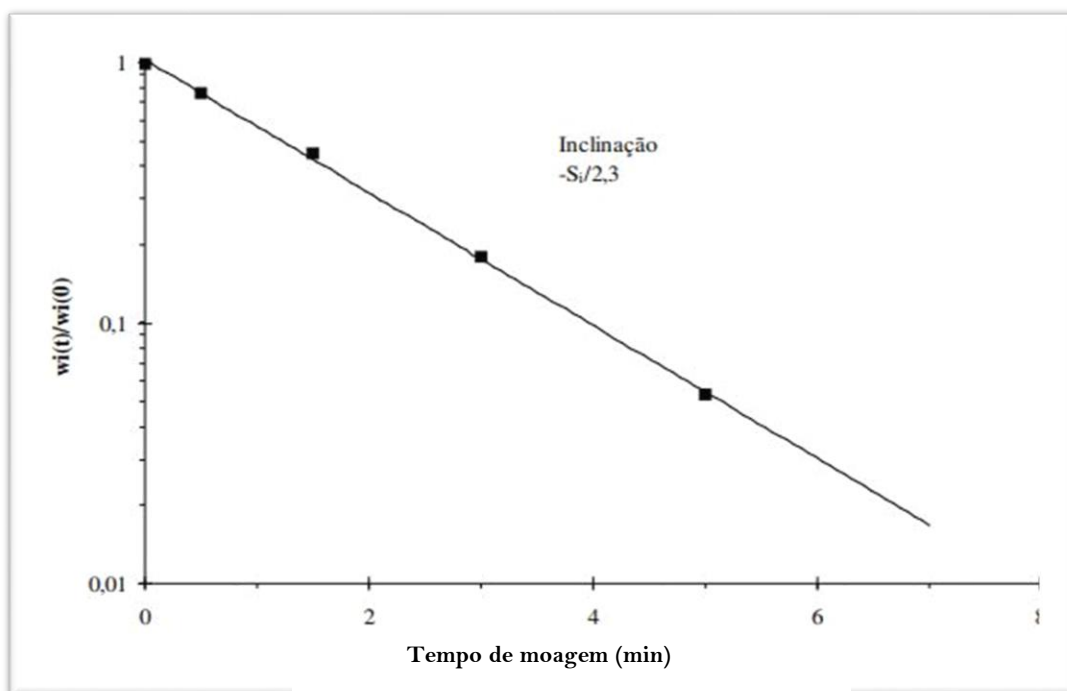
2.12.6 Exemplo real do DTR de um determinado moinho na prática

Exemplo, obtido numa pesquisa de campo, o real dos parâmetros mecânicos e físicos de um moinho operando na prática de campo, com minério de ferro pobre, dados esses obtidos de informação dos engenheiros, de uma grande mineradora, aqui de Minas, responsável pela operação do moinho de bolas de grande porte, numa operação oficial de moagem real e verdadeira. Seguem os dados abaixo, coletados no campo pelos engenheiros de processos entrevistados:

- a) Dimensões do moinho: 8 metros e comprimento por 5,5 metros diâmetro;
- b) Alimentação: 1550 toneladas de minério/por hora;
- c) Alimentação de água: 480 toneladas por hora;
- d) Densidade interna, medida na grelha, $\rho = \pm 3,9$ (kg/m³)
- e) Tempo de permanência da carga na moagem: 5 a 7,0 minutos.

Na figura 22, tem-se o gráfico de moagem, (DTR), sugerido por Silva (2014), representando numa escala logarítmica da função de moagem no tempo, a partir de uma certa granulometria inicial na alimentação do moinho.

Figura 23 - Tempo de moagem da carga de minério de circuito aberto



Fonte: Silva (2014).

2.12.7 Corpos moedores ou esferas de aço

De um modo geral, os corpos moedores podem ser bolas, barras ou cones. Tratando-se especificamente dos moinhos para minério de ferro, os corpos moedores são determinantes ou exclusivos, bolas de aço, as quais têm grande influência na variação do resultado desejado no processo de cominuição, em que fatores internos como forças específicas são geradas pelo impacto e atrito, aos quais, as bolas são submetidas. Normalmente as bolas são fabricadas por ligas metálicas de aço, ferro fundido, liga de tungstênio, aço cromo etc., no tamanho médio de 2 a 3 polegadas.

As bolas são repostas no moinho com periodicidade variando segundo critérios de desgaste medido pelo expurgo delas, através da grelha ou pela indicação do padrão de potência consumida pelo moinho em *kilowatts*. Sabe-se que o desgaste demasiado das bolas, afeta a granulometria desejada da polpa de saída. Quando as bolas se tornam gastas e pequenas, não executam com eficácia o trabalho de moagem, novas bolas devem ser repostas. Existem vários fatores relevantes que causam os desgastes das bolas, como: abrasividade do material, fricção intersticial entre os corpos moedores, fadiga devido a impactos repetitivos e principalmente a densidade do meio, a qual deve ser controlada. A determinação do tamanho das bolas representa um problema teórico e prático até certo ponto, o qual é um problema sério de otimização para a engenharia do processo, conforme descrito por Mazzinghy (2009), logo abaixo, pois existem dois fatores principais que se opõem. São eles:

- a) À medida que os tamanhos das bolas aumentam a pressão entre elas ou entre suas superfícies de contato aumentam a quebra, tornando possível a moagem apenas de partículas maiores;
- b) No caso oposto, tamanho das bolas menores, a superfície disponível entre elas diminui possibilitando a moagem de pequenas partículas, resultando assim no aumento na capacidade da moagem, porém diminuindo a cominuição impactante.

2.12.8 Dimensionamentos das bolas (carga moedora)

Segundo Bergerman (2013), o maior diâmetro da bola para uma determinada carga inicial é dada pela seguinte equação:

$$B = \sqrt{\frac{F}{K} \cdot \sqrt[3]{\frac{Sg \cdot Wi}{fCs \cdot \sqrt{D}}}} \quad B = \text{diâmetro da bola em polegada} \quad (17)$$

onde;

F = tamanho da alimentação 80% passante em μ

Sg = peso específico do material a moer

Wi = work index (kWh/st)

fcs = percentagem da velocidade crítica (em decimal)

D = diâmetro interno ao revestimento em pés

K= Fator relativo as bolas.

Tabela 2- Fator K

Tipo de moinho e de circuito			Valor K para bolas de aço ou ferro fundido
Descarga	Moagem (Via)	Circuito	
Overflow	Úmida	Aberto	350
Overflow	Úmida	Fechado	350
Diafragma	Úmida	Aberto	330
Diafragma	Úmida	Fechado	330
Diafragma	Seca	Aberto	335
Diafragma	Seca	Fechado	335

Fonte: Mazzinghy, (2009).

Tabela 3 – Distribuição da carga de bolas para início de operação

Diâmetro da bola calculado	Distribuição do tamanho das bolas para carga de equilíbrio à partida (% do peso total)							
	pol.	115mm	100mm	90mm	75mm	65mm	50mm	40mm
115	4,5	23,0						
100	4,0	31,0	23,0					
90	3,5	18,0	34,0	24,0				
75	3,0	15,0	21,0	38,0	31,0			
65	2,5	7,0	12,0	20,5	39,0	34,0		
50	2,0	3,8	6,5	11,5	19,0	43,0	40,0	
40	1,5	1,7	2,5	4,5	8,0	17,0	45,0	51,0
25	1,0	0,5	1,0	1,5	3,0	6,0	15,0	49,0

Fonte: Mazzinghy (2009).

Na Tabela 3, podemos ter como informação para bolas de 50mm (2 polegadas) por 115mm serão utilizados no moinho 3,8 bolas. Já uma bola com 50mm por 50mm serão necessárias 40 bolas conforme tabela na página anterior. Ou seja, quanto menor o tamanho das bolas mais bolas serão utilizadas.

2.12.9 Modelos de cominuição

Vários pesquisadores desenvolveram modelos empíricos de cominuição, como Brown, em 1941, o qual parece ter sido o primeiro a descrever o processo de moagem, com corpos moedores, onde seu trabalho de formulações era por demais pesado e complexo para ser aplicado na prática. Já Epstein, em 1947, estudou, desenvolveu e usou uma nova formulação de probabilidade contínua. Em 1956, Broadbent e Callcott usaram álgebra matricial e conceitos de quebra estagiada para descrever o processo. De maneira independente Sedlatschek e Bass (1953) desenvolveram e forneceram um conceito básico. Posteriormente, em 1962, Gardner e Austin, verificaram e estenderam os conceitos, concluindo e demonstrando convenientemente a aplicabilidade dos conceitos para os dados experimentais do processo de hoje (Mazzeinghy, 2009).

Alguns estudiosos ressaltam o fato que o processo de desgaste das bolas, no processo mecânico da moagem não é apenas mecânico, como se acreditava, pois, uma nova variável pode estar presente, além da abrasão e corrosão do processo eletroquímico da polpa na moagem, pode apresentar características de espécies iônicas capazes de acarretar a corrosão do metal. A ação conjunta de abrasão e corrosão tem efeito sinérgico de modo a variar com a velocidade do processo. Já a componente iônica, dependente do tipo de polpa, e, pode apresentar PH diferente, concorrendo, assim, para a corrosão iônica das bolas.

Um minério, classificado por peneiramento, terá por hipótese um tamanho bem homogêneo, único. Entretanto na moagem, em moinho de bolas, a carga passará a ter como resultado, um produto fragmentado e distribuído em todas as faixas granulométricas, onde partículas menores, produzidas por ações de quebra anterior se misturam entre si, aos corpos moedores e, ao restante do material a ser ainda moído por quebra e por atrito intersticial até sua liberação na saída da grelha. O estudo, de equacionamento e de desenvolvimento dos corpos moedores são complexos e de multifunções, onde cada cientista estudioso do assunto desenvolveu

empiricamente, fórmulas criando uma função de estudo, cujo objetivo teve como meta a otimização dos corpos moedores para diferentes tipos de carga.

O processo de fabricação de corpos moedores (bolas), abrange variados aspectos de fabricação, desde a fabricação de barras forjadas a quente, até ao tratamento térmico, chegando até as bolas. Outro processo é a fundição direta das bolas em formas especiais. A principal vantagem dos corpos moedores forjados versus aqueles fundidos são que os corpos moedores forjados usam barras de aço no perfil arredondado onde a qualidade é uniforme ao longo do processo de produção.

Durante o processo da fabricação, temperatura, velocidade, têmpera e outros parâmetros, os quais são bem mais monitorados e controlados, garantem uma melhor qualidade das bolas, bem mais apurada e estáveis, possivelmente sem bolhas interna onde a densidade das bolas em produção é superior a $7,8 \text{ g/cm}^3$. Isto proporciona uma melhor eficiência na durabilidade e na moagem. Já os corpos moedores fundidos utilizam o processo de fundição em moldes de areia convencional onde é difícil evitar vazios internos ou buracos de gás e ou inclusões de areia, comprometendo a durabilidade e eficiência.

Comparando com as bolas de aço laminadas a quente, com a densidade das bolas fundidas que, quando bem trabalhadas só podem chegar a $7,45 \text{ g/cm}^3$, resultando numa menor durabilidade e eficiência na moagem. Assim sendo, o seu preço na hora da compra pelas mineradoras é bem inferior. Fato esse que deve ser bem analisado e, estatisticamente observado no custo-benefício na aquisição.

2.12.10 Hidrociclone: classificação, modelagem e projeto

Um hidrociclone tem como formato um cone invertido na parte inferior e cilíndrico na parte superior, (ver figura). O equipamento em si, considerando a mecânica dos fluidos aplicada é um transformador de energia de pressão e de alimentação tangencial por um duto na parte superior, em energia de velocidade tangencial, onde acontece a sedimentação e queda das partículas maiores e mais pesadas através do vortex inferior (*underflow*), e as respectivas partículas mais leves, naturalmente menores, são direcionadas para fora do ciclone. Dentro desse contexto, a avaliação e caracterização da otimização dos hidrociclones são feitas com o auxílio da curva de partição da polpa (composta de água e sólidos), dentro do equipamento, CAVALCANTE (2019).

Melo (2010), com a modelagem, através de modelos empíricos ou semiempíricos é possível ter uma previsão nos resultados da classificação interna no equipamento. Os modelos empíricos sempre são baseados em dados experimentais do processo operacional de campo.

Dentre os vários modelos empíricos disponíveis, um dos mais é o modelo de Plitt. Já os semiempíricos baseiam-se em equações que descrevem alguns princípios básicos do processo. Todavia, demandando ainda, ajustes empíricos e práticos. Suas equações serão apresentadas resumidamente nesse postulado, até porque, o trabalho central desse estudo é a mensuração da densidade da polpa dentro do sistema de moagem, (moinho de bolas).

Variáveis:

- a) Alimentação do ciclone, A (L/min);
- b) Diâmetro da separação corrigida, $d_{50c}(\mu m)$;
- c) Razão volumétrica, S;
- d) Inclinação da curva de partição, (m);
- e) Diâmetro do ciclone, D_c (cm);
- f) Diâmetro do Vortex, D_o (cm);
- g) Diâmetro do Apex, D_u (cm);
- h) Diâmetro de entrada, D_i (cm);
- i) Altura livre do Vortex, h (cm);
- j) Pressão no ciclone expresso em relação a alimentação, H (m);
- k) Pressão no ciclone, P (k);
- l) Fração volumétrica de sólidos na alimentação, $\Phi\%$;
- m) densidade do líquido, ρ ($\frac{g}{cm^3}$) ;
- n) densidade do sólido, ρ_s ($\frac{g}{cm^3}$).

Previsão dos termos, d_{50c} , S, P, e M, do cientista Plitt, as seguintes relações foram propostas:

$$d_{50c} = \frac{50,5 \cdot D_c^{0,46} \cdot D_i^{0,6} \cdot D_o^{1,21} \cdot e^{(0,06 \Phi)}}{D_u^{0,71} \cdot h^{0,37} \cdot A^{0,45} \cdot (\rho_s - \rho)^{0,5}} \quad (\mu m) \quad (18)$$

$$S = \frac{(1,9 (D_u/D_o)^{3,31} \cdot h^{0,54} \cdot (D_u^2 - D_o^2)^{0,36} \cdot e^{0,054\Phi})}{H^{0,24} \cdot D_c^{1,11}} \quad (\text{volume, m}^3) \quad (19)$$

$$P = \frac{1,88 \cdot A^{1,78} \cdot e^{(0,005\Phi)}}{D_c^{0,37} \cdot D_i^{0,94} \cdot h^{0,28} \cdot (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}} \quad (\text{Pascal}) \quad (20)$$

$$M = 1,99 \cdot e^{(-1,58Rv)} \cdot \left(\frac{D_c^2 \cdot h}{A}\right)^{0,15} \quad (\text{densidade } \rho, \text{ kg/m}^3) \quad (21)$$

O modelo de Plitt apresenta múltiplas aplicações na análise e diagnóstico de um hidrociclone no processo de modelagem e otimização, com as respectivas variáveis acima, utilizadas no dimensionamento de hidrociclones. Todavia, os resultados dos experimentos teóricos e empíricos serão na prática do processo de campo, sempre reajustados na busca do melhor rendimento do hidrociclone.

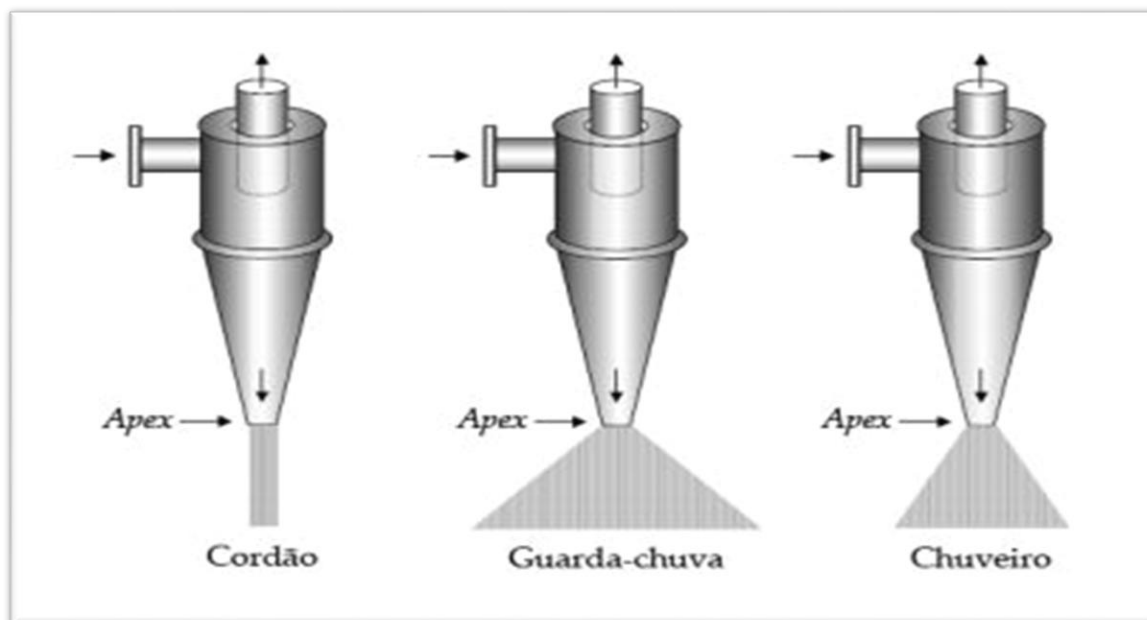
Na operação prática dos hidrociclones em campo, inúmeras variáveis podem influenciar sua operação no corte desejado, mesmo aquelas variáveis que podem ser controladas. Assim, alguns parâmetros podem implicar em mudanças no projeto, o que é, às vezes, mais fácil de modificação em projetos piloto. Na geometria de um hidrociclone, alguns parâmetros são importantes, descritos a seguir os diâmetros dos hidrociclones:

- Área do *inlet*;
- Comprimento da seção cilíndrica;
- Ângulo do cone invertido;
- Diâmetro do *vortex finder*;
- Diâmetro do Apex.

Em suma, o operador ou técnico do processo de campo, percebe uma operação eficiente do hidrociclone quando o *underflow* descarrega o rejeitado na forma de um cone com ângulo pequeno ou tipo chuveiro (figura 29), que é a posição adequada e perfeita de uma classificação. Por outro lado, é de suma importância o valor e o controle da pressão da polpa de entrada tangencial no ciclone tendo como atributo principal seu rigoroso controle da pressão de entrada, sempre operando em

automático (ver figura 23).

Figura 24 - Esquemático das Formas de Descargas do *Underflow*



Fonte: SAMPAIO, OLIVEIRA SILVA (2007).

Tabela 4 - Descarga *Underflow* Função da Razão entre Saídas

Razão das saídas	Efeito de descarga do Underflow
$D_u / D_o < 0,45$	Descarga de cordão
$0,45 < D_u / D_o < 0,5$	Guarda-chuva ou cordão dependendo da pressão
$0,56 < D_u / D_o < 0,90$	Guarda-chuva

Fonte: SAMPAIO, OLIVEIRA SILVA (2007).

Conforme figura 24, onde descreve a razão das saídas, são elas:

D_u = Descarga *underflow*

D_o = Descarga *overflow*

3 METODOLOGIA

Neste tópico será apresentado uma descrição detalhada envolvendo a parte física mecânica do moinho, como tema geral naquilo que poderá ser feito e, como fazê-lo dentro dos pré-requisitos deste trabalho segundo os itens A, B. Ainda, como tema central deste estudo tem-se as experiências de Laboratório, simulando o modelo, realizando as operações de medição e controle como se o modelo estivesse instalado no campo, junto ao moinho, itens A, B.

- A) Projeto e medição da densidade na prática;
- B) Controle e *Feed Back* da densidade.

Na sequência, após o resumo da mecânica dos itens acima, A, e B, dentro de certos modelos, serão apresentados os vários experimentos de simulação operacional da medição e controle da densidade, em Laboratório. Onde se formaliza a operação do algoritmo representado nas figuras 11 e 12. Desta maneira, a modelagem matemática na sua formalização prática do algoritmo de cálculo, chega à densidade de uma moagem em operação, de seu controle *online*, na otimização, estabilidade e rendimento contínuo da respectiva moagem.

3.1 Metodologias nas Etapas do Trabalho

No cenário do processo físico mecânico da modelagem, 03 itens fundamentais no fluxo do processo de cominuição e moagem;

- 01- Moinho
- 02- Corpos moedores
- 03- Separação ciclônica, (Hidrociclone)

A seguir, a definição destes termos:

1 - Moinho, sua modelagem e cálculo matemático virtual tendo como base uma determinada produção ou carga para cominuição e moagem, em tonelada/hora.

Na pesquisa sobre o método empírico desenvolvido por Bond (1971), propõe caracterizar a resistência à moagem do minério de ferro do assim denominado índice

de Moabilidade ou *Work Index* (WI).

O WI é uma característica do minério indicando o trabalho ou gasto em kWh necessário para reduzir uma tonelada de minério a partir de um dado tamanho que inicia grande, até um tamanho de 80% passante em 100 μm . Este índice foi determinado, experimentalmente, por Bond (1971). Já em 1983, Bond desenvolveu fatores de eficiência, as quais foram complementadas por Rowland Jr., na mesma data, corrigindo a potência gasta pelos moinhos, com validação dos valores WI, também em Laboratório onde diferiram das condições pré-estabelecidas por Bond.

Bond (1971), que uma limitação de ordem prática importante sob o ponto de vista da modelagem matemática é a impossibilidade de se quantificar diretamente a distribuição granulométrica do minério dentro do moinho. Daí as duas equações básicas do PMM (perfect mixing model).

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^{i-1} r_j S_j a_{ij} - r_i S_i (1 - a_{ii}) = 0 \quad (12)$$

$$p_i = d_i S_i,$$

As duas equações, 12 e 13, foram associadas de forma a possibilitar a sua aplicação na modelagem de moinhos de bolas, chegando à equação geral,

$$f_i - p_i (1 - \frac{r_i}{d_i} (1 - a_{ii})) + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \left(\frac{r_j}{d_j} \right) p_j = 0 \quad (13)$$

Onde,

f_i = vazão de minério na alimentação do moinho (t/h)

p_i = Vazão de sólidos saída do moinho (t/h)

r_i = Função taxa de quebra

d_i = Taxa de descarga do moinho

a_{ii} , a_{ij} = Função distribuição da quebra correspondente à faixa granulométrica de fragmentação inicial e final.

O quociente r/d é o principal parâmetro do modelo, representando o tempo de residência médio das partículas no interior do moinho (GOMES *et al*, 2014). Detalhes

físicos, com figuras dos internos//externos de um moinho serão apresentados em capítulo mais à frente.

2 - Corpos moedores (bolas de aço), projeto que envolvem, tamanho, peso das bolas e quantidade ideal para o moinho dimensionado, seguindo equacionamento pela fórmula de BOND (1971).

$$B = \sqrt{\frac{F}{K}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Sg \cdot WI}{fcs \cdot \sqrt{D}}} \quad B = \text{diâmetro das bolas de aço} \quad (14)$$

F = tamanho da alimentação 80% passante em μ

Sg = peso específico do material a moer

Wi = work index (kWh/st)

fcs = percentagem da velocidade crítica (em decimal)

D = diâmetro interno do revestimento em pés

K= Fator relativo as bolas.

3 - Hidrociclone, equipamento amplamente utilizado nas mineradoras após a moagem para realizar a classificação mineral granulométrica da polpa, separando partículas finas desejadas ou classificadas, das partículas rejeitadas, tamanho ainda grosso, para a finalidade e exigências do processo posterior, qual seja, a floculação.

É na floculação que se separa propriamente a lama das partículas, compreende o barro contendo a sílica, argila assim como outros compostos não ferrosos indesejáveis. É na floculação que a lama será flotada e separada.

Silva e Carneiro (2013), o princípio de funcionamento do ciclone se fundamenta na sedimentação centrífuga, onde a polpa adquire um movimento de rotação por meio da aceleração centrífuga, na entrada tangencial no ciclone, motivado pela pressão do fluxo controlado na entrada. A pressão e seu rígido controle automático são importantes no corte exato das partículas finas requeridas e as grossas rejeitadas.

3.1.1 Metodologia computacional

A metodologia e simulação computacional com as ferramentas do Computer Aided Engineering (CAE) demonstraram ganhos ao trazer, além dos benefícios econômicos para a empresa, melhores resultados pela aproximação dos dados

obtidos na teoria, com aqueles que na prática, são os desejáveis e experimentalmente testados. Além de outros resultados ambientais, sociais e principalmente ganhos no tempo de ajustes e testes na prática do desenvolvimento, fabricação e melhoria do modelo.

Resumidamente numa metodologia de simulação, o balanço de massa é um dos elementos significativos no estudo computacional. Segundo Silva (2014), isso consiste em nada mais nada menos que a aplicação da lei de Lavoisier; todas as massas que entram numa operação de tratamento ou na moagem do minério têm que sair. Não há geração, nem consumo de massa no tratamento ou na moagem.

Portanto, a avaliação da massa é feita na etapa de classificação pelo balanço da água e na partição de massa em cada fração granulométrica dos fluxos do ciclone, a entrada *overflow* e a saída *underflow*.

Com os dados primordiais obtidos, inicia-se o ajuste dos dados para uma melhor moagem. Todavia, com a utilização da simulação computacional, abrevia-se o tempo gasto no ajuste dos dados para a melhoria do processo sendo, contudo, um recurso eficaz na análise do desempenho e otimização das operações do circuito de moagem e a classificação hidrociclonada.

Desta forma, a modelagem computacional por meios do Método dos Elementos Finitos (MEF), interage de maneira eficiente no planejamento de ações de contribuição de curto prazo no aumento de produção desejada. Além disso, a análise do circuito modelado permite a identificação de gargalos e, de operações ineficientes, visando uma melhor ação de otimização do circuito interno da moagem.

3.1.2 PLC utilizado no experimento na medição da densidade

A montagem do experimento tem como base de cálculo e controle, um PID interno de um PLC de fabricação ALTUS, modelo série DUO 351. No PLC foram providas as variáveis de entradas vindo do campo e uma saída controlada pelo PID, de volta para o campo, acionando a válvula (elemento final de controle).

3.1.3 Metodologia na medição da densidade

A metodologia e modelagem inicial do experimento para a medição e respectivo controle da densidade interna do moinho de bolas, inicialmente será consumado pela montagem e simulação em laboratório, onde as variáveis do processo inseridas no moinho, como um todo, serão simuladas, com geradores de sinais produzidos pelos testes gerando sinais de 4,0 a 20,0 mA, representando os sinais equivalentes àqueles que partindo do moinho em campo, chegam ao *Rack* do painel de controle.

Com a modelagem com os respectivos cálculos executados, pelo PLC, o sinal resultante, agora, representando a densidade calculada e internamente endereçada, via programação para a ação de controle do PID interno que o envia para a válvula de controle de água, conforme figuras 11, 12.

Posterior a confirmação do modelo da medição e controle em laboratório, parte-se para a condição real de operação na prática de campo, onde o modelo de fato receberá por meio de seu PLC, os sinais propriamente dos instrumentos instalados no moinho em operação, considerando esta última operação de comprovação real do modelo na prática de campo, ainda, considerando a possibilidade que o moinho em operação não tenha um dos sinais necessários para a modelo, como por exemplo, a água medida para a diluição homogeneizada da polpa no tanque, ou possivelmente alguma outra variável. Tal medição, deverá ser providenciada no contexto da operação.

A interligação do PLC na experiência prática do modelo via sistema de medição e controle do moinho propriamente, deverá ser por corrente 4,0 a 20,0 mA por circuito *loop*, de série campo//painel, ou se, na condição de sinais digitais transmitidos, caso exista, a interligação será em paralelo.

Todavia, antes de qualquer tomada de decisão, uma análise criteriosa do fluxograma dos sinais de medições e controle campo/painel e painel/campo devem ser levantadas, reconhecidas e analisadas para a perfeita conexão do PLC em questão. Outra possível condição, poderá ser analisada, qual seja, a introdução do algoritmo de cálculo e controle, no próprio PLC corporativo da própria empresa acolhedora que controla o moinho local via CCO.

3.1.4 Metodologia e modelagem dos instrumentos de medição

Os instrumentos de medição das variáveis ou insumos estão instalados no campo, especificamente entorno ou próximo ao moinho de bolas. As figuras 11, 12, apontam os seguintes instrumentos que interagem medindo e transmitindo sinais para o cálculo da densidade e seu respectivo controle;

- a) Medidor de vazão de polpa diluída (m^3/h)- M1;
- b) Medidor de água para o tanque (m^3/h) - M4;
- c) Medidor de água para o moinho (m^3/h)- M3;
- d) Medidor de densidade da polpa diluída (T/m^3)- M2;
- e) Medidor da carga de minério bruto p/moinho (T/h)- M5.

Cada instrumento tem sua tecnologia própria de medição segundo seu fabricante. Já os medidores de vazão da linha de tecnologia magnética são de tecnologia e princípio universal, lei de *Faraday*, medindo e transmitindo em metros cúbico por hora, por exemplo INCONTROL (2018).

Os instrumentos, geral, têm sua tecnologia e desenvolvimento próprio e específico. Portanto, cada fabricante apresenta o seu produto fundamentado numa tecnologia criativa, talvez a mais atualizada possível, pertencente a cada fabricante, onde a calibração, feita em Laboratório próprio é individual, confrontada e amparada por padrões secundários da empresa, que são obviamente rastreados pelos padrões primários, de sua responsabilidade, guardado e preservado via Laboratório próprio, ou por padrões de terceiro, por exemplo, padrões super primário do INMETRO.

3.1.5 Metodologia dos experimentos da medição em laboratório

A metodologia do experimento em laboratório está fundamentada e executada conforme os seguintes instrumentos, item 3.1.4, montada especificamente para a realização dos testes de performance do sistema modelo na medição da densidade interna do moinho e o seu respectivo controle.

Na montagem, após alimentar o modelo com sinais eletrônicos equivalentes, em especial, tendo como princípio e amparo, valor correspondente a um caso real, levantado no campo, onde valores para o moinho citado nesse trabalho é verdadeiro,

conforme item 5.6, onde se apresenta um moinho real de uma grande empresa, alimentado com minério bruto na razão de 1550 t/h, água 480 t/h ou m³/h, densidade interna medida na grelha, $\rho = 3,9$, DTR = 5,5 minutos.

Com os valores introduzidos no experimento, após estabilizar o sistema modelo, o conjunto de medição visto pela tela de um *Laptop*, ou mostrado pelo *display* IHM do PLC, provoca-se um distúrbio dos testes. Por exemplo: alterando o valor da densidade, ou mesmo provocando um distúrbio no processo, pelo *display* IHM do PLC. Imediatamente o controlador PID reagirá aumentando ou diminuindo proporcionalmente a saída que irá para a válvula de controle de água, monitorada no experimento pelo multímetro, lendo a saída de corrente de 4 a 20 mA.

Várias outras condições de teste podem ser executadas provocando distúrbio no sistema de moagem. Por exemplo: alterando o *set point* do valor desejado do sistema, tela do IHM, observando em seguida a indicação do distúrbio e a reação do controlador frente ao distúrbio provocado. Dessa forma, se atesta e ou corrige-se os parâmetros de controle do modelo.

É oportuno esclarecer que os parâmetros ajustados e sintonizados em laboratório não serão os mesmos utilizados e aplicados na prática de campo. No campo, provavelmente novos parâmetros de controle poderão ser ajustados, baseado no tempo de resposta do respectivo processo de moagem ou em ajustes experimentais práticos, com refinamentos consecutivos baseados na experiência do técnico ou engenheiro instrumentista de controle da planta, operando o respectivo processo de moagem de cada moinho.

3.1.6 Metodologia na realização do experimento de campo direto na mineração

Realizar a montagem do experimento em campo para comprovação e performance do modelo em estudo é o esperado e desejado, oportunamente como mencionado nesse trabalho. A realização prática dos experimentos em campo vai depender do acolhimento, após a empresa de mineração em aceitar e acreditar na potencialidade do controle efetivo da densidade no contexto de uma moagem profícua, com rendimento expressivo da moagem, mais lucrativa pelo menor índice de material rejeitado e ainda com menor custo energético por T/hora.

Quanto a ligação do modelo junto ao moinho, este pode ser interligado sem

qualquer interferência na operação do moinho, pois a interligação é em série com os sinais vindo do campo//painel. A conexão é feita abrindo o circuito de sinal de 4,0 a 20,0 mA vindo do campo, passando pelo PLC, voltando para o mesmo ponto da conexão de onde saiu. Essa postura de ligação é feita com todas as variáveis de campo, uma de cada vez, sem a paralisação do moinho em curso.

Os novos testes apresentados, além de gerar a simulação dos sinais de campo, executará a medição e o controle, registrando eletronicamente o valor da densidade em operação. Uma segunda variável registrada será o sinal de abertura da válvula de controle, a qual, pode ser diretamente correlacionada, numa abertura percentual com o volume de água de alimentação do moinho, conforme figura 11 e 12.

3.1.7 Metodologia na modelagem do sistema de controle

O projeto e a modelagem do sistema de controle é o próprio PID do PLC, que começa na programação inicial com a configuração e declaração das variáveis de entradas com os respectivos endereços (ver figuras 16,17 e demais). Posterior a essa configuração e declaração das variáveis, sendo as mesmas direcionadas via programação para o respectivo bloco do algoritmo interno programável. Saindo do algoritmo ou blocos de programação e cálculo, a variável, agora equivalente a densidade da moagem, no PID, programado para executar uma comparação de valores entre a variável de processo e o *set-point* desejado. Daí, se programa o PID via IHM ou pelo computador quando este estiver interligado com o PLC. Então, o controle é realizado via saída do sinal, denominado variável controlada que é um sinal universal de 4 a 20 mA direcionado e conectado diretamente na válvula de controle.

3.1.8 Obtenção e análise dos resultados

Os resultados observados *in loco* deste experimento, foram animadores. Com a densidade calculada, o controlador PID respondendo perfeitamente em ambas as direções do controle, caracterizado pela variação manual da densidade ou do *set-point*, representando forte distúrbio do processo.

Todavia, o bloco de informações a ser levantado e, analisado como resultados operacionais de um moinho em operação de cominuição e moagem, instalado no campo, ainda estão por ser conseguidos após a instalação do equipamento, (o PLC),

em moinho de bolas, no campo operacional de uma indústria minerária de moagem e concentração do minério de ferro, onde o minério relativamente pobre na origem, tornando-se rico em Fe_2O_3 após a concentração.

Cumprе salientar que na operação de simulação de laboratório, os resultados obtidos, além de serem animadores estão muito próximos de um ensaio no moinho na prática de campo. Os resultados estão apresentados e postados adiante nesse trabalho.

3.1.9 Comparações entre densidade na saída do moinho com a densidade medida pelo modelo

A razão do cálculo da densidade *online*, dentro da moagem do moinho está baseada numa impossibilidade de sua medição direta, *online*, na saída do moinho. A comparação dos resultados da densidade calculada e controlada, com a densidade verdadeira na saída do moinho, como já foi dito anteriormente, seria por comparação entre a densidade indicada e registrada, pelo modelo, com as amostras de fato retiradas na grelha do moinho, pelo laboratório da empresa ou pelo operador do turno de trabalho no processo.

Os resultados indicados no IHM com o respectivo registro e, aquele retirado pelo operador do moinho, comparativamente atestarão a confiabilidade e o sucesso ou não do projeto.

Todavia, o PLC nesse momento, é a ferramenta mais econômica, rápida e diretamente confiável no aspecto de desempenho da função, aquisição e o controle propriamente dito, pois seu entendimento operacional, estudo e aplicabilidade já é de conhecimento dos programadores, engenheiros de processo, técnicos e operadores. É um equipamento já consagrado, muito seguro na sua utilização e aplicabilidade. Portanto ele é o equipamento utilizado nos processos de aquisições, cálculo e controle do moinho nesse trabalho.

Descrição do PLC utilizado: PLC de fabricação, ALTUS modelo DU351.

- a) Possui 04 entradas para as variáveis que entrarão e serão monitoradas e interagidas no cálculo de densidade e controle pelo PLC, monitorada pelo IHM, as quais poderão ser tanto analógicas como digitais;
- b) Que o PLC tenha 01 controlador digital, PID, programável recebendo o sinal da

- densidade, comparando-a com o *set point* desejado e ajustável via IHM;
- c) Que tenha pelo menos uma saída digital/analógica controlada para ativar e modular a válvula de controle de água do processo.
 - d) Que tenha possibilidade de mostrar em seu *display* digital (IHM), todos os dados do processo, quais sejam, as medições de entrada, saída, cálculos etc.
 - e) Programação geral das entradas analógicas ou digital, processamento e programação do PID e a respectiva saída do sinal controlado no formato de 4,0 a 20,0 mA.
 - f) Possibilidade de instalação do equipamento PLC no CCO ou na área de operação do moinho (chão de fábrica).
 - g) Partida no PLC, ajustando seus parâmetros e, reajustando especialmente os parâmetros do controlador PID, quando necessário.

3.2 Modelagens matemática do PLC

A modelagem matemática do PLC, segue um roteiro programado de mesclagem lógica das variáveis que vem do moinho, instalado no processo de moagem. A partir do momento que as variáveis do processo chegam ao PLC, são direcionadas ou endereçadas para seus respectivos blocos digitais de cálculo, onde os resultando, são um sinal equivalente a densidade medida. O sinal resultante é então enviado para o endereço do PID que executa o controle. Nesta modelagem, encontram-se os processos matemáticos, algoritmizados mostrados nas figuras 11 e 12. O processo computacional de programação mostrados nas figuras 16,17,18 e 19; exibidas como exemplo de uma modelagem e uma programação computadorizada em linguagem “C”.

3.3 Metodologia e modelagem computacional

Em laboratório ou bancada para o teste do desempenho do equipamento, modelo (PLC), recebendo sinais como fosse de campo, especialmente sinais gerados no modo simulado em valores pelos testes, os cálculos pertinentes e, a partir do valor calculado, qual seja, densidade interna do moinho, o PID controla e ajusta a adição da água no sentido de procurar manter sempre o valor desejado da densidade interna da moagem, dentro de um valor desejado e otimizado.

Inicialmente realiza-se o teste de simulação com as 04 variáveis produzidas e geradas como saída, pelos testes, os quais entram no endereço correto programado, sendo ainda mostrados no IHM do PLC em valor padronizado de 4,0 a 20,0 mA, com a respectiva unidade de engenharia indicado pelo IHM. Os testes são os responsáveis por gerar os sinais das variáveis, como se eles fossem exatamente as variáveis vindas do campo, conforme as figuras 15 e 16.

A linguagem central do PLC é em *Ladder*, com programação das rotinas a serem executadas em linguagem “C”. Na figura 25 tem-se uma pequena e sucinta amostra ou resumo das linhas de programação das tarefas executáveis em linguagem C, seria muito estafante mostrar todas as linhas da programação.

Após definição do valor desejado da densidade para o moinho, *Set Point*, e os demais parâmetros do PID, valores que são vistos e ajustáveis via tela do IHM, assim como o tipo de ação de controle, direta ou Inversa, parte-se para a operação *ON* do sistema modelo, observando a saída da variável controlada, saída do PID direcionada para a válvula controladora de água. Esta saída está sendo registrada pelo registrador eletrônico instalado no sistema de teste laboratorial, figura 31.

No PLC em questão experimental do modelo, para o controle, em uso nesse experimento de laboratório, apenas o controle proporcional mais o controle integral foram usados. O controle derivativo ficou no modo desativado para início dos trabalhos. Na prática se verificará a sua real necessidade, ou não. Numa condição normal de operação, quando a variável do processo tem um grande tempo de resposta, o controle derivativo deve ser usado, que é o K_p , que significa ganho ativo “G” ou faixa proporcional FP, podendo ser ajustado de 0 a 1000 como ganhos, pelo IHM ou pelo computador quando interligado em comunicação com o PLC. O tempo do controlador derivativo, que varia de ∞ a 0,1 como FP (Faixa Proporcional), igual a zero ou ganho infinito (∞). Isto é, um sistema de operação liga/desliga. A seguir, um exemplo:

$$FP = 1/G \times 100\%. \quad (15)$$

Onde: $G = 0$ a 1000 ou

$FP = \infty$ a 0

$K_p = G$ ou FP

K_i = Segundos por repetição, podendo ser ajustado de 0 a 1000 segundos por repetição, tanto pelo IHM quanto pelo computador.

K_d = Desativado internamente, durante a programação, portanto não aparece na tela

do IHM, assim como na tela do computador.

3.4 Metodologia experimental

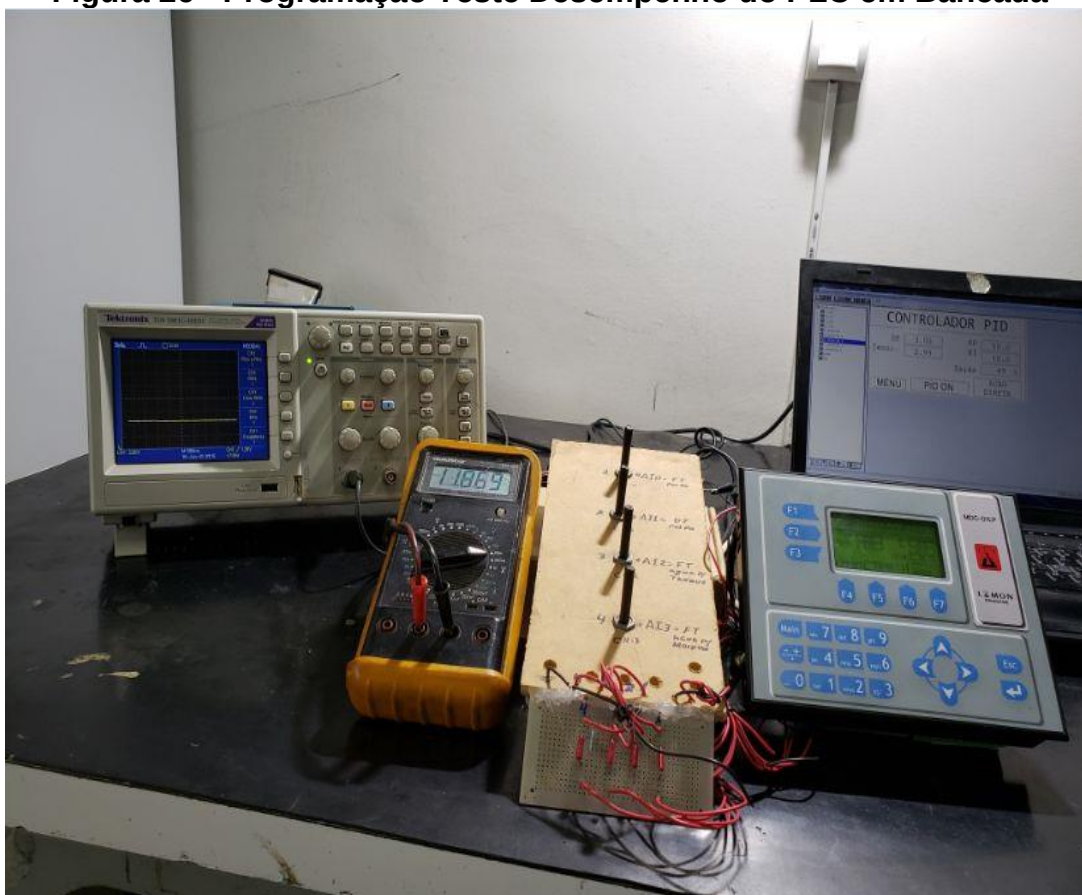
O projeto foi montado e executado a partir de testes, gerando e simulando sinais vindos do campo como se eles fossem ou viessem dos transmissores instalados nos arredores do moinho transmitindo sinais de cada medição que entram no PLC nos seus respectivos endereços (ver figuras 25 e 26).

Figura 25 - Programação Teste Desempenho do PLC em Bancada



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 26 - Programação Teste Desempenho do PLC em Bancada



Fonte: elaborado pelo autor

Nas figuras 25 e 26, tem-se a apresentação da primeira gama de teste experimental proporcionando variações de 4 a 20 mA, independentemente de cada variável que entra no PLC, originando assim, o teste de performance do modelo. A saída controlada pelo PID, aquela que segue para o elemento final de controle (válvula de água), está sendo monitorada pelo miliamperímetro lendo a corrente de saída, (4 a 20 mA). Acontecendo qualquer descontrole na densidade, por exemplo, aumento no retorno de minério rejeitado, pelo ciclone, acompanhado de muita água, entrando no moinho, também variação na umidade do minério bruto por ocasião de muita chuva, a densidade logo varia. Então, o controle corta proporcionalmente a água fechando parcialmente a válvula de controle.

Por outro lado, se a massa circulante aumentar por razões várias, em consequência, o rendimento do moinho cai e a densidade pode aumentar. Ocorrência logo percebida pelo operador do processo que toma medida de operação auxiliar fazendo com que o processo volte a sua normalidade, cortando manualmente um

pouco da alimentação do minério para o moinho, já que, na estratégia utilizada, a alimentação do moinho (carga de minério bruto), não está operando interligado no automático, senão como um controle autônomo local, fato que é possível de ser implementado pela automação integrada.

3.5 Análises dos resultados medição/controle

Como o sistema ou processo de simulação está na condição de um *loop* aberto, não existe no experimento a possibilidade de ver ou fazer a densidade do moinho voltar automaticamente ao valor desejado, se não manualmente, operando e atuando na gama de teste na função, CH1- densidade da polpa, por exemplo.

Parâmetros configurados no bloco PID do PLC:

KP = 50 = amplificação ou ganho G, ou ainda FP = 2,00

KI = 5 segundos por repetição

D = desativado

Ação de controle = modo direto

No experimento, a densidade normal como SP para o moinho é uma densidade igual a 3,0, por exemplo; numa faixa que pode variar de 1,0 a 5,0. O sistema em operação foi equilibrado manualmente. Os parâmetros do bloco PID do PLC foram sintonizados em: Kp, ganho em 50 e Ki, integral em 5 segundos. A saída no miliamperímetro está mostrando, aproximadamente, 12 mA constante, significando uma abertura de 50% da válvula de controle.

No osciloscópio, o sinal constante está mostrando e registrando uma linha contínua. Ao causar um distúrbio no processo, diminuindo ou aumentando manualmente a densidade interna dentro do moinho para um novo valor, densidade igual a 2,50. Por exemplo, a saída de sinal do controlador, mostrada pelo miliamperímetro varia bruscamente de, aproximadamente, 12,00 para 13,50 mA e, posterior inicia a integração subindo vagarosamente a corrente, que vai abrindo a válvula de água para o moinho, até atingir a saturação, pois o *loop* nesse experimento está aberto, conforme gráfico visto na tela do osciloscópio.

Com os resultados observados nos blocos de cálculo da densidade interna do

moinho e agora com a performance dos cálculos executados pelo bloco de cálculo da densidade e pela ação do PID do PLC, conclui-se que o sistema desenvolvido nesta pesquisa, está apto a operar diretamente em moinho de bolas nas indústrias de mineração propriamente dita. Onde a concentração final do minério pobre em Fe_2O_3 é necessária e requerida para seu enriquecimento e posterior manuseio.

Modo ação direta significa que, se a densidade calculada e medida internamente no moinho, aumenta o sistema de controle, reage com um sinal de saída, abrindo a válvula de controle, liberando mais água para baixar a densidade.

Modo ação inversa significa operação do sistema de controle de maneira contrária, incompatível no caso de operação do moinho de bolas, na configuração proposta. Em outras palavras, com a densidade aumentada, fecha-se proporcional e progressivamente a válvula de água. Ou seja, torna-se uma operação incompatível.

Nos experimentos realizados em laboratório, mostrou-se os sinais das variáveis virtuais do processo de campo, agora simulados ou gerados pelos testes, onde os sinais gerados de 4,00 a 20,00 mA, entra no PLC, e este executa os cálculos pertinentes a cada bloco do algoritmo, disponibilizando na saída, uma variável controlada conforme ilustrado pelo amperímetro e ou pela tela do osciloscópio.

3.5.1 Análise e comentários do conjunto dos experimentos visualizados

Nas figuras 27, 28, têm-se um conjunto completo, montado e instalado para executar a simulação operacional de um moinho de bolas. As variáveis de campo vindas das medições individuais, agora geradas e simuladas pelos testes, entram no PLC (este representando o moinho de bolas em operação), sendo visualizadas no display IHM ou pela tela do computador quando conectado ao PLC, através de sua rede de comunicação USB.

A saída da variável controlada pelo PLC, nessa montagem é vista analogicamente, pelo miliamperímetro, valor em mA e pelo osciloscópio, em termos de *volts* ou ainda pela tela do IHM do próprio PLC. O sistema montado como um todo está em equilíbrio, com uma indicação de 11,869 mA. Desta forma, como uma linha continua na tela do osciloscópio cujo valor é de 2,967 *volts*.

Na hipótese da ação imediata do controle proporcional, FP ou G, por não ser o suficiente para trazer a variável do processo (da densidade), ao ponto desejado, (set

point), a ação integral irá aumentando a abertura da válvula de adição de água até que a densidade novamente se equilibre igualando-se ao valor desejado.

No gráfico da figura nota-se um pequeno retardo no tempo para que a densidade comece a reagir descendo de encontro ao *set point*. A ação integral entra, no sentido de evitar o controle com desvio (*off set*). Com a variável do processo e o *set point* estando juntos em seu novo valor, assim estando equilibrados, a ação de controle automático do PID se estabiliza, com o proporcional e integral, em seu novo valor de momento, agora estabilizados e fixo. Ou seja, sem variação até que apareçam novas variações ou distúrbios no processo de moagem.

Valores sintonizados em atuação no processo de simulação, operando com os seguintes ajustes de controle:

- ✓ Set Point desejado, setado em densidade = 3,00
- ✓ Ação de controle proporcional, ganho $G = 50,0$ ou $FP = 2,00$
- ✓ Ajuste integral, $KI = 5,00$ segundos por repetição
- ✓ Ação de controle = modo direto
- ✓ Sistema de controle, PID = ON.

No estabelecimento de um controle estabilizado ou em equilíbrio, a densidade do moinho permanece estável, controlada ou fixa em determinado valor. A saída controlada pelo PID enviando sinal para a válvula de controle de água para o moinho fica também estabilizada em, aproximadamente, 13,5 mA, (60% de abertura da válvula de controle), lida pelo amperímetro, ainda podendo ser lido pela tela do IHM e ou pelo osciloscópio. Causando um novo distúrbio no processo ao variar de maneira brusca a alimentação do moinho, imediatamente a ação proporcional, atua de maneira proporcional e rápida na abertura ou fechamento da válvula de água. Posterior a ação integral age aumentando ou diminuindo vagarosamente a abertura da válvula de controle a 5 segundos por cada repetição, obrigando a densidade recuar novamente para densidade setada.

Observa-se que o *loop* aqui simulado é um *loop* aberto, portanto a queda da densidade voltando ao patamar de equilíbrio, por exemplo, densidade 3,00 foi uma ação manual simulada, agindo como se fosse um processo normal de malha ou *loop* fechado. No osciloscópio, o traçado na cor azul em queda, representa a densidade regredindo para o valor igual a 3,00. Na cor amarela, representa a ação proporcional

inicial e, posterior a ação integral agindo continuamente aumentando a saída controlada pelo PID do PLC.

A partir de uma nova centralização organizada, com geração dos sinais equivalentes às variáveis de campo, fornecendo sinais de 4,0 a 20,0 mA partindo da nova gama de testes, projetada, organizada e estruturada com as respectivas variáveis nomeadas pelos botões, para variação dos sinais, na respectiva sequência das variáveis, na ordem:

- ✓ Minério Bruto, (t/h);
- ✓ Água Tanque, (m³/h);
- ✓ densidade Polpa Tanque, (t/m³);
- ✓ FT Polpa saída do Tanque, (m³/h).

Como sistema único montado, PLC e a gama de testes, tem-se ainda, externamente no conjunto, pontos de saída de sinal analógico para conexões rápidas por meio de terminais específicos com saída de mV/mA, para instalação de miliamperímetro, assim como terminais de saída, também independente para osciloscópio.

Já o PLC nessa nova estrutura, ao rolar suas páginas de configuração e leituras apresentará as respectivas imagens de configuração, edição, cálculo e saída de sinal controlado, que tanto pode ser visto e analisado no IHM, assim como externamente via miliamperímetro ou osciloscópio devidamente plugado nas respectivas saídas identificada no novo conjunto único. Isto facilita, assim, a operação de simulação do projeto, pela gama de testes, PLC e assessórios externos para visualização. Por outro lado, a tela do IHM pode ser vista na integração conjuntamente pela tela do osciloscópio quando plugado se necessário.

3.5.2 Configuração, entradas, monitor e PID

Segue abaixo, uma descrição da configuração utilizada na gama de testes:

- F4 - A tecla F4 apresenta para configuração as variáveis de entrada com seus respectivos valores de medição inicial e final de faixa ou Faixa de medição, sequenciando;
- CH-0 - FT da Polpa de saída do moinho, entrando no tanque de

equalização, faixa de 0,00 a 2000,00 (t/h);

- CH-1 - Densidade, (controle independente no local), dentro do tanque de homogeneização, faixa: 1,00 – 5,00;
- CH-2 - FT água para diluição da polpa no tanque de homogeneização, faixa: 0,00 – 500,00 (m³/h);
- CH-3 - FT do minério bruto transportado e pesado pela correia transportadora, faixa: 0,00 – 2000,00 (t/h). Os valores acima programados são reais originadas de um moinho na prática de campo.

Ainda, para leitura externa, existe nessa nova montagem única, saídas para indicação e registro da saída controlada pelo PID e, saída do valor da densidade calculada e medida pelo PLC mostrada através da conexão mV/mA na parte superior do modelo apresentado na figura 25, 26 e 31.

A operação do sistema, com atribuição e alterações de valores de entrada, quando numa simulação do processo é realizada por meio dos botões com as respectivas funções definidas, variando a corrente (mA) de entrada no PLC. Pode-se, portanto, simular as variáveis de campo que entram no moinho. Além disso, com cálculo automático nos respectivos blocos digitais, calculam-se a variável densidade dentro do moinho.

Para acessar os valores de corrente de entrada, o menu de entrada, tecla F5, permite visualizar os valores de momento de cada uma das variáveis em mA e seus respectivos valores percentuais correspondente aos seus valores de engenharia e, ao mesmo tempo, variá-la se necessário através dos botões CH-0 a CH-3. Todos os valores que se visualiza pelo IHM, obviamente podem ser vistos pela tela do computador quando devidamente conectado ao PLC. Por exemplo: variável CH-0 do menu F4.

3.5.3 Menu Monitor

Selecionando mais uma vez a tecla F7, o IHM mostrará a tela seguinte, figura 27, com o rendimento do moinho em termos percentuais, a massa circulante em t/h e, a quantidade em t/h de minério bruto, transportado pela correia transportadora que entra no moinho de bolas.

Figura 27 - Densidade do Moinho e as Variáveis de Entradas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 27, tem-se em apresentação no display do IHM, assim como, na tela do computador quando em comunicação com o PLC, a tela mostrando o valor da massa circulante, aquela calculada como retorno do ciclone (*underflow*) o rendimento operacional do moinho e o valor do minério bruto (vide display do PLC).

Os valores apresentados nessa operação de simulação são valores calculados pelo algoritmo. Já o valor do minério bruto é um valor que chega ao PLC, a partir do

sinal eletrônicos vindos dos testes, simulando a balança. Os sinais das variáveis, alimentados numa condição de processo, têm fundamentos e valores verdadeiros na prática de uma moagem real, porém o circuito de controle no processamento do sinal está em *loop* aberto, o que impossibilita observar a variável do processo, ou seja, a densidade sendo corrigida automaticamente.

3.5.4 Menu PID

Selecionando a tecla F6, a tela do IHM do PLC, demonstrada na figura 28, com valores e componentes do PID que poderão ser editados, como por exemplo, valor do *set point* (SP), valor da densidade do moinho a ser controlado, valor da faixa proporcional KP, valor da integral KI, e ainda indica a respectiva saída do sinal da ação de controle, esta saída é automática. Ainda no IHM pode-se ver se o PID está na condição *ON* ou *OFF* e sua respectiva ação de controle se ação direta (*ON*) ou inversa (*OFF*).

Ação direta significa que estando a densidade indicada maior que o valor do SP, a saída de sinal controlado aumentará, abrindo a válvula do controle da água para o moinho, e, proporcionalmente, diminuindo a densidade interna.

Figura 28 – Valores de Edição: Parâmetros do PID

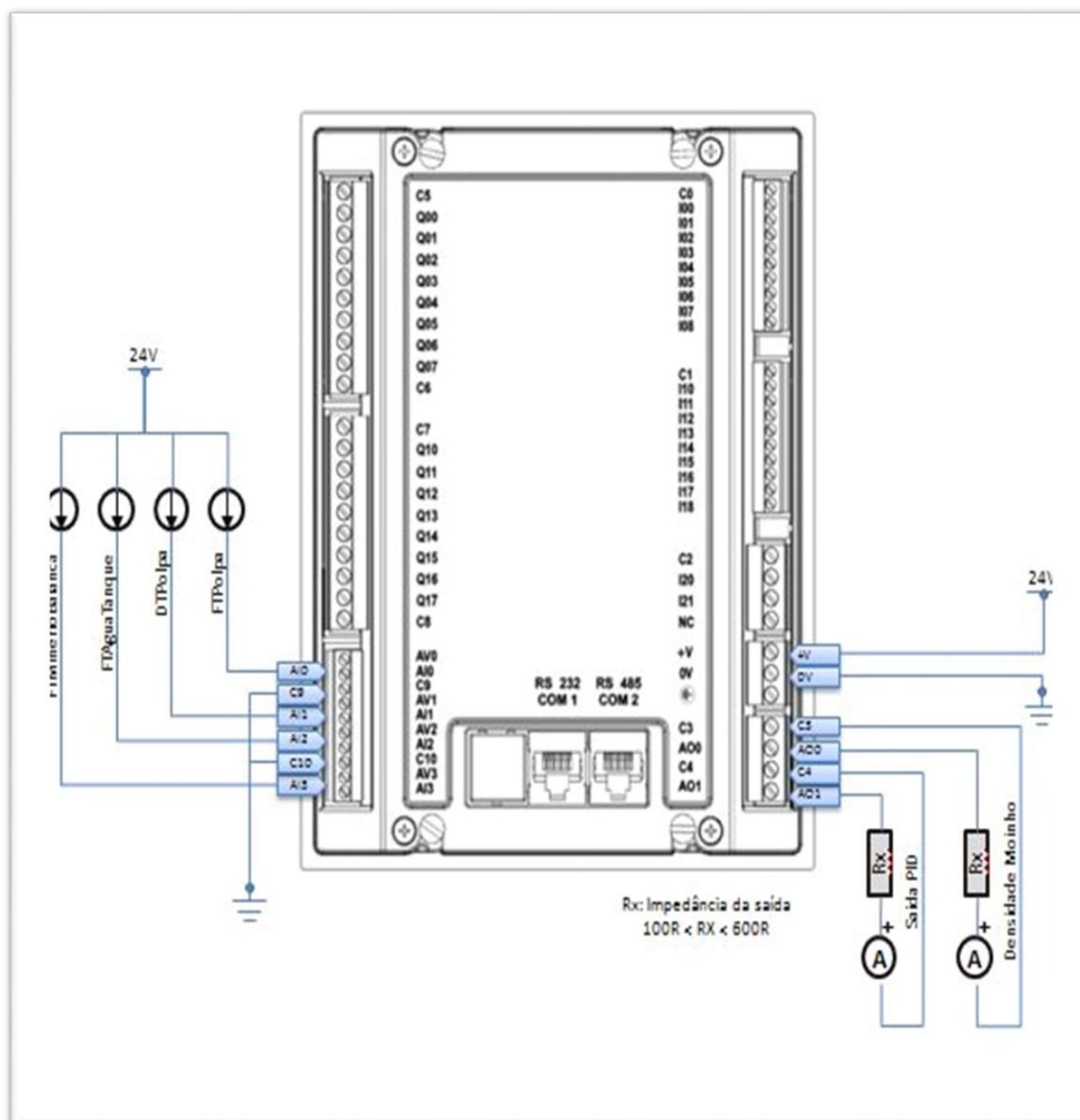


Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.5 Fluxograma orientativo do PLC

Nessa figura 28, mostra-se a configuração declarada dos endereços de entrada das 04 variáveis do processo, com identificação dos respectivos endereços codificados para entrada do sinal das variáveis e as saídas do PID e da densidade calculada do moinho, além da alimentação do PLC.

Figura 29 - Esquema de Ligação das Entradas e Saídas do PLC



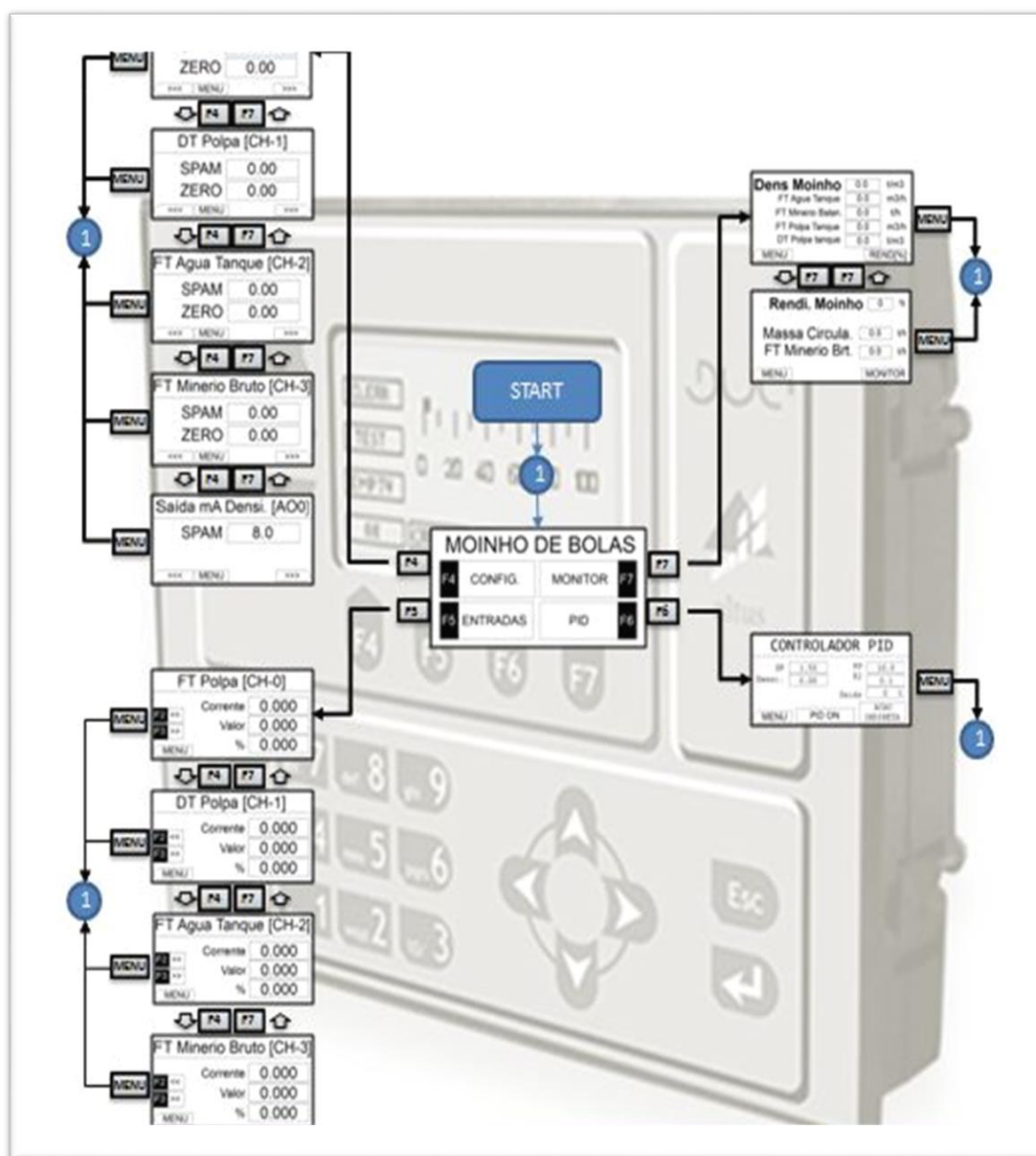
Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem da figura 30, na página seguinte, contém o diagrama de telas do *software* do IHM incorporada ao PLC, assim como as teclas de navegação para acesso às mesmas. O programa foi desenvolvido de forma que o usuário possa configurar os principais parâmetros do processo, que são:

- Range dos sensores
- Constantes de ajuste do controle PID
- Range das saídas analógicas do sistema

Além das telas de configuração, há telas nas quais todos os parâmetros do processo são disponibilizados para acompanhamento em tempo real.

Figura 30 - Esquema Funcional e Blocos de Programação do PLC



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.6 Resumo Demonstrativo funcional das teclas programadas no PLC

No *display* IHM, na configuração geral, no moinho de bolas, estarão ativados nas seguintes teclas;

- F4 = Configuração;
- F5 = Entradas;
- F6 = PID;
- F7 = Monitor.

Cada uma das teclas, F4, F5, F6, F7, ao ser acionadas abrirá 04 possibilidades para valores de programação das variáveis do processo para as entradas no PLC, ou seja;

- FT-POLPA, (CH-O) - Vazão saída da polpa do moinho;
- DT-POLPA, (CH-1) - densidade de saída medida polpa do tanque;
- FT-POLPA, (CH-2) - Vazão água para diluição da polpa no tanque;
- FT-MINERIO BRUTO (CH-3) - Vazão minério transportado p/ moinho.

Com as teclas F4 ou F7 podem-se variar ou editar as entradas para os valores de início e final de escala da variável do processo.

FT-POLPA saindo do Tanque (CH-O):

ZERO = 0,00

SPAN = 2000,00, (m³/h), por exemplo.

Com acionamento tecla F7 busca-se a variável seguinte;

DT-POLPA saindo do Tanque (CH-1):

ZERO = 1,00

SPAN = 5,00, por exemplo.

Sucessivamente, com novo acionamento da tecla F7, busca-se a variável seguinte;

FT- Água para o tanque (CH-2):

ZERO = 0,00

SPAN = 300,00, (m³/h), por exemplo.

FT- Minério bruto (CH-3):

ZERO = 0,00

SPAN = 2000,00, (t/h), por exemplo.

Os valores de Zero e *Spam* quando marcados para uma nova edição são reconfigurados em termos de valores com as teclas numéricas e posteriormente salvos.

Acionando novamente F7, busca-se, a faixa de saída

SAIDA mA – DENSIDADE – (AO-0)

Com a tecla F4, volta-se a função para a variável anterior. Acionando a tecla direcional a esquerda, fixa-se a função ZERO. Com a tecla flecha abaixo de ESC aciona o valor de ZERO a ser editado. Com a tecla a esquerda apaga o valor marcado e edita-se o novo valor com as teclas numéricas. Acionando a tecla direcional abaixo do ESC, salva o novo valor editado. Acionando novamente a tecla direcional a esquerda passa-se para a função seguinte, que é a função *SPAN*.

Com a tecla flecha abaixo do ESC, novamente com a tecla direcional esquerda apaga-se e editam-se os novos valores com as teclas numéricas. Acionando a tecla direcional para cima ou para baixo, retorna o IHM- *display* para a função inicial: moinho de bolas.

A tecla ESC tem a função única de retornar ou sair, salvando a função quando na ação de edição de ZERO ou SPAM.

Com a tecla F5, visualizam-se os valores de corrente de chegada no PLC e o correspondente valor da variável de campo, de (CH-0) a (CH-3), em termos de *SPAN* e seu respectivo valor percentual. Com as teclas F2 e/ou F3 gira simplesmente as variáveis. Acionando a tecla F4 volta-se para a função inicial: moinho de bolas.

Acionando na sequência a tecla F7, o IHM apresentará o valor da densidade do moinho em (t/m³) e os valores *online* das 04 variáveis do processo com as respectivas unidades de engenharia. Ao acionar novamente a tecla F7, o IHM apresentará o rendimento percentual (%), do moinho e a massa circulante em (t/h) e o valor da alimentação do minério bruto, que entra no moinho em (t/h). Acionando novamente F7 retorna-se o IHM ao painel anterior, mostrando as 04 variáveis de processo.

Acionando F4 retorna-se ao *display* moinho de bolas. Acionando a tecla F6, o IHM apresentará os valores do PID em termos de *Set Point* (= SP), Valor da Ação Proporcional, (KP), Valor da Ação Integral, (KI), Valor da densidade Medida *online* e o Valor de Saída da Variável Controlada. Também o estado do PID, se funcionando no Manual, PID *OFF*, ou em automático, PID *ON*. A tecla F5 é a responsável para ativar ou não essa função. Já a tecla F7, ativa ou não, a função direta ou inversa do controlador PID.

Para editar as funções SP, KP e KI, o caminho é o mesmo já relatado em conformidade com as funções anteriores. Tecla direcional para cima ou para baixo retorno para a função inicial, moinho de bolas, da mesma forma se acionado a tecla F4.

Os quatro botões abaixo do PLC dos testes, têm a função de simular em mA, valores das variáveis vindas do campo, entrando no PLC como se fossem as respectivas variáveis de campo realmente medidas e transmitidas pelos seus respectivos transmissores.

Estando o operador diante do IHM, usando as respectivas teclas F1 a F7 e as teclas de giro, navegação, toda a programação pode ser realizada ou rolada, como base de um fluxograma de funções. Quando da edição de um determinado valor numérico da variável de processo, a tecla flecha a esquerda aciona o valor a ser editado, e posteriormente, quando novamente acionado, salva e retorna o IHM ao *display* ou menu anterior, variável de processo.

A partir do capítulo 5 será apresentado, estudado e discutido os resultados preliminares e sugestões, com gráfico de registro do moinho com os respectivos valores reais de uma operação caracterizando uma prática de campo em teste de performance simulado, porém de laboratório.

4 RESULTADOS

Quanto aos resultados práticos no processo de moagem, onde a densidade do moinho é a variável principal a ser medida e transmitida. Somente será posteriormente analisada e/ou avaliada, após a instalação e operação do equipamento modelo PLC, em algum dos moinhos de bolas operando na moagem do minério propriamente dito, onde no contexto de seu desempenho na medição da densidade calculada, indicada, registrada e controlada, em tempo real, poderá ser comparada com as amostragens retiradas e medidas pelo laboratório da empresa, acolhedora desta pesquisa, onde também poderá ser avaliada a qualidade do produto final, índice da produção e o rendimento energético do processo como um todo.

A partir dos dados levantados, medidos e comparados, se definirá o desempenho e a exatidão do novo sistema de medição e controle da densidade apresentada, assim como seu respectivo ganho da produtividade pelo moinho de bolas e conseqüentemente o rendimento energético. Obviamente que a exatidão final do sistema de medição e controle, irão depender das incertezas individuais e combinadas das variáveis de entrada dos insumos e seu controle.

Quanto a metodologia da medição da densidade e de seu controle em laboratório de simulação, cumpre ressaltar que os resultados obtidos, até ao momento, nos ensaios foram, atestando que o comportamento operacional do sistema como um todo respondeu satisfatoriamente bem.

4.1 Alguns Resultados da Medição

Nesse capítulo serão apresentados resultados obtidos numa simulação em laboratório com registros de saída do controlador PID controlando a água em um conseqüente controle da densidade dentro do moinho de bolas e o verdadeiro valor do minério bruto entrando e saindo moído pela grelha do moinho.

Os dois registros apresentados a seguir estão contidos na figura 34 mostrando o moinho em simulação. A simulação ora apresentada retrata uma verdade muito próxima de uma realidade do moinho em operação. Todo esse processo acontece com a naturalidade quase real de uma operação *in loco* do moinho instalado no chão de fábrica, com valores reais de uma alimentação em regime prático.

Figura 31 – PLC com Resultados Indicados e Gravados Registrador Eletrônico



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 31, aparece o PLC montado conjuntamente nos testes, numa operação simulada, com um registrador eletrônico, (*data logger*) de 02 canais: canal 01 registrando a saída do PID como se estivesse conectado à válvula de controle de água, podendo assim ser correlacionado com a alimentação de água, representando, seu fechamento ou abertura, a alimentação do moinho por água. A válvula aqui notificada tem uma capacidade de liberar quando toda aberta (1000 m³/hora). O segundo canal 02, registra a densidade dentro do moinho em operação. Sua faixa de densidade, programada no PLC, está fixada nos valores definidos entre:

- 1,00 a 5,00 unidades de densidade;
- 1,00 Significa água pura.
- 5,00 Significa polpa com o máximo de concentração ou densidade igual a 5,00.

O *set point* para o controle automático da densidade dentro do moinho está programado nesse ensaio de teste para um valor de densidade igual a 4,00.

Os dois miliamperímetros estão em série com as saídas do PLC. Eles estão representando a saída de sinal do PID indo para a válvula de controle no campo e o segundo miliamperímetro indicando o valor da densidade da polpa. Os dois sinais, além da indicação em modo instantâneo, em tempo real, estão também sendo registrados em modo histórico pelo registrador eletrônico no *datalogger* de dois canais instalado no conjunto de teste.

Os 04 sinais gerados são os substitutos dos 04 sinais vindos dos transmissores instalados no campo, medindo e transmitindo para o CCO as variáveis do sistema de moinho. Os sinais de corrente vindos do campo, a dois fios, um par de fios para cada sinal da variável que chega até as borneiras do *Rack*, saem para o computador ou PLC da empresa.

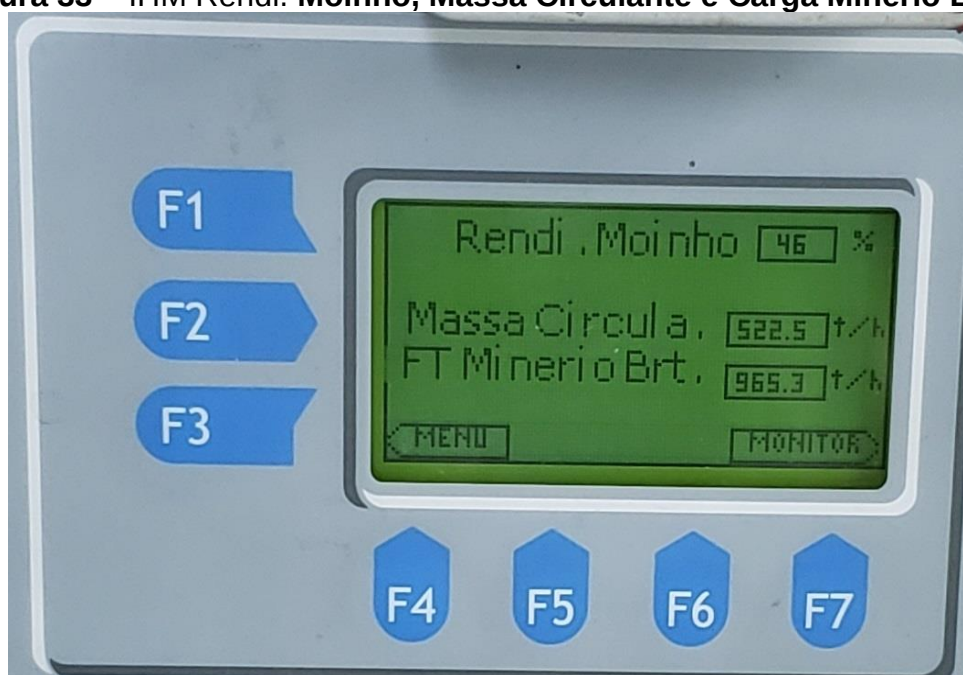
Para ligar o modelo e testá-lo, basta substituir no modo série os sinais que saem dos botões, pelos sinais de que vem do campo, com o mesmo sentido e equivalência em termos de série entrando e saindo do modelo, voltando para o *Rack*, na mesma ordem. Desta forma, o modelo funcionará assim como, o próprio sistema de controle do moinho, sem, contudo, prejudicar sua operação normal. Ou seja, tanto funcionará um sistema quanto o outro em completa independência. O moinho continuará sendo controlado e o modelo, da mesma forma, evidenciará seu controle através dos dois registros como mostrado na figura 34. Assim, com esse tipo de montagem em série, pode-se se dizer que o PLC modelo pode ser instalado com o processo em operação normal controlando o moinho sem, contudo, sofrer interferência em nada na sua operação normal diária *online*, de cominuição, moagem e controle.

Figura 32 – IHM mostrando valores do processo e valor da densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – IHM Rendi. Moinho, Massa Circulante e Carga Minério Bruto



Fonte: Elaborado pelo autor

O rendimento do moinho apresentado na figura 33 acima, é igual a 46% e o resultado da seguinte conta indicada no *display*:

$$\frac{965,3 \text{ T/h} - 522,5 \text{ T/h}}{965,3 \text{ T/h}} \cdot 100\% = 45,87 \%$$

Figura 34 - Registro gráfico água controlada para moinho e densidade interna



Fonte: Elaborado pelo autor

No relatório de valores do gráfico, em registro, durante o período de teste, mostrou a abertura da válvula de água para moinho e a respectiva densidade controlada internamente com o $SP = 4,00$.

Conforme análise do *Out PID*, que mostra a abertura da válvula de água para moinho, que nesse caso tem uma relação direta com a vazão de água em metros cúbico hora.

Valores de abertura da válvula de água:

Mínima = 21%

Máxima = 94%

Média = 56,9%

Valores da densidade controlada dentro do moinho:

Dens. Mínima = 3,83

Dens. Máxima = 4,15

Dens. Média = 4,00

A variável controlada (saída do PID) é a variável diretamente ligada ou conectada na válvula de controle de água para o moinho de bolas (ver figuras 10, 11 e 12). Portanto, o seu valor de saída corresponde ao fechamento ou abertura da válvula de controle com (0% a 100%). Onde, 0% representando fechamento total e 100% representando abertura total. Com abertura mediana, significa vazão de água igual a, aproximadamente, 480 m³/hora ou 480 T/hora.

No gráfico na figura 34, a densidade controlada, com seu respectivo valor indicado na escala do lado direito, indica e mostra as variações e o valor comportamental da densidade dentro da faixa de controle. Do lado esquerdo, está a escala do valor percentual de abertura da válvula de água para o moinho e o conseqüentemente o gráfico da variação de abertura correspondente, modulando a água ao longo do período dos testes com duração de 2:36 minutos.

A polpa, com seu valor da densidade em regime de controle, extravasa pela grelha do moinho. Havendo qualquer variação, por menor que seja a simulação, o que pode acontecer no processo de moagem, como por exemplo, variação de carga do minério bruto, variação do novo tipo de minério em decorrência de nova cava e etc.

Já a variação da umidade na carga do minério por motivo das condições climáticas, variarão com a carga circulante (*underflow* do ciclone). O *drift* da densidade no tanque de equalização da polpa e os outros componentes da moagem no sistema de controle, reagem controlando e variando a quantidade de água de entrada no moinho conforme registrado no gráfico da simulação apresentada.

Dentro de certa normalidade, a densidade de saída da polpa equalizada no tanque de diluição, sempre será mantida constantemente. Pois, o seu controle é realizado por um sistema de controle independente, com instalação no local do controle ou remoto.

Da mesma forma, o controle de pressão da polpa equalizada entrando no ciclone é rigorosamente mantida sobre controle autônomo. O algoritmo de cálculo da densidade do moinho de bolas começa a ser formado ou calculado, partindo das duas medições de saída do tanque de equalização (ver figuras, 11 e 12). Quais sejam:

- Medição da vazão da polpa pelo medidor eletromagnético, ISOIL-LAMON (2018);
- Medição da densidade na saída no tanque pelo radioativo ou pela medição da densidade diretamente dentro do tanque pelo MD-01LP.

Os resultados esperados foram exatamente como os resultados mostrados no gráfico, figura 34, porém com a vazão de água sendo controlada pelo PID que controla a densidade dentro do moinho pela válvula de controle de água. O registro de sua vazão, conforme figuras, 11 e 12, foi medida, transmitida e registrada, assim como a densidade. Os resultados dessa mensuração, na prática de campo, foram analisados, inicialmente, com a conexão do PLC. Em epígrafe, interligado em série com os sinais de corrente 4,00 a 20,00 mA, vindo do campo/rack/painel, sem, contudo, prejudicar a mensuração do moinho, que continuou sua operação normal de controle via CCO. Porém, o que deveria ser conectado à válvula de controle da água do moinho será, dessa maneira, apenas nesse contexto de ensaios e testes do modelo, demonstrou no registrador eletrônico (*data logger*), conforme mostra o gráfico da figura 34, comprovando a total resiliência ou perfeição do sistema ora apresentado como solução inédita no processo de cálculo da densidade e seu respectivo controle na teoria e na prática.

Posteriormente, o sinal controlado, partindo do PID pôde ser diretamente conectado à válvula de água do moinho de fato, com a autorização expressa do gerente das fábricas observadas. Desta forma, os demais registros das outras variáveis, conforme ilustrações nas figuras, 11 e 12 as quais são também, superimportante, para os técnicos operadores do moinho de bolas, que acompanharam a mensuração de todo o processo de moagem no moinho, além de medir entrada do minério bruto, e, a saída da polpa moída dentro da especificação ótima com rendimento máximo da moagem, com o mínimo de rejeito no hidrociclone.

O acesso aos demais sinais eletrônicos, para o respectivo registro das variáveis envolvidas no processo da medição e o controle do moinho de bolas, tais variáveis, resultantes das operações algébricas de cálculo dos blocos de processamento definidos nas figuras 11 e 12, têm como protocolo, a plataforma MODBUS. O acesso deste processo, está diretamente na saída COM 2 do PLC, serial 485, com os respectivos endereços a serem utilizados para as devidas gravações e registros em telas próprias.

O PLC empregado nesse estudo tem duas portas de saída RS232 e RS485. Cumpre ressaltar que para as devidas programações e leituras nas plataformas dos computadores atuais, em serviços, as saídas devem ser convertidas para sinais USB.

Uma vez que, se realizou a instalação, a medição da densidade, o controle e a mensuração na prática de campo com PLC, que operou sobre o moinho de bolas, e,

mediu e controlou, de forma *online* a densidade do minério sendo moído e transformando-se em polpa.

Cumpramos ressaltar com ênfase que a operação do PLC modelo, em paralelo com o controle operacional do moinho pelo CCO, em nada afetou o sistema operacional normal do moinho de bolas.

5 DISCUSSÃO DO RESULTADO

O moinho de bolas, corpos moedores (bolas) e o hidrociclone, foi o principal tema desta pesquisa, a densidade interna do moinho, seu cálculo e seu respectivo controle.

Quanto a sua solução, nenhum outro trabalho enveredou, disseminando e publicando até o presente momento, medição da densidade dentro do moinho de bolas em movimento. Acredita-se que esse tema ou assunto específico, ainda um pouco encoberto na sua divulgação real dos cálculos algébricos, de fato inerentes, por questões de um proeminente trabalho industrial na medição de uma densidade interna dentro do moinho de bolas em movimento, uma solicitação de patente requerida do conjunto PLC com respectivo algoritmo desenvolvido, programado e implantado no equipamento, (PLC), junto ao INPI nacional.

Por outro lado, se acrescentou no preâmbulo deste trabalho, ora em apresentação dos cálculos e das teorias direcionadas ao estudo de moinhos de bolas, hidrociclones e aos corpos moedores (as bolas), cujo desenvolvimento do ponto de vista teórico, técnico e prático é um assunto hoje bem estudado, discutido, desenvolvido e excessivamente disseminado em múltiplas plataformas; através das literaturas técnicas, artigos individuais, periódicos e trabalhos acadêmicos não se encontrou nenhuma novidade até aqui apresentado nesse trabalho como assunto.

Com base nos resultados obtidos, respeitando as condições de contorno nos testes e ensaios experimentais, onde se observou a relevância imposta ao modelo, com aplicações de valores reais de uma alimentação trazida do campo para o modelo do moinho em teste simulado, operando como se estivesse na prática de chão das fábricas, onde se pôde observar e afirmar que: com os resultados obtidos como apresentados nas telas e nos gráficos conclusivos deste estudo, foi relevante e apontando que o modelo do PLC está em condições de ser levado a operar demonstrativamente no campo operacional dos moinhos de bolas onde, disseminou e publicou até o presente momento a medição e o controle da densidade dentro dos moinhos de bolas em movimento de cominuição e moagem.

5.1 Contribuição Científica

Neste estudo, em páginas anteriores, se falou do ineditismo dentro dos moinhos de bolas, onde se buscou e se mediu a densidade interna da polpa sendo moída e o seu controle efetivo *online*. Ainda, nesse mesmo contexto do ineditismo acrescentou-se nesta pesquisa, o cálculo com a respectiva indicação e o registro da massa circulante da polpa, difícil de ser medida no circuito da moagem, bem como, o rendimento percentual do moinho, em operação *online*.

Quanto ao cálculo, algoritmo da medição, e o controle da densidade da polpa dentro do moinho de bolas em operação, ficam aqui, como sugestão para as academias, estudiosos do assunto e, para os setores gerenciais técnicos das empresas, oportunidades para novos estudos no sentido de avançar mais e mais na clareza, no aprimoramento, no desenvolvimento teórico e prático na mensuração e controle da densidade *online* dentro dos moinhos de bolas. Pois, que não surgiram estudos e pesquisas com afincos e obstinação tecnológica baseada na medição e controle da densidade *online* dentro dos moinhos de bolas em movimento. Portanto, como já mencionado, ser hoje, o protagonista dessa nova estrutural tecnologia do cálculo e medição da densidade da polpa interna do moinho de bolas em movimento rotacional.

Na integração utilizando o CAE, permitem-se alcançar resultados com análises robustas, eficientes e ágeis nos resultados iniciais do projeto, cuja definição final e otimização geral do projeto operacional certamente serão uma contribuição na prática ficando, ainda, mais patente a sugestão para novos estudos no sentido de avançar mais e mais na clareza, no aprimoramento, no desenvolvimento no estudo acadêmico teórico e prático na medição e controle da densidade *online* dentro do moinho de bolas em movimento de cominuição e moagem, cujos objetivos, propósito e pressuposto maior é aumentar seu rendimento operacional e, como consequência aumento no rendimento energético do processo de moagem.

Percebe-se que há muito a explorar no oferecimento de oportunidades para novos estudos e projetos tecnológicos que venham dar saltos de aumento na produtividade nos processos de cominuição e moagem, impactando diretamente no custo do produto moído, pois se sabe que o rendimento energético de um moinho é ainda muito baixo. Portanto, as possibilidades de melhorias na produtividade e

competitividades são emergentes, podendo trazer maiores lucratividades para a empresa e seus colaboradores.

Os temas da Tese e do artigo, tubo de Pitot Cole, necessitam de uma relação direta. A Tese está centrada em um problema específico da engenharia de mineração, enquanto ambos possam utilizar conceitos de matemática e engenharia, suas aplicações e objetivos são distintos. Os dois documentos compartilham uma abordagem técnica similar, em termos de medição e controle de processos, eles estão aplicados em contextos industriais diferentes. A Tese é aplicada para a indústria de mineração, focando na otimização do processo de cominuição em moinho de bolas, enquanto o tubo de Pitot Cole, da calibração e medição do fluxo em sistema de distribuição, podendo ocorrer também em a água que entra em o moinho de bolas e na caixa de equalização da densidade da polpa. Como Sugestões final procura-se enfatizar e deixar de forma clara, que todo documento da Tese, ocorre a necessidade do conhecimento aplicado, na solução do artigo Numerical Reslution of Differention Equation using the Finite Difference Method in the Real and Complex Domain. Creio, ser necessário destacar as relações potencial entre a Tese e o artigo, tubo de Pitot Cole. No entanto, acredito que a Tese pode mostrar a aplicação de técnicas avançado de modelagem numérico e, beneficiar com o estudo realizado na área de cominuição de minerais no geral. E de se notar que o tubo de Pitot Cole como foi dito nossa Tese, que tendo uma rangeabilidade de 3,0% a 3,5%, quando sem seu tratamento, podendo passar a ter uma rangeabilidade de 35% a 40% a mais, com a sua curva de rangeabilidade sendo tratadas com a equação: $Q = Sef \times Kd \times Kp \times Ft \times Fg \times Fv \times V \times FcL$.

6 EXPERIENCIA NUMA MINERAÇÃO REAL

O minério da mina em céu aberto, sem detonação, é escavado por grandes máquinas. Figura abaixo número 35, onde se vêem o minério sendo escavado, com as devidas marcas nos aluvião na montanha.

Figura 35 – Montanha de minério real



Fonte: Elaborado pelo autor.

É um minério especial com característica magnética na sua estrutura, Fe_3O_4 , o que não se encontram no minério normal como a hematita compacta Fe_2O_3 .

Os caminhões recolhem o minério escavado, transportando-o para o processamento em ambiente próprio de concentração. Após um peneiramento, o minério fino, chega ao concentrador magnético, com o minério grosso ficando na parte de decima da peneira, seguindo transportado por correia, indo direto para o moinho de bolas, onde sem qualquer controle de densidade interna, é moído, MS INSTRUMENTOS (2018). A água ajustada para o processo da moagem é colocada pelo operador do processo. Segundo a entrada do minério grosso, para o qual acreditamos que, deveria seja feito uma pesagem, porém, sem o devido controle, então o operador da área, coloca a água necessário para a moagem.

Após a saída do minério, já moído, com bastante água, ele também vai para a concentração magnética.

Na figura abaixo, número 36, está o moinho de bolas da mineração. É um moinho pequeno pela visão da figura.

Figura 36 – Planta de uma Fábrica de minério



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a densidade interna do moinho de bolas, figura 36, nada podemos afirmar, pois seu controle é pobre. Para fazer o seu controle, será necessário parar a fábrica ou o moinho de bolas, colocando nele os equipamentos ou aparelhos necessários para fazer o devido controle da moagem, o que seria difícil nesse momento de operação.

Figura 37 – Moinho de bolas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O moinho acima, figura 37, é pequeno no seu tamanho físico, semelhante ao moinho apresentado na figura 36. Dificilmente se terá condições de colocar nele, um processo de controle de densidade interna, conforme figuras 11 e 12 dessa tese. O controle, segundo a figura 12, dessa Tese, teria quatro instrumentos de medição, com 03 instrumentos na entrada do moinho e, fora do moinho, no tanque de equalização, o controle da densidade da polpa, o que nessa condição seria impossível. Nessa hipótese, o controle passa ser manual ou possivelmente por uma pesagem por correia transportadora, onde a água, comutada diretamente em seu interior, poderia ser feito pelo processo automático.

Quando ao resíduo que saem do concentrador magnético, depois de seco, vai para uma correia transportadora, seguindo direto para um descarte próprio, por meio de máquinas carregadeira e caminhões, onde são levadas para uma pilha sendo descartado ou condicionadas a seco, porém, sem o perigo de avalanches.

Quanto a uma verdadeira prática por resultados conclusivos, tentamos fazê-la no moinho da Vale – Ferteco, onde existe 03, moinhos de bolas, conforme figura 38, de grande tamanho, recebendo várias toneladas de minério segundo a foto.

Ainda constam nos processam da moagem do minério, os quais temos conhecimento, que o controle da densidade interna dos moinhos, era feito pelos barulhos das bolas dentro do moinho em movimentos rotacional. Todavia, se sabe na atualidade que os técnico estão tentando colocar o controle dos moinho com a plataforma de, (I A).

Figura 38 – Da Vale Ferteco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todavia, estavam todos parados, pois a pelotização da Empresa estava também parada, por razões desconhecidas até os momentos, o que dificultou nossa possibilidade de um trabalho de pesquisa de nossas experiências conclusivas. Fica aqui, portanto, uma possível possibilidade de uma proposta prática para comprovação, o que de fato, observamos no ensaio de nossas práticas de Laboratório conforme figura 33 dessa Tese, onde o rendimento medido é de 46%, frente a um

rendimento de 8 a 10%, consagrados pelas literaturas atuais de épocas passada, conforme divulgado pela referência bibliográficas.

CONCLUSÃO FINAL

O custo estimado para o sistema, vai depender muito do tipo de moinho de bolas. Se, montado com os 03 primeiros medidores na entrada do moinho, sendo um deles com o cálculo digital, com água vindo do ciclone e, um quarto medidor instalada no tanque de equalização da polpa, o custo vai depender dos instrumentos a ser comprado, geralmente é baixo. Caro, seria o preço da instalação. Como respeito ao PLC com as 04, pode-se citar; R\$ 1.200,00 pelo custo do PLC, mais o custo de um técnico ou engenheiro para a montagem do sistema.

Os equipamentos adquiridos são os seguintes; uma balança para medição do minério, um medidor magnético para água, um digital para água do ciclone e, um medidor radioativo na saída da polpa do tanque de equalização.

Sabe-se que o rendimento de um moinho de bolas é de 8 a 10%. Com o controle da densidade interna, o rendimento passa a ser de 46%, conforme experiência de Laboratório, figura 33 dessa Tese.

A densidade dentro do moinho quanto bem dosada ou controlada, o moinho opera com bom rendimento. Se muito baixa, ou seja, abaixo de um certo valor de referência, o moinho obstrui com a sua carga rodando em conjunto com a velocidade do próprio moinho. Quando muita alta, a água interna amortece o efeito das quedas das bolas sobre o minério, assim como, a moagem intersticial passa a ser fraca, com uma bola sobre a outra e, com o minério no centro.

A melhoria do minério de ferro de baixa concentração, com o sistema proposta é, uma melhoria alcançada, com o minério de ferro que, saindo do moinho, vai direto para o sistema de flotação e, de lá sai com uma pureza de 69%.

O sistema proposto, com o controle da densidade interna no moinho de bolas, pode a partir da trituração do minério, retirar dele todas suas impurezas, dando-lhe, um rendimento de produção, em sua concentração posterior.

Claro que pode, desde que o sistema, por menor que seja, esteja preparado para receber os instrumentos necessário para tal fim.

Evidentemente que gera impacto na energia consumida. Estando o sistema sem o devido controle da densidade, a energia é bem maior, na ordem de 8 a 10%.

Claro que pode, pois, a Inteligência Artificial é um tipo de programa de computador que vai dominar o mundo nos próximos anos.

Claro que diminuem, todos, como a água e demais insumos. É muito difícil de saber, pois cada moinho tem seu devido tamanho. Quando ao sistema de controle empregado, pode-se dizer concomitantemente que a energia absorvida para o controle é a menor possível, pois, como todos os instrumentos empregados são digitais o consumo de energia é bem menor.

No passado, nunca teve na prática, uma maneira segura para controlar a densidade dentro do moinho. Essa prática apenas começou com a Lamon Produtos e a Foxboro, no moinho da Companhia CBMM de Araxá.

A densidade ótima da polpa dentro do moinho de bolas é, de $\pm 4,0$. Com essa densidade controlada, a perda e a corozão dentro da parede interna do moinho seria bem menor.

As vantagens, um controle com estabilidade dentro do moinho, proporcionando uma polpa saído com o máximo de grãos dentro da granulometria estabelecida pelo projeto. A desvantagem nesse caso, seria o mínimo possível, com um rendimento em torno de 46%, conforme demonstrado na figura 33 dessa Tese.

A ganho está em sair, com uma perda de energia no rendimento do moinho, de 8 a 10%, para um rendimento de 46% no sistema proposto. Dá para se notar que, nesse caso, o ganho em energia é muito grande.

As variáveis de entrada no sistema proposta são: 03 variáveis no moinho de bolas e, 01 variáveis no tanque de equalização. Na saída do moinho, a variável é a densidade da polpa. No controle temos; o controle do peso do minério, o controle da água e, digitalmente o controle da água com polpa vindo do ciclone. No tanque de equalização temos o controle da densidade dentro do tanque por meio da adição de água.

Claro que pode influenciar no sistema proposto. O tempo da medição para um controle, por exemplo o PID, é muito importante na prática do controle. Todavia existem outros meios onde os técnicos combatem o diferencial temporal por meio do sistema de controle cascata, o feedforward, a logica Fuzzi com o PID etc.

Com o moinho de bolas sendo controlado digitalmente, a polpa sai do moinho com uma densidade em torno de 4,0%, portanto, constante e homogênea.

Até ao presente momento, dentro da mineração como o moinho de bolas, o sistema não foi testado na prática, somente em laboratório.

Atualmente a Inteligência Artificial é outro meio natural de controle, que está sendo estudado como o controle digital, por diversos entes do mundo modernos.

O sistema proposto digitalmente, tem um erro máxima de 1,65%, sem considerar o fator de abrangência que é de 2 por cento. Os impactos desse erro no sistema proposto são muito pequenos dentro da mineração.

O rendimento interno da densidade ótima da polpa, é de 4,0%, dentro do moinho. Com esse rendimento, a energia interna é a menor possível com o moinho trambulando com sua carga no máximo.

O moinho de bolas foi construído para trabalhar com uma baixa concentração de ferro no minério de bolas. Com esse objetivo e com o minério de baixa concentração, o moinho de bolas irá moer o minério, retirando dele as impurezas até obter um minério fino que vai ser levado para a flotação ou concentrador, onde se obterá um minério fino, com ótima densidade de polpa com o nível de 69% de ferro.

O moinho de bolas, na mineração em geral, serve para várias opções. Quanto ao minério de ferro de baixa concentração, ele é o mais importante. Uma outra variável dentro do moinho é a quantidade de bolas e o seu tamanho físico. Esse parâmetro é também controlado pelo do moinho.

Como contribuições técnicas, tem-se o cálculo digital do controle de processo, complementando com o registro geral e a respectiva indicação da massa circulante da polpa, a qual é muito difícil de ser medida. Quanto as contribuições econômicas, o sistema de controle automático trouxe grandes divisas para o setor de mineração. Para a engenharia da tese, pode-se dizer que foi muito grande a contribuição no desenvolvimento, no âmbito Nacional do Mineração.

Na prática de Laboratório, os objetivos foram alcançados plenamente. Na prática de campo ou na mineração, ainda estamos no aguardo de alguma firma minerária, utilizar esse novo processo de controle no dia a dia.

No trabalho de laboratório nenhum obstáculo foi encontrado, por outro lado, dentro da indústria mineraria, está-se encontrado uma certa dificuldade em encontrar uma firma de mineração capaz de colocar na sua pauta esse novo trabalho.

Claro que se poderia, desde que nesse pequeno moinho de bolas, fosse nele colocado, todos os instrumentos necessários para o ensaio. Nenhum problema ocorreria nesse caso de ensaio.

Claro que sim. O sistema apresentado na tese já é um controle computacional de digitação.

Nem sempre é preciso, desde que o minério seja uma hemática compacto com 69,9%. Agora se o minério se apresentar com uma concentração muito abaixo, de hemática compacta, seria necessária passar pelo moinho de bola.

Sem o sistema proposto, o minério de ferro é de baixa qualidade. Agora, com minério produzido diretamente na mineração, com o sistema proposto, o minério triturado e embarcado, é um minério de alta qualidade.

Claro que sim. Nesse caso, os desgastes seriam menores.

A conclusão principal e final dessa tese é, elaborá-la na indústria mineraria, dentro de um moinho de bolas, com todos os instrumentos necessários, a fim de verificar os requisitos de um bom rendimento, comparado com os alcançados no Laboratório de ensaio da Firma Lamon Produtos, a qual é de 46%.

REFERÊNCIA

ALMEIDA MAGALHÃES, ANA LAURA M.; BRITO, P.; LAMON, GERALDO P,D,S,; JUNIOR, PEDRO A.A.M.; MAGALHAES, CRISTINA A,. **Numerical Resolution of Differential Equation Using the Finite Difference Method in the Real and Complex Domain**. Mathematics, 12, 1870. <https://doi.org/10.3390/math 12121870>, 2024

ALTUS. **Controlador Lógico Programável: PLC**. São Leopoldo: Rio Grande do Sul Altus, 2018. Disponível em: www.altus.com.br. <Acesso em: 14 maio 2019>.

ALVES, Evaristo Orellana. Medição contínua de densidade e concentração em processos industriais. **Instrumatic Instrumentation Experts**. São Paulo: 11 janeiro de 2012, Disponível em: <https://www.instrumatic.com.br/artigo/medicao-continua-de-densidade-e-concentracao-em-processos-industriais>. <Acesso em: 14 maio 2020>

AMIRI, A.; TRIPLETT, Z.; MOREIRA, A.; BREZINKA, N.; ALCOCK, M.; ULVEN, C. A. Standard density measurement method development for flax fiber. **Industrial Crops and Products**. V. 96, p. 196-202, fevereiro. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.060> <Acesso em: 10 maio 2019>.

ANDA, M. *et al.* **Reclamation of post-tin mining areas using forages: A strategy based on soil mineralogy**, chemical properties and particle size of the refused materials. Catena, v. 213, 1 jun. 2022.

ARRUDAS, Aziel A. **Otimização de um hidrociclone utilizado na separação**. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, da Pontifícia Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

ARUNACHALAM, K. P. *et al.* **Innovative use of copper mine tailing as an additive in cement mortar**. Journal of Materials Research and Technology, v. 25, p. 2261–2274, 1 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR / ISO / IEC 17025. **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Rio de Janeiro, 2017.

BAHMANI-GHAEDI, A. *et al.* **The effect of residual flocculants in the circulating water on dewatering of Gol-e-Gohar iron ore**. Minerals Engineering, v. 179, 30 mar. 2022.

BARBOSA, L *et al.* **Failure analysis of a steel slide ring of a tubular ball mill used in an iron ore mining plant**. Engineering Failure Analysis, v 110, mar. 2020.

BERGERMAN, Mauricio Guimarães. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais**. (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

BERGERMAN, M. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do sossego**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Escola Politécnica da Universidade de

São Paulo, São Paulo, 2009.

BOND, F. C. **Crushing and grinding calculations reprints from British Chemical Engineering**. Allis Chalmers Publication, 1971

BOZZOLA, A. R. **Bombeamento de polpa de minério de ferro via mineroduto**. Scrib, 2016. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/290137679/Bombeamento-de-polpa-de-minerio-de-ferro-via-mineroduto>. Acesso em: jan. 2023

BRUNATTO, Marcelo Luiz. **Eficiência da moagem de pó cerâmico em moinho agitador de esferas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2017.

BUMBERGER, Judith A; GRENEWOOD, Margaret S. **Measuring fluid and slurry density and solid concentration non-invasively** Journal Ultrasonics. v. 42, n. 1-9, p. 563-567, April. 2004.

CAVALCANTE, Irvylle Raimunda Mourão. **Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 9, p. 15362-15378, set. 2019.

CARVALHO, Marly de Ávila. **Avaliação da disposição de moinhos em circuitos de moagem de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. DE; ALBERTIN, E. **Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 59, n. 2, p. 173-178, abr. 2006.

CHAVES, Arthur Pinto; REVERI, Eduardo. **Desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas**. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, v.8, n.4, p.261-266, out./dez. 2011

CONEXÃO MINERAL. **Software eliminou controle manual de reposição de bolas em moinho e otimizou o processo**: OSC-4D da Metso já era utilizado em outras etapas do processo em planta localizada em Minas Gerais. 2019. <http://www.conexaomineral.com.br/software-eliminou-controle-manual-de-reposicao>. <Acesso em: 16 out. 2019>

COUTINHO, Sérgio; **Sistema de controle otimizante para deslamagem e flotação em coluna de minério de ferro da Mina do Pico**. SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE MINÉRIO DE FERRO INTERNACIONAL 2008. São Luiz. Anais [...]. São Luiz: SIMFI, 2008.

FARHAD MOOSAKAZEM, M.R.; **Effect of design and operational parameters on particle morphology in ball mills**. International Journal of Mineral, June 2017.

FLUID BRASIL SISTEMAS E TECNOLOGIA. **Hidrociclone para mineração**. São

Paulo: FLUID, 2018. Disponível em: www.fluidbrasil.com.br. <Acesso em: 14 de agosto 2018>.

FRAGOSO, A.; MARTINS, Rui, F.; SOAREZ, Antonio C. **Failure analysis of ball mill located in a cement's productions line.** Journal Engineering Failure Analysis. Vol. 138, August 2022.

FRANÇA, D. T. *et al.* **Structural and magnetic properties of Fe₂TiO₅ nano powders prepared by ball-milling and post annealing.** Materials Letters, v. 236, p. 526–529, 1 fev. 2019.

FRANÇA, J. L. & VASCONCELLOS, A. C. **Manual para Normalização Técnico e Científicas.** 10^a ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2019.

FUJITA, S. *et al.* **Deformation type during the ball milling process: A comparative study of the microstructures formed by ball milling, uniaxial compression, and rollin.** Powder Technology, v. 426, 01 ago. 2023.

GODEFROID, Leonardo B.; CÂNDIDO, Luiz C.; GUIMARÃES, Claudinei R.; ARAÚJO, Sidiney C. **Analysis of a steel slide ring of a tubular ball mill used in an iron ore mining plant.** Journal Engineering Failure Analysis. Volume 110, March 2020, 104433 www.elsevier.com/locate/engfailanal. <Acesso em 20 de julho de 2020>.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética.** João Pessoa, PB: Editora Universitária UFPB, 2021.

GOMES, W. L. *et al.* **Avaliação do desempenho do diâmetro dos corpos moedores no processo de moagem de bolas da Aga-Cuiabá.** HOLOS, Ano 33, Vol. 06, 2017.

GOMES, W. L. *et al.* **Método para simulação de moagem em moinho de bolas.** HOLOS, Ano 30, V.3, 2014.

GONTIJO, Hugo M.; *et al.* **Reposição automática de corpos moedores via controle avançado: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO.** São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo. 2017.

GREENWOOD, Margaret. S.; *et al.* **On-line ultrasonic density sensor for process control of liquid and slurries.** Journal Ultrasonics, v. 37, n. 2, p. 159-171, Feb. 1999.

HARINDINTWALI, J. D *et al.* **Effect of ball milling on biochar adsorption of contaminants in water: a meta-analysis.** Science of the Total Environ. 2023.

HUAZHENG. **Corpos moedores para moagem: bolas para moagem, esferas de aço para moinho,** 2019. Disponível em: <http://hzgrindingball.com.br>. <Acesso em: 14 out. 2019>.

INCONTROL LTDA. **Medidor ultrassônico de nível.** São Paulo 2018. Disponível em: www.incontrol.ind.br. <Acesso em: 14 outubro. 2019>.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia para expressão da incerteza de medição: GUM – 2008**; avaliação de dados de medição. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012a.

ISOILLAMON. **Medidor de vazão eletromagnético para polpa**. Belo Horizonte: Do Autor, 2018. Disponível em: www.IsoilLamon.com.br.<Acesso em: 14 junho. 2019>.

KINYUA, E. M. *et al.* **A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores**. Minerals Engineering, v. 186, 1 ago. 2022.

KRONEMBERGER, Vladmir. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)- Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

LAMON, Geraldo Pedro da Silva. **Sistema de medição dinâmica da densidade de polpa de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

LAMON, GERALDO P. S. MAGALHÃES, PEDRO A. A. JÚNIOR, CARNEIRO, JOSE, RUBENS G., **Cole type Pitot tube, discharge factor survey and calibration**, Measurement; Sensor, Volume 33, 2024, 101152, ISSN 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101152>, 1024

LEITE, Thiago de Oliveira Nunan. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Mineração Serra Grande**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

LI, Y. *et al.* **Unlocking the potential of iron ore tailings in controlled low-strength material: Feasibility, performance, and evaluation**. Journal of Cleaner Production, v. 423, 15 out. 2023.

LINS, Paloma Barros *et al.* **Modelagem e simulação de hidrociclones industriais para a separação de alumina/licor**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Florianópolis. *Anais* [...]. 2014.

MACHADO, Luiz Henrique Jorge. **Densímetro não radioativo, com amostragem a vácuo para líquidos**. Revista Minérios & Minerais, Ano 39, n. 370, p. 35, maio 2015.

MACHADO, Marcela Vieira Caixeta. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MAZZINGHY, Douglas Batista. **Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação**. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MELO, Clarissa Haddad de. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

METROVAL CONTROLE DE FLUIDOS. **Densímetro para polpa do minério**. São Paulo: Metroval Controle de Fluidos, 2018. Disponível em: <https://www.metroval.com.br>. <Acesso em: 14 junho.2019>.

METSO CORPORATION BRASIL. **Hidrociclone para mineração**. 2019, Disponível em: www.metso.com.br. <Acesso em: 14 junho. 2019>.

MOLY-COP, **MOLY-COP TOOLS**. Version 3.0. Disponível em: <https://molycop.com> <Acesso em: 14 abr. 2020>.

MOREIRA, João Luís, *et al* **Melhoria no desempenho do processo de moagem**. SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO E TI INDUSTRIAL, PARTE DA ABM WEEK, 2015. Rio de Janeiro. *Anais* [...]. Rio de Janeiro: ABM, 2015

MS INSTRUMENTOS. **Balança para correia transportadora: balança integradora: balança de polpa**. Rio de Janeiro: Do Autor: MS INSTRUMENTOS, 2018. Disponível em: www.msinstrumentos.com.br. <Acesso em: 14 junho. 2019>.

OLIVEIRA, Arthemis Silva de *et al*. CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. **Construção de moinho de bolas para a determinação de WI**. Recife. De moinho de BOLAS para a determinação de WI, 2018.

OLIVEIRA, Renata F. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas**. Monografia (Especialização) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Minas, Belo Horizonte, MG, 2012.

PAULA, Lucas F. de. **Diretrizes para a construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios**. Revista Química Nova, São Paulo, v. 37, n. 4, 2014.

Peng Huang *et al*. **Soft measurement of ball on mill loads under variable working conditions based on deep transfer learning**. School of mechanical engineering – China April 2022.

PENG Wang *et al*. **New insights into ball-milled zero-valent iron composites for pollution remediation: An overview**. *Journal of Cleaner Production*. Volume 385, 20 January 2023.

PLITT, L. R. A mathematical model of a hidrociclone classifier CIM BULL, December, p. 114-123, 1984. PRANDTL, Zeits f, angew, Math. U, Mach... 114 pages

POURASIABI, H.; GATES, J. D. **Ball mill abrasion test (BMAT): Method development and statistical evaluations**. *MethodsX*, v. 9, 1 jan. 2022.

REMIORZ, Leszek; OSTROWSKI, Piotr. **An instrument for the measurement of**

density of a liquid flowing in a pipeline. Revista Flow Measurement and Instrumentation, March 2015.

RODRIGUEZ, Victor Alfonso. **Modelo mecanicista UFRJ aplicado à cominuição em moinhos de bolas descontínuos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.metalmat.ufrj.br/pesquisa/producao-academica/> <Acesso em: 14 junho 2020>.

RODRIGO M. Carvalho *et al.* **Mechanistic Modeling and Simulation of grinding iron ore pellet feed in pilot and industrial-scale ball mills.** 12 julho 2021. Universidade Federal Rio de Janeiro – Brasil.

ROSA, Andreia Carolina. **Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ROVERI, Eduardo; CHAVES, Arthur Pinto. **Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas.** Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo. 2011.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. **Ensaio de classificação em hidrociclone.** In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.* Rio de Janeiro: CETEM-MCT. 2007, p.138-154.

SARDINHA, Oscar; SILVA, Antônio Carlos da; CARNEIRO, Benomil. **Invenção de um novo dispositivo para medidas de densidade por amostragem de polpa de minério na Mineração Caraíba.** Revista Minérios & Minerals, 14 maio 2013.

SILVA, A. L.; MOURA, A. J.; DELBONI JR., H.; AMARAL JR. **Estudo de Otimização do Circuito de Cominuição para Jacobina Mineração e Comércio.** 2011, *Anais...* Salvador: [UFBA/Instituto Federal da Bahia], 2011.<Acesso em: maio de 2019>.

SILVA, Daniel Nagano da; LOBO, Raquel de Moraes; ANDRADE, Arnaldo Homobono Paes de. **Análise da criticidade de falhas encontradas no munhão de moagem nos moinhos de bolas na mineração.** CONGRESSO ANUAL DA ABM, 68., 2013. *Anais [...]*. Belo Horizonte: ABM, 2013.

SILVA, José Pedro da. **Caracterização dos hidrociclones utilizados nas etapas de classificação dos concentradores I e II da SAMARCO MINERAÇÃO.** Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2014.

SILVA, Juliana Aliques de Oliveira. **Modelagem do moinho de bolas de rocha fosfática da empresa anglo American fosfatos brasis utilizando a ferramenta Moly-Cop Tools.** (Monografia) Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.
SMAR. **Transmissor de concentração e densidade DT-301.** Sertãozinho, SP: Smar

Equipamentos Eletrônicos, 2019. Disponível em: <http://www.smar.com> transmissor de densidade: 4,00 a 20,00mA <Acesse em: maio de 2020>.

SONG, L. *et al.* **La-containing magnetic zeolite synthesized from gangue by ball-milling method**. Materials Letters, v. 303, 15 nov. 2021.

TAMÁS, L.; RÁCZ, Á. **Effect of material bed compression on white fused corundum product particle shape and bulk density**. Open Ceramics, v. 16, p. 100489, dez. 2023.

TANHUA, A. *et al.* **The effects of dry grinding and chemical conditioning during grinding on the flotation response of a Cu-Zn sulphide ore and a spodumene pegmatite silicate ore**. Minerals Engineering, v. 189, 1 nov. 2022.

TEMBO, P.M *et al.* **Efeito do tamanho intersticial, das bolas e da alimentação na quebra de partículas em um moinho de bolas de laboratório**. Procedia Manufacturing, 2019.

TIWARI, J. *et al.* **Dislocation density- based modelling of electrically assisted deformation process by finite element approach**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 227, 2022.

VALE. **Melhoria no processo de moagem reduz consumo de energia e insumos no Pará**. [Belo Horizonte]: VALE, 2015. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/>. <Acesso em: 14 junho. 2019>.

VASCONCELOS, J. A.; BRANDÃO, P. R. G.; LEMOS, L. N. **Estudos de caracterização e concentração de Itabirito compacto do complexo Serra Azul, MG**. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, 2012.

WANG Guo *et al.* **Impact of ball filling rate and stirrer tip speed on milling iron ore**. Powder Technology Volume 378, Part A Pages 12-18, 22 January 2021, China.

WIEDEY, Raphael; KLEINEBUBBE, Peter. **Infrared thermography: a new approach for in-line density measurement of ribbons produced from roll compaction [S.I.]**: Revista Powder Technology, 2017.

WIKA DO BRASIL IND. E COMERCIO. **Medidor ultrassônico de nível**. São Paulo: 2018. Disponível em: <http://wika.com.br>. <Acesso em: 14 junho. 2020>.

YAHIA Ali, C.D.; Garcia MENDOZA, J.; GATES, D. **Efeito do impacto das bolas e das partículas abrasivas nos moinhos de aço de baixa liga**. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 62º Congresso Anual da ABM; 2019.

YIN, Zixin *et al.* **Experimental investigation of the impact breakage characteristics between grinding media and iron particle in ball mills**. Advanced Powder Technology. Volume 34, Issue 4, April 2023.