



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**CONTROLE FUZZY PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA DO PENEIRAMENTO NO
PROCESSAMENTO MINERAL**

Alexandre Gomes Fonseca

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2022**

Alexandre Gomes Fonseca

**CONTROLE FUZZY PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA DO PENEIRAMENTO NO
PROCESSAMENTO MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio,
D.Sc.

Ouro Preto
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F676c Fonseca, Alexandre Gomes.
Controle Fuzzy para aumento de eficiência do peneiramento no processamento mineral. [manuscrito] / Alexandre Gomes Fonseca. - 2022.
80 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Beneficiamento de minério - Peneiramento. 2. Beneficiamento de minério - Britagem. 3. Lógica difusa. 4. Confiabilidade (Engenharia) - Redução de Variabilidade. 5. Eficiência industrial. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.
PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Alexandre Gomes Fonseca

Controle fuzzy para aumento de eficiência do peneiramento no processamento mineral

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 05 de setembro de 2022

Membros da banca

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf
Doutor - Paulo Marcos de Barros Monteiro - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Péricles Rezende Barros - Universidade Federal de Campina Grande

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 19/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Saul Emanuel Delabrida Silva, VICE-COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONT. E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 22/11/2022, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0429326** e o código CRC **58B86E6C**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.015661/2022-41

SEI nº 0429326

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3552-7352 - www.ufop.br

*Dedico este trabalho à minha mãe,
por seu esforço em me prover uma
educação de qualidade.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus e à minha família primeiramente, por prover minha estrutura básica de formação educacional e humana, que me deu condições de lutar pelo meu crescimento e conquistar importantes vitórias como essa.

À minha esposa pela compreensão e apoio incondicional, sempre me incentivando na minha trajetória acadêmica e presente nos momentos difíceis com uma palavra de incentivo.

Ao meu orientador por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa. Sempre muito disponível e dedicado nos seus direcionamentos, com contribuições valiosas durante todo o processo.

Minha gratidão ao Instituto Tecnológico Vale, à Vale e à Universidade Federal de Ouro Preto. Estendo os agradecimentos ao meu gestor Gabriel Garioli pela compreensão e valorização da evolução acadêmica. Aos colegas de trabalho Thomas Vargas, Kaike Albuquerque e Robson Duarte, pela parceria na realização dos trabalhos.

*“Temos de fazer o melhor que
podemos. Esta é a nossa sagrada
responsabilidade humana”
(Albert Einstein)*

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONTROLE FUZZY PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA DO PENEIRAMENTO NO PROCESSAMENTO MINERAL

Alexandre Gomes Fonseca

Setembro/2022

Orientador: Thiago Antonio Melo Euzébio

O peneiramento é um processo que classifica partículas por tamanho. A indústria de mineração faz uso desse processo por meio de peneiras vibratórias, principalmente em circuitos de britagem. O objetivo é separar um fluxo de material em duas frações: material mais grosso (retido) e material mais fino (passante). A fração de material grosso alimenta os britadores para ser cominuído (reduzido o tamanho de partícula). Quando o peneiramento é ineficiente, finos são carregados junto com as partículas grossas, o que sobrecarrega a etapa de britagem, causando perdas de produtividade e até mesmo danos em equipamentos. Na literatura, é comum encontrar trabalhos de controle para aumento de eficiência de britadores, mas pouco há sobre sistemas de controle para aumento de eficiência em peneiras. Nessa dissertação é apresentada uma solução por controle fuzzy aplicada em um processo de peneiramento formado por dez linhas paralelas, em uma usina de beneficiamento de minério de ferro da Vale, em Canaã dos Carajás, PA. Os resultados indicam aumento de eficiência de peneiramento através de uma redução de 7,66% da carga circulante e um aumento de 2,37% na produtividade.

Palavras-chave: Peneiramento, Britagem, Lógica Fuzzy, Redução de Variabilidade, Ganho de Eficiência.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado; **Tema:** Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; **Área Relacionada da Vale:** Usina de beneficiamento Serra Sul.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FUZZY CONTROL TO INCREASE SCREENING EFFICIENCY IN MINERAL PROCESSING

Alexandre Gomes Fonseca

September/2022

Advisor: Thiago Antonio Melo Euzébio

Screening is a process that classifies particles by size. The mining industry uses this process by employing vibrating screens, mainly in crushing circuits. The objective is to separate a material stream into two fractions: coarse material (retained) and thin material (through). The coarse material fraction is fed to crushers to be comminuted (reduced particle size). When screening is inefficient, fine particles are carried along with the coarse particles, which overloads the crushing stage, causing productivity losses and even equipment damage. In the literature, it is common to find control works to increase the efficiency of crushers, but there is little about control systems to increase the efficiency of screens. This work presents a fuzzy control solution applied in a screening process formed by ten parallel lines, in a Vale iron ore beneficiation plant, in Canaã dos Carajás, PA. The results indicate an increase in screening efficiency through a 7.66% reduction in circulating load and a 2.37% increase in productivity.

Keywords: Screening, Crushing, Fuzzy Logic, Variability Reduction, Efficiency Gain.

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Analysis and Design of Advanced Control Systems; **Theme:** Variability Reduction and Control Improvement; **Related Area of Vale:** Beneficiation plant of Serra Sul.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Peneira Vibratória Inclinada.	14
Figura 1.2	Dados Estatísticos da Carga Circulante Usina 01.	17
Figura 1.3	Dados Estatísticos da Carga Circulante Usina 02.	17
Figura 1.4	Teste Correlação Velocidade Alimentadores x Eficiência Peneiramento.	18
Figura 1.5	Paradas de Linhas por Nível Baixo a cada 24 horas de Operação - US01.	19
Figura 1.6	Paradas de Linhas por Nível Baixo a cada 24 horas de Operação - US02.	19
Figura 1.7	Histograma Alimentação Usina 01.	20
Figura 1.8	Histograma Saída Usina 01.	20
Figura 1.9	Histograma Alimentação Usina 02.	21
Figura 1.10	Histograma Saída Usina 02.	21
Figura 3.1	Exemplo de Fluxograma de circuito de britagem destacando britagem terciária.	28
Figura 3.2	Exemplo de Fluxograma de circuito de britagem e moagem.	28
Figura 3.3	Um silo real com uma figura esquemática com as aberturas para os alimentadores abaixo.	29
Figura 3.4	Alimentador de Correia.	29
Figura 3.5	Alimentador de Correia.	29
Figura 3.6	Transportador por correia.	30
Figura 3.7	Transportador por correia.	30
Figura 3.8	Britador cônico.	31
Figura 3.9	Peneira Vibratória Inclinada.	31
Figura 3.10	Peneira Vibratória Inclinada de Dois <i>Decks</i>	32
Figura 3.11	Trajatória de uma Partícula Submetida ao Movimento Vibratório.	32
Figura 3.12	Processos do Peneiramento - Estratificação e Passagem.	33
Figura 3.13	Balanço de Massa da Peneira.	34
Figura 3.14	Função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> A.	37
Figura 3.15	Função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> B.	38
Figura 3.16	Função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> B.	39
Figura 3.17	Função de pertinência do conjunto <i>fuzzy</i> B.	39
Figura 3.18	Diagrama de Blocos Padrão Sistema Controle Convencional.	40
Figura 3.19	Arquitetura Controlador Fuzzy.	41

Figura 3.20	Pêndulo Invertido em Carrinho.	43
Figura 3.21	Controlador <i>Fuzzy</i> Pêndulo Invertido.	43
Figura 3.22	Funções Pertinência Entrada.	44
Figura 3.23	Pêndulo Invertido em Vários Estados.	47
Figura 3.24	Funções Pertinência Termos Premissa.	48
Figura 3.25	Funções Pertinência Entrada com Valores de Entrada.	49
Figura 3.26	a) Função Pertinência Consequente e b) Conjunto <i>Fuzzy</i> Implícito.	50
Figura 3.27	a) Função Pertinência Consequente Regra 2 b) Conjunto <i>Fuzzy</i> Implícito Regra 2.	50
Figura 3.28	Conjuntos <i>Fuzzy</i> Implícitos Agregados.	51
Figura 3.29	Conjuntos <i>Fuzzy</i> Implícitos com Indicação Saída.	52
Figura 4.1	Peneiramento Primário Britagem Secundária.	53
Figura 4.2	Peneira Vibratória Modular.	54
Figura 4.3	Peneiramento Secundário e Britagem Terciária.	55
Figura 4.4	Diagrama Processo Distribuição Minério via Cabeça Móvel.	55
Figura 4.5	Ciclo Abastecimento Silo Extremidade.	56
Figura 4.6	Diagrama de Controle do Peneiramento Secundário - Saída.	59
Figura 5.1	Novo Diagrama Controle Peneiramento Secundário Saída.	61
Figura 5.2	Trecho Código Modificações Controle <i>Fuzzy</i>	61
Figura 5.3	Diagrama Básico Lógica <i>Fuzzy</i> Linhas Peneiramento Secundário.	62
Figura 5.4	Diagrama Tratamento Dados Saída <i>Fuzzy</i>	64
Figura 5.5	Disposição Genérica Elementos Controlador <i>Fuzzy</i>	65
Figura 5.6	Funções Pertinência Nível.	67
Figura 5.7	Funções Pertinência Distância Cabeça Móvel.	67
Figura 5.8	Funções Pertinência Saída.	67
Figura 5.9	Representação Gráfica do Sistema <i>Fuzzy</i> Implementado.	70
Figura 6.1	Horas operadas Usinas 01 e 02.	72
Figura 6.2	Taxa Média de alimentação das Usinas 01 e 02.	72
Figura 6.3	Desvio Padrão Níveis dos Silos das Usinas 01 e 02.	73
Figura 6.4	Número Médio de Linhas em Operação nas Usinas 01 e 02.	74
Figura 6.5	Tempo Médio de cada Linhas em Operação nas Usinas 01 e 02.	74
Figura 6.6	Zonas de Velocidades dos Alimentadores das Usinas 01 e 02.	75
Figura 6.7	Velocidade Média dos Alimentadores das Usinas 01 e 02.	75
Figura 6.8	% de carga circulante das Usinas 01 e 02.	76
Figura 6.9	Produtividade das Usinas 01 e 02.	76

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Impactos da umidade do material	36
Tabela 5.1	Variáveis do Sistema <i>Fuzzy</i>	66
Tabela 5.2	Valores Linguísticos Entrada / Saída.	66
Tabela 5.3	Abreviações.	68
Tabela 5.4	Conjunto Regras para Função Pertinência Reduz Muito.	68
Tabela 5.5	Conjunto Regras para Função Pertinência Reduz.	69
Tabela 5.6	Conjunto Regras para Função Pertinência Mantém.	69
Tabela 5.7	Conjunto Regras para Função Pertinência Aumenta.	69
Tabela 5.8	Conjunto Regras para Função Pertinência Aumenta Muito.	70

Lista de Siglas e Abreviaturas

CO *Controller Output*

DC Distância para o Cabeça Móvel

MPC *Model Predictive Controller*

NS Nível do Silo

OP Indicador de Aceleração / Desaceleração

SDCD Sistema Digital de Controle Distribuído

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Contexto	14
1.2	Motivação	16
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Geral	22
1.3.2	Específicos	22
1.4	Perguntas	22
1.5	Estrutura do Texto	23
2	Revisão Bibliográfica	24
3	Fundamentação Teórica	26
3.1	Circuito de Britagem	26
3.1.1	Principais equipamentos	28
3.1.2	Processo de peneiramento	32
3.2	Controle <i>Fuzzy</i>	36
3.2.1	Introdução à lógica <i>Fuzzy</i>	36
3.2.2	Conceitos básicos de conjuntos <i>Fuzzy</i>	37
3.2.3	Controlador <i>Fuzzy</i>	39
3.2.3.1	<i>Fuzzificação</i>	42
3.2.3.2	Base de regras	45
3.2.3.3	Mecanismo de inferência	47
3.2.3.4	<i>Defuzzificação</i>	51
4	Circuito de Beneficiamento de Serra Sul	53
4.1	Peneiramento Secundário e Britagem Terciária	53
4.1.1	Descrição do cabeça móvel e processo de distribuição de minério	55
4.2	Estratégia de Controle do Peneiramento Secundário	56
5	Controle Fuzzy Implementado	60
5.1	Nova estratégia de controle	60

5.2	A estrutura macro do controle <i>fuzzy</i>	62
5.3	<i>Framework</i> utilizada	64
5.4	Funções de Pertinência de Entrada / Saída	66
5.5	A base de regras <i>fuzzy</i>	68
5.6	A Representação Gráfica do Sistema <i>Fuzzy</i>	70
6	Resultados e Discussões	71
7	Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros	77
	Referências Bibliográficas	79
	Apêndices	80

1. Introdução

1.1. Contexto

O peneiramento é um importante método de classificação utilizado na indústria, principalmente da mineração. O principal objetivo do peneiramento é classificar as partículas baseado no seu tamanho e formato (WILLS, 2006). Trata-se de uma operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula tem apenas as possibilidades de passar ou de ficar retida. Os dois produtos chamam-se *oversize* ou retido e *undersize* ou passante (CHAVES e PERES, 2003). Em suma, os finos são “aceitos” e passam pela malha das telas (gabarito) e os materiais grossos ficam retidos e seguem para outras etapas. Esse processo é muito utilizado em circuitos de britagem, tendo um papel significativo na eficiência do circuito através da boa separação de partículas, entregando para os britadores a fração do material que de fato precisa ser cominuída. Na Figura 1.1 é ilustrada uma peneira vibratória, um dos principais equipamentos utilizados na etapa de peneiramento.



Figura 1.1: Peneira Vibratória Inclinada.

Fonte: O autor.

Segundo King (2001), a consideração mais significativa ao avaliar um equipamento de classificação é a incapacidade de realizar uma classificação ótima de um tamanho particular. Mesmo o mais eficiente classificador industrial por tamanho vai permitir a passagem de uma proporção de material *oversize* e vai reter uma porção de material *undersize*. Sendo assim é importante a avaliação e o cuidado com a eficiência desse processo.

A capacidade de uma peneira vibratória, representa sua competência em processar determinada tonelagem de alimentação de material (taxa de alimentação). A suposição mais importante nessa abordagem é que a capacidade de uma peneira é diretamente proporcional à sua área superficial. Sendo assim sua capacidade básica é especificada em toneladas de alimentação por

hora por metro quadrado de superfície de peneiramento. A capacidade de qualquer peneira é determinada sob condições de operação padrão utilizando um material de alimentação também padrão e predefinido.

À medida que a natureza do material de alimentação e as condições operacionais mudam, a capacidade real da peneira também muda, aumentando para condições menos árduas que o padrão e diminuindo para condições mais árduas que o padrão. A condição mais árdua se configura quando as características do material sendo alimentado tornam a tarefa de peneiramento mais complicada que o previsto em projeto. Dessa forma teremos um limite de capacidade dinâmico em uma operação real (KING, 2001). Uma peneira, operando acima da sua capacidade momentânea, classifica com baixa eficiência.

Durante o processo de peneiramento, muitos parâmetros operacionais podem afetar seu desempenho. Esses parâmetros podem ser divididos em parâmetros de máquina ou características de fluxo. Parâmetros de máquina, como as dimensões da tela, material do *deck*, frequência de vibração, amplitude de vibração, e inclinação, dependem da unidade instalada e da estratégia operacional selecionada. As características do fluxo incluem propriedades do material, como a distribuição de tamanho, forma, densidade e taxa de fluxo de material (ASBJÖRNSON *et al.*, 2016).

Outro aspecto importante ligado ao fluxo do material e que interfere no desempenho e capacidade de peneiramento é sua umidade, quando em processo de peneiramento a seco. A umidade da superfície tende a fazer as partículas aderirem e a capacidade de peneiramento é reduzida (KING, 2001). Esse efeito tende a aumentar a proporção de *undersize* no retido levando a uma baixa eficiência de peneiramento. Neste cenário, deve-se reduzir a taxa de alimentação da peneira, que leva a uma redução da altura do leito de material, para ajustar o processo à sua capacidade real do momento. Perdas significativas de eficiência no peneiramento provocam um aumento da carga circulante, podendo sobrecarregar britadores e peneiras e restringir a produção.

Os parâmetros de máquina podem ser considerados como parâmetros fixos, que não se alteram dinamicamente ou tem alterações pontuais e pouco frequentes. Já as propriedades do material (características do fluxo), exceto a taxa, são consideradas como variáveis não controladas, distúrbios para o processo. Como possibilidade de variável manipulada, temos então, a taxa do fluxo de alimentação da peneira.

Em diversas plantas de mineração, devido à alta capacidade requerida, alguns processos como os de peneiramento e britagem são formados por linhas paralelas. Dessa forma, a capacidade das linhas individuais é somada para que se chegue à capacidade de projeto definida. Esse é caso em Serra Sul, complexo minerário de ferro da Vale em Canaã dos Carajás, Pará, alvo deste trabalho.

Para casos que utilizam linhas paralelas, como em Serra Sul, equipamentos do tipo transportador de correia com cabeça móvel são utilizados para distribuir o material individualmente e sequencialmente ao longo dos silos de cada linha. Essa tarefa é importante para uma operação

mais eficiente, pois tem como objetivo evitar paradas de linhas por nível baixo (falta de material) e paradas do circuito a montante por nível alto em algum silo.

Paradas de linhas por nível baixo resultam em um aumento da taxa de alimentação nas demais peneiras que estão em operação, para que seja mantida a produção definida para o momento. Esse aumento de taxa, principalmente em situações de material de maior dificuldade de peneiramento, resulta em perda de eficiência de classificação. Condições como essa, isto é, de maior dificuldade de peneiramento, são frequentes em usinas que apresentam grande variabilidade nas características do minério sendo alimentado, como principalmente umidade e granulometria, como é o caso de Serra Sul.

Em suma, existe um limite através do qual a eficiência de peneiramento diminui com o aumento na taxa de alimentação. Esse limite é dinâmico, não conhecido e está associado principalmente, em se tratando de Serra Sul, à umidade do minério alimentado. Dessa forma, torna-se essencial manter o maior número de linhas em funcionamento pois resulta em menores taxas individuais das linhas. Em outras palavras, buscando a menor tonelagem de alimentação por hora por metro quadrado de superfície de peneiramento, diminuindo a exposição do processo a situações de baixa eficiência de peneiramento por operar acima da capacidade do momento.

Neste trabalho, um controlador *fuzzy* foi projetado para aprimorar a distribuição de minério (balanceamento dos níveis) entre os dez silos do peneiramento secundário da usina de beneficiamento de minério de ferro de Serra Sul. A solução atua variando a velocidade dos alimentadores, visando um melhor balanceamento dos níveis dos silos que alimentam as peneiras. Assim, reduz-se as paradas por nível baixo propiciando um processo com mais área de peneiramento e menores taxas de alimentação nas peneiras. Por consequência, um peneiramento e britagem mais eficientes.

1.2. Motivação

No complexo minerário de Serra Sul, da Vale, em Canaã dos Carajás, contamos com três usinas de beneficiamento de minério de ferro (1, 2 e 3). Cada uma contém dez linhas paralelas de peneiramento secundário e quatro linhas de britagem terciária, que processam o *oversize* das peneiras. Essas usinas apresentam grande variabilidade nas características do minério alimentado, como principalmente umidade e granulometria. Operam tanto em situações de baixa carga circulante, sem restrições de peneiramento e britagem, como também em situações de carga circulante muito alta, com baixa eficiência de peneiramento e limitações de capacidade na britagem terciária e em circuitos de transporte. Na Figura 1.2 e na Figura 1.3 temos uma análise estatística do comportamento da porcentagem de carga circulante das Usinas 1 e 2. Essa porcentagem é definida pela razão entre a carga circulante (*oversize* das peneiras) e a taxa de produto (*undersize* das peneiras). As análises foram realizadas por meio de uma base de dados diária, composta por mais de 600 amostras, dos anos de 2021 e 2022. Observe a alta exposição dos circuitos a cargas circulantes acima do limite superior especificado (LSE). Em média, as

usinas operaram aproximadamente 23% do tempo com alta carga circulante (acima de 40%). As análises são baseadas nas Usinas 01 e 02 pois são equivalentes e mais adequadas para critérios de comparação. A Usina 3 apresenta algumas particularidades que desfavorecem.

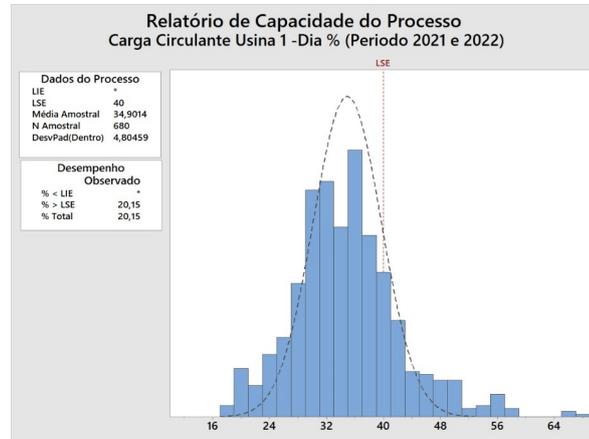


Figura 1.2: Dados Estatísticos da Carga Circulante Usina 01.

Fonte: O autor.

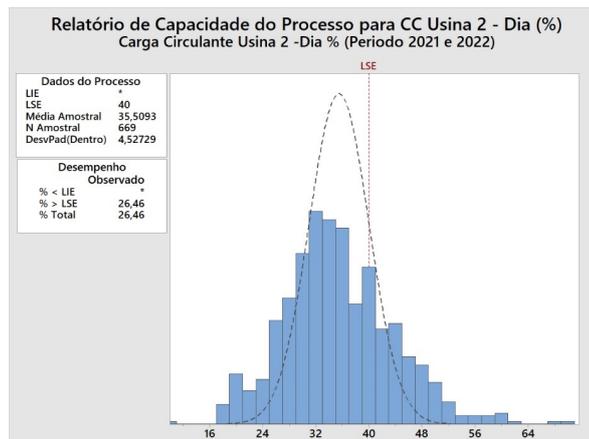


Figura 1.3: Dados Estatísticos da Carga Circulante Usina 02.

Fonte: O autor.

Conforme exposto, as usinas operam em um faixa muito extensa de porcentagem de carga circulante, variando desde valores próximos a 15% até valores acima de 55%, comprovando também a grande variabilidade das características do material de alimentação. Cargas circulantes mais altas tem duas principais causas. A primeira delas é a variação da distribuição granulométrica, isto é, alimentação com material mais grosseiro. Já a segunda, a própria eficiência de peneiramento, que resulta em um aumento do fluxo de material no *oversize* que deveria ser *undersize*, isto é, material fino presente no material grosso.

Mesmo nos tempos atuais com todo o avanço tecnológico, o monitoramento e controle da eficiência de peneiramento ainda são feitos, em muitos casos, manualmente. O operador da área, através da inspeção visual, identifica a alta presença de finos na carga circulante ou

percebe alguma alteração no perfil da camada de material na peneira. Entendendo que o processo está operando com baixa eficiência devido às características do material, comumente a taxa de alimentação é reduzida manualmente na tentativa de adequar o fluxo à capacidade do peneiramento do momento. Dessa forma, caracterizando uma tarefa de baixa precisão, pois trata-se de uma avaliação subjetiva e sujeita a erros. Além disso, atrasos na tomada de decisão acontecem tanto para restringir a produção quanto para normalizar a condição, pois o operador tem outras atribuições. Isto implica em perdas de produtividade e exposição dos equipamentos a sobrecargas.

Para a opção de monitoramento automático da condição de peneiramento, existem no mercado os analisadores granulométricos por imagem. Em suma, são câmeras instaladas sobre os transportadores por correia, que captam as imagens do minério em movimento. Essas imagens são processadas em um servidor, que basicamente faz a função de segmentação das partículas e estima a distribuição granulométrica através de uma relação de *pixels* por tamanho real. Mas além do alto custo de aquisição, são equipamentos complexos para serem mantidos e calibrados ao ponto de se ter uma medição qualificada o suficiente para ser utilizada em estratégias de controle automático.

De volta para a realidade das usinas de Serra Sul, nos deparamos com um problema conhecido de eficiência de peneiramento somado à ausência de um medidor online de granulometria. Dessa forma, configurando um cenário desafiador de como uma solução de controle automático pode contribuir. Na Figura 1.4 temos dados de um teste realizado para comprovar que em determinadas situações a alta velocidade dos alimentadores terá impacto direto na carga circulante pois compromete a eficiência de peneiramento. Esses dados reforçam a teoria mencionada na introdução desse projeto de pesquisa. No caso desse teste, a velocidade média dos alimentadores foi aumentada quando manualmente três linhas foram paralisadas.

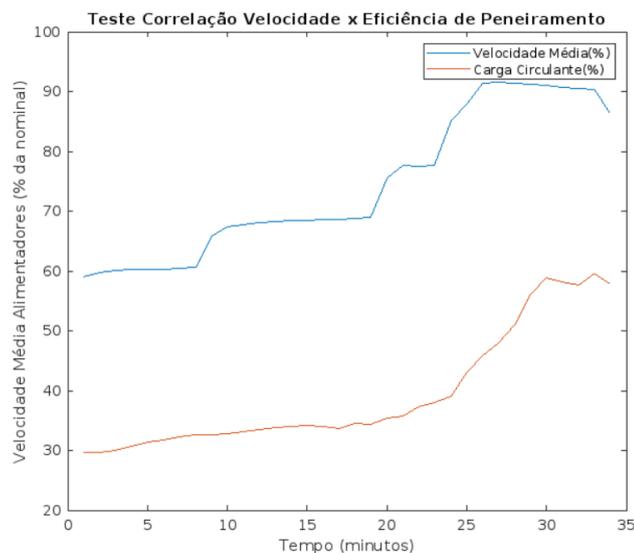


Figura 1.4: Teste Correlação Velocidade Alimentadores x Eficiência Peneiramento.

Fonte: O autor.

Então, ao invés de identificar automaticamente cenários de baixa eficiência de peneiramento e restringir a produção, partiu-se para o objetivo de evitar essas situações operando com velocidades mais baixas nos alimentadores. A maneira encontrada para atingir esse objetivo sem restringir produção é manter o maior número possível de linhas em operação, pois dessa forma pode-se ter uma menor taxa individual mantendo a mesma produção definida para o momento.

Grande parte das paradas individuais de linhas, durante a operação da usina, são causadas por nível baixo, isto é, falta de minério no silo. A Figura 1.5 e a Figura 1.6 apresentam o número de paradas por linha a cada vinte e quatro horas de operação da Usina 1 e 2, no mês de setembro de 2021. É notável o número elevado (média aproximada de 40 paradas) abrindo espaço para uma solução automática que contribuísse para sua redução.

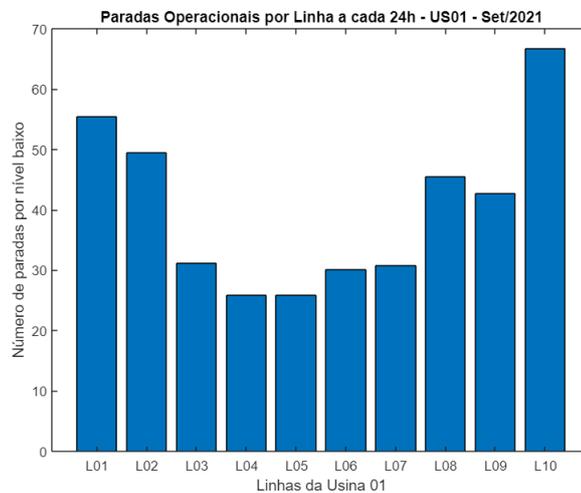


Figura 1.5: Paradas de Linhas por Nível Baixo a cada 24 horas de Operação - US01.

Fonte: O autor.

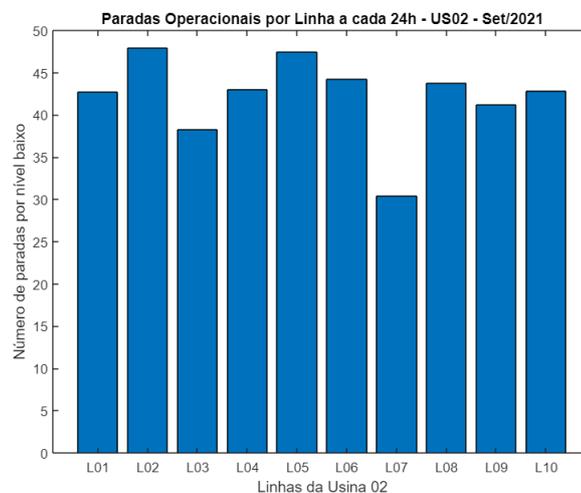


Figura 1.6: Paradas de Linhas por Nível Baixo a cada 24 horas de Operação - US02.

Fonte: O autor.

A Figura 1.7, Figura 1.8, Figura 1.9 e Figura 1.10 são histogramas da taxa de alimentação e de saída da Usinas 01 e 02. São dados para demonstrar a grande variabilidade de taxa tanto na alimentação como na saída, que impactam diretamente no número de linhas em operação. Esse balanço de massa (entrada menos saída), é um dos principais fatores que afetam o número de paradas de linhas por nível baixo. Quando negativo, teremos uma redução dinâmica do nível médio dos silos, causando mais paradas de linhas por nível baixo. Quando positivo, teremos o contrário, um aumento dinâmico do nível médio favorecendo um menor número de paradas.

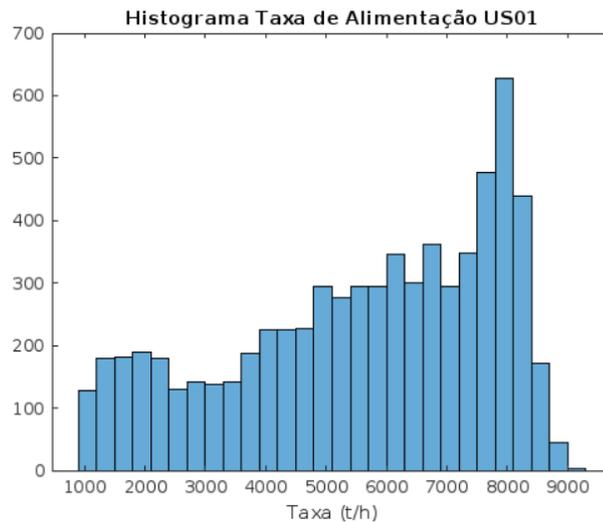


Figura 1.7: Histograma Alimentação Usina 01.

Fonte: O autor.

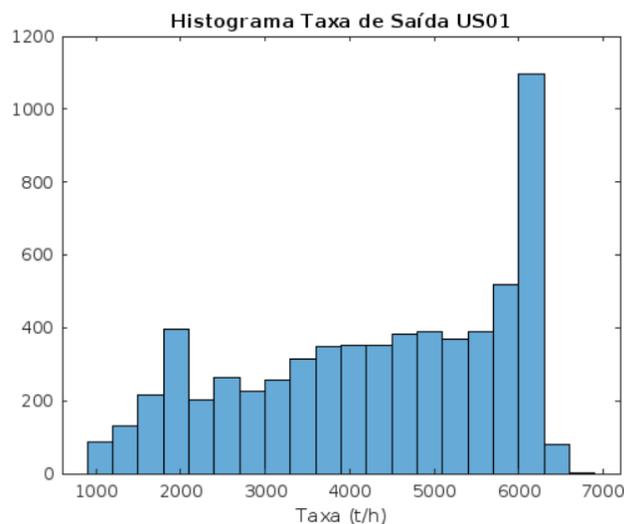


Figura 1.8: Histograma Saída Usina 01.

Fonte: O autor.

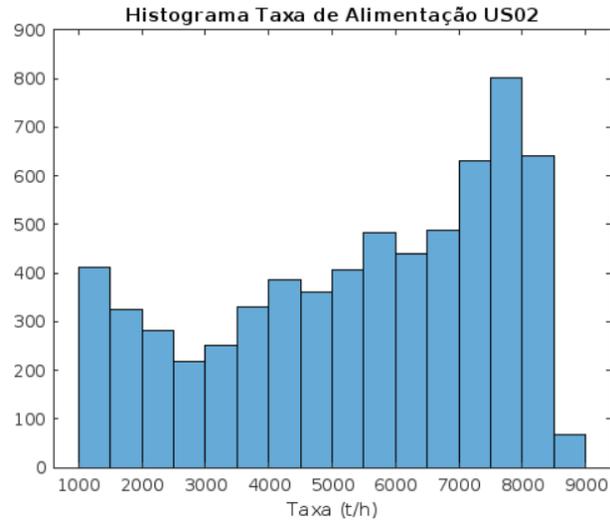


Figura 1.9: Histograma Alimentação Usina 02.
Fonte: O autor.

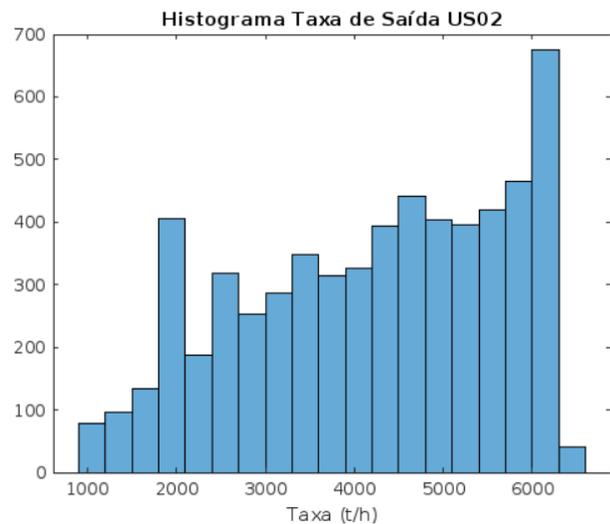


Figura 1.10: Histograma Saída Usina 02.
Fonte: O autor.

Sendo o balanço de massa algo já coberto pela estratégia de controle atual, o foco foi direcionado para o aumento do desempenho da tarefa de distribuição do minério nos silos. Diversos eventos e variáveis influenciam para ocorrer desbalanceamentos entre os níveis dos silos como:

- Paradas de linhas para manutenção;
- Alta variabilidade na taxa de alimentação fazendo com que silos recebam mais ou menos material;
- Intervenções manuais no controle automático;

- Diferentes ciclos de acesso ao abastecimento de minério dos dez silos de cada usina, sendo os silos das extremidades desprivilegiados nessa questão.

Para tal, foi desenvolvido um controle *fuzzy* MISO que fosse capaz de melhorar a tarefa de distribuição do minério entre os silos, através do desbalanceamento das velocidades dos alimentadores. Isto é, acelerando ou desacelerando alimentadores quando possível com o propósito de manter mais linhas em operação evitando paradas por nível baixo. Com mais linhas em operação, tem-se uma velocidade média mais baixa nos alimentadores, contribuindo para a eficiência de peneiramento. Com uma melhor eficiência de peneiramento também é esperado uma contribuição na porcentagem de carga circulante e maior produtividade.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

Desenvolver e aplicar controlador *fuzzy* para aprimorar a eficiência do peneiramento por meio da maximização das linhas em operação.

1.3.2. Específicos

- Diminuir a variabilidade entre os níveis dos silos das dez linhas do peneiramento;
- Reduzir as paradas de linhas por nível baixo (falta de minério);
- Reduzir as paradas do circuito a montante devido nível alto em algum silo de alguma linha do peneiramento;
- Reduzir a velocidade média dos alimentadores em operação;
- Reduzir a porcentagem de carga circulante;
- Aumentar a produtividade.

1.4. Perguntas

Ao final deste trabalho, pretende-se responder às seguintes questões:

1. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de reduzir a variabilidade entre os níveis dos silos?
2. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de melhorar a distribuição de minério através do desbalanceamento das velocidades dos alimentadores gerando um aumento do número de linhas em operação?

3. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de provocar uma redução na velocidade média dos alimentadores em operação?
4. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de aumentar o tempo médio de cada linha operando, isto é, obter uma operação mais estável com um menor número de paradas por nível baixo?
5. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de contribuir para a eficiência de peneiramento gerando uma redução da porcentagem de carga circulante?
6. É possível projetar um controlador *fuzzy* capaz de contribuir para um aumento da produtividade?

1.5. Estrutura do Texto

Nessa dissertação temos no capítulo 1 a introdução do tema. Capítulo 2 apresenta os principais trabalhos já realizados em melhorias de eficiência de peneiramento em circuitos de britagem. No capítulo 3 temos a fundamentação teórica de suporte à pesquisa e o capítulo 4 resume o circuito de Beneficiamento de Serra Sul e o atual sistema de controle utilizado. Capítulo 5 descreve o controlador desenvolvido. Capítulos 6 e 7 apresentam os resultados e a conclusão do trabalho respectivamente.

2. Revisão Bibliográfica

Em se tratando de circuito de britagem, existem diversos estudos voltados à melhoria do seu desempenho. Grande parte desses estudos são focados nos britadores e sem alterações na fase de peneiramento. Esta seção apresentará a abordagem de alguns deles.

Existem trabalhos específicos de controle de parâmetro de britadores cônicos como o realizado por Hulthén e Evertsson (2009), que utilizaram o conceito de Máquina de Estados Finitos para definir em tempo real uma abertura de posição fechada ideal que resulte na maior taxa do produto de interesse. Em determinados intervalos de tempo, a abertura é reduzida e a taxa de transferência da fração granulométrica de interesse e a pressão do sistema são verificadas. Caso seja identificada uma melhora na produção sem apresentar alta pressão, a nova abertura é mantida. Caso contrário o sistema retornar á para o estado anterior. Essa manobra é realizada ciclicamente em busca de se definir dinamicamente a melhor abertura de posição fechada que maximize a produção, ajustando o sistema em tempo real de acordo com as variações nas características da alimentação.

Como mais um trabalho voltado para parâmetro de britadores, Itävuo *et al.* (2017) descrevem um novo esquema de controle para britadores cônicos que estima o nível de câmara através de um estimador de estados adaptativo variante no tempo que permite um sistema mais robusto com certa tolerância a erros de medição. Os benefícios da abordagem incluem a possibilidade de recuperação de perdas temporárias do sinal de medição, controle de nível mais consistente e com menor esforço de controle (como resultado da diminuição do ruído do sensor) e aumento da robustez do sistema devido a uma maior habilidade de resistir a erros de medição. Dessa forma é esperado um processo de fragmentação mais estável e a maximização da eficiência de britagem devido à operação desse tipo de equipamento requerer nível de câmara cheio para que se atinja o rendimento projetado.

Direcionado ao balanço de massa do circuito, Itävuo *et al.* (2019) propuseram um controle com foco em alimentar o processo de britagem de acordo com a demanda real enquanto mantém uma certa quantidade de material acumulada dentro do circuito associado com uma estratégia de controle de nível dos silos intermediários mais relaxada. Isto é, a alimentação do circuito é baseada na capacidade de processamento realizada, que varia ao longo do tempo. O método envolve controlar a quantidade de material acumulada dentro do circuito, ao invés de apenas controlar os níveis de silos. É baseado no conceito de silo virtual, onde o circuito inteiro (transportadores e silos) é interpretado como um único meio de armazenamento. O uso do silo virtual simplifica muito a complexidade do controle removendo o tempo morto da malha e tendo apenas um único simples processo integrador (planta) que pode ser facilmente regulado com métodos de controle clássicos. O objetivo é entregar para o circuito a sua capacidade, reduzindo situações de subutilização (perda de produção) ou transbordo (paradas de circuito) ao mesmo tempo em que assegura um uso eficiente da sua capacidade de armazenamento intermediária (silos) para absorver perturbações de processo.

Ainda em aprimoramentos de estratégias de controle de alimentação de circuitos de britagem, Duarte *et al.* (2020) modificaram o sistema de controle de um circuito de britagem, anteriormente utilizando um controlador baseado em regras, para uma estrutura de controle *override*. Tal modificação trouxe ganhos significativos de estabilidade, reduzindo a variabilidade de alimentação da britagem. Resultado foram observados tanto em ambiente de simulação quanto na aplicação industrial, que apresentou um potencial de aumento de 17,2% na produtividade do circuito.

Em circuitos de britagem com linhas paralelas, se a quantidade de equipamentos ativos for maior que o nível ótimo, verifica-se perda de desempenho de cominuição e consumo extra de energia. Santos *et al.* (2020) propuseram um sistema de suporte à decisão utilizando uma solução baseada em uma abordagem *simheurística*. A solução proposta otimiza a quantidade de equipamentos ativos para maximização da produção de britagem considerando as alterações na taxa de alimentação do circuito. Em um ambiente de simulação, resultados de redução no consumo energético e aumento de produtividade foram encontrados.

Em se tratando de controles para melhoria da distribuição de material em silos de linhas paralelas de circuito de britagem, temos trabalhos como o realizado por Albuquerque *et al.* (2019). Neste trabalho foi desenvolvido um controlador baseado em regras que manipula de forma discreta a velocidade da cabeça móvel do transportador que alimenta os silos, bem como realiza seleção automática do número de silos disponíveis através de simples regras fundamentadas pela média dos níveis dos silos ativos. Com o esquema proposto foi possível verificar, através de simulação, uma redução da variabilidade dos níveis individuais dos silos e uma elevação da mediana do nível médio dos silos ativos. Isso sem causar paradas do circuito a montante por nível alto e com redução significativa de paradas individuais de linhas por nível baixo (falta de material), que causam instabilidade no circuito de britagem a jusante, prejudicando sua eficiência. Para a simulação, a taxa de alimentação foi considerada como distúrbio (variável) e as taxas de saída de cada linha da britagem assumiram valores fixos e iguais.

Outros trabalhos envolvendo apenas o aumento de eficiência de movimentação da cabeça móvel sem abordar aspectos de controle do número de linhas ativas são encontrados, como Karelavic *et al.* (2015), que propôs um controlador MPC Híbrido para minimizar os movimentos da cabeça móvel, enquanto evita condições de nível alto. Outra solução para movimentação da cabeça móvel é apresentada em Caldas e Martins (2018), que aborda o tema na forma de um problema de otimização.

Sendo assim, não foram encontrados trabalhos em controle de processos focados em aumento da eficiência de peneiramento com aplicação de estratégias de controle em tempo real. Como a etapa de classificação é muito importante para a eficácia do circuito de britagem como um todo, estratégias de controle multiobjetivo cobrindo britagem e também peneiramento podem incrementar significativamente a eficiência global.

3. Fundamentação Teórica

3.1. Circuito de Britagem

Para descrever circuitos de britagem, inicialmente é importante mencionar o processo de cominuição. Cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanho de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado. Isto inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos, (CHAVES e PERES, 2003). É necessária devido a diversas razões como:

- Para permitir manuseio do material de mineração: precisa ter seu volume reduzido para ser movimentado;
- Para permitir o transporte contínuo: transportadores de correia, que são o meio mais conveniente para transporte do minério, são limitados quanto ao tamanho das peças que podem transportar. Então para qualquer transporte em transportadores de correia o minério precisa ser britado;
- Para permitir a utilização do minério: para exemplificar, a brita para concreto ou pavimentação deve ter tamanhos bem definidos e o carvão para ser queimado em grelhas precisa ser graúdo e isento de finos;
- Para liberar as partículas dos minerais úteis e dos minerais de ganga e permitir sua separação, através dos processos de concentração, em concentrados, rejeitos e produtos intermediários.

As operações de cominuição são a britagem e a moagem. Elas são diferentes não só em termos de faixa de tamanhos considerada, como principalmente, dos mecanismos de redução de tamanhos envolvidos. Nos processos de britagem, as partículas grosseiras sofrem a ação de forças de compressão ou de impacto. Os processos de moagem se restringem às frações mais finas e utilizam mecanismos de abrasão e arredondamento (quebra de arestas).

Conforme Itävuo *et al.* (2013), o circuito de britagem figura um importante papel na indústria de agregados e de mineração reduzindo o tamanho das partículas de sólidos granulados, como rochas e minérios. Antes que o tamanho do produto desejado seja alcançado, o material de alimentação passa por 2 a 4 estágios de britagem que formam um circuito. Cada circuito de britagem consiste de uma combinação de operações unitárias de britagem, peneiramento, transporte, alimentação e armazenamento.

Em geral, circuitos de britagem, são utilizados como um estágio de pré-processamento antes da moagem e outros tratamentos para partículas finas na indústria da mineração. Conforme exposto em Hulthén (2010), circuitos de britagem consistem de um conjunto de máquinas

que são colocadas juntas para formar um processo que gradualmente reduz o tamanho do material processado. As máquinas geralmente encontradas são as que seguem:

- Máquinas de redução de tamanho, britadores;
- Máquinas de separação por granulometria, peneiras;
- Equipamentos de transporte, transportadores por correia;
- Armazenamento, pilhas ou silos;

O processo é dividido em vários estágios com diferentes faixas granulométricas cada. A configuração das plantas pode diferir, mas de uma forma em geral são como seguem. O estágio primário consiste de um britador de mandíbulas ou giratório em muitos casos. Os estágios secundário e terciário, por outro lado, utilizam britadores cônicos como máquinas de redução de tamanho. Além do mais, peneiras são colocadas entre os britadores na maioria dos estágios, com a função de classificação por tamanho, operando em malha aberta ou fechada com os britadores.

A operação unitária de britagem pode ser realizada por diversos tipos de britadores, sendo que todos produzem redução de tamanho. Entretanto podem ter diversas funções em combinação com peneiras de vários tipos, conforme citado em Wills (2006):

- Máxima redução de tamanho – frequentemente como preparação de alimentação para circuitos de moagem;
- Máximo produto de um tamanho especificado. Formato da partícula é importante às vezes;
- Redução de tamanho superior para manipulação de material e projeto do transportador;
- Controle de tamanho superior com a mínima produção de finos – para commodities como minério de ferro e carvão.

Em se tratando da indústria de mineração, Evertsson (2000) relata que os principais tipos de britadores encontrados são os giratórios, de rolos, mandíbulas, cônicos e de impacto. Como britadores giratórios tem uma maior capacidade que de mandíbulas são usualmente utilizados como primários pela indústria de mineração. Britagem primária pode ser executada no ambiente subterrâneo ou na superfície próxima aos estágios seguintes de britagem e cominuição. As configurações dos britadores secundários e terciários junto com as peneiras variam de caso a caso. Para circuitos fechados o produto final é o passante das peneiras enquanto o material retido é realimentado para os britadores e rebitado. Circuitos abertos de britagem são frequentemente utilizados em estágios intermediários.

As Figuras 3.1 e 3.2 são dois fluxogramas comuns de circuitos de britagem. Na Figura 3.1 temos um circuito de britagem, com três estágios (primário, secundário e terciário), dois

circuitos fechados e realçando as operações unitárias de britagem, peneiramento e armazenamento. Na Figura 3.2 temos outro circuito com três estágios de britagem e em seguida um único estágio de moagem. Existe apenas um produto da planta de britagem, que é a alimentação da moagem. Essa configuração de circuito de britagem preparando a alimentação para o circuito de moagem é extremamente comum na indústria de mineração.

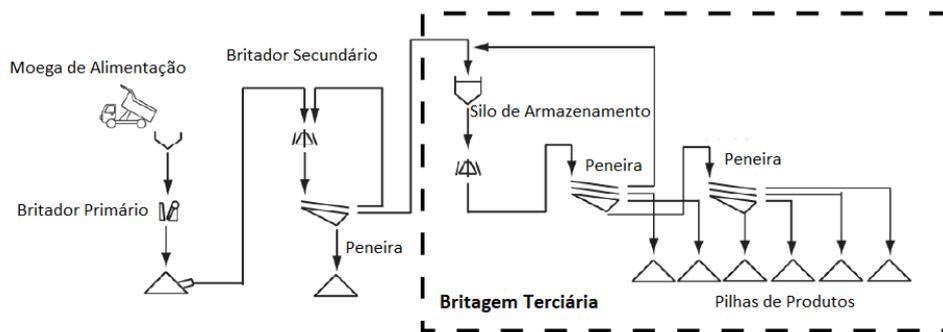


Figura 3.1: Exemplo de Fluxograma de circuito de britagem destacando britagem terciária.
Fonte: Hulthén (2010).

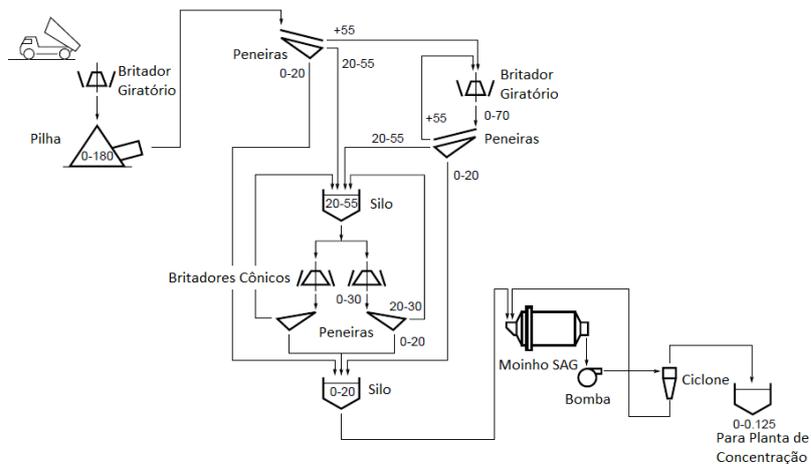


Figura 3.2: Exemplo de Fluxograma de circuito de britagem e moagem.
Fonte: Hulthén (2010).

3.1.1. Principais equipamentos

Nesta seção, os principais equipamentos de um circuito de britagem são descritos. Começando pelos silos de armazenamento, ilustrado na Figura 3.3, que são estruturas projetadas para armazenar materiais sólidos a granel. Sua função é formar um estoque intermediário entre duas etapas do beneficiamento mineral. Em geral, os transportadores por correia cumprem o papel de trazer o minério de um estágio anterior e armazená-lo lá. Mais tarde, esse material é removido por equipamentos chamados alimentadores, localizados logo abaixo de cada uma dessas câmaras, prosseguindo com a tarefa de processamento mineral (WILLS, 2006).

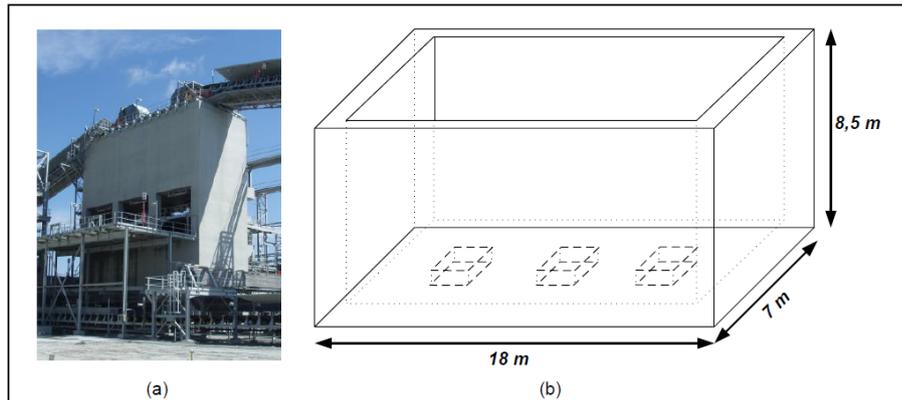


Figura 3.3: Um silo real com uma figura esquemática com as aberturas para os alimentadores abaixo.

Fonte: Asbjörnsson (2015).

O alimentador é essencialmente um transportador de minério de curta distância instalado sob pilhas, silos ou moegas. Tem como função remover o material dessas estruturas de armazenamento propiciando um fluxo de material regulado para os equipamentos posteriores do circuito, como por exemplo, transportadores, britadores, peneiras ou silos. Em geral, apresentam velocidade variável para permitir o controle de taxa. Um dos principais tipos utilizados é o alimentador de correia, ilustrado na Figura 3.4 e na Figura 3.5.



Figura 3.4: Alimentador de Correia.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

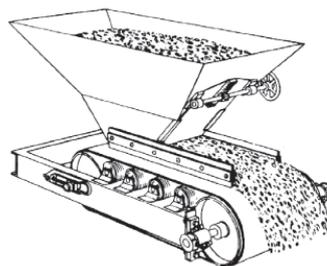


Figura 3.5: Alimentador de Correia.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

Conforme Santos *et al.* (2020), outro equipamento fundamental no processo de britagem e na mineração é o transportador de correia, Figura 3.6. Ele tem como objetivo a transferência de material continuamente. A correia trabalha sob o efeito da força de atrito. O transportador de correia é composto por uma estrutura simples e de fácil manutenção. Sua capacidade de transferência é alta e a distância é longa.



Figura 3.6: Transportador por correia.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

Santos *et al.* (2020) descreve o britador como um equipamento projetado para fragmentar minério a uma granulometria adequada para a etapa seguinte do circuito. O funcionamento de um britador é periódico, alternando uma ação de quebra e uma ação de abertura conforme visto na Figura 3.7. A ação de abertura propicia a descida do material. Na Figura 3.8 temos uma imagem de um britador cônico.

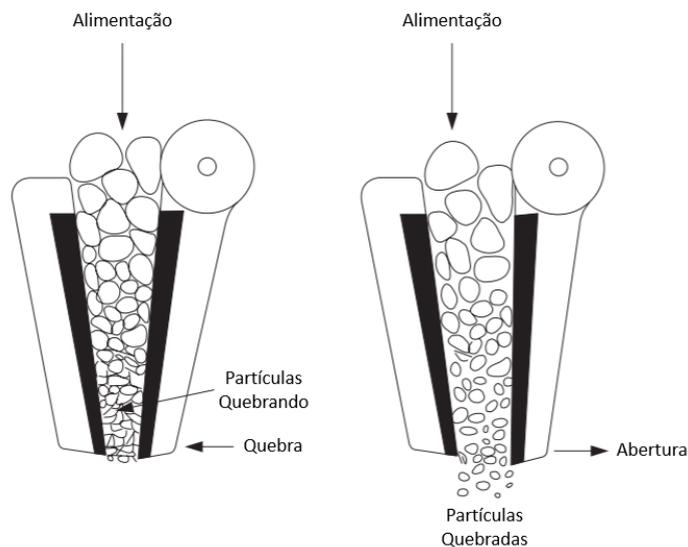


Figura 3.7: Transportador por correia.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

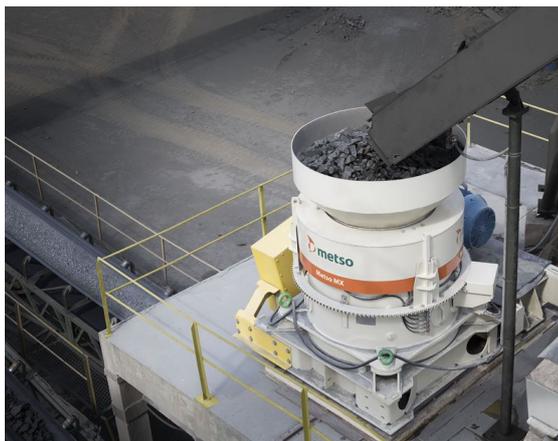


Figura 3.8: Britador cônico.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

As peneiras vibratórias são um dos principais equipamentos responsáveis por classificar o minério por tamanho, garantindo a especificação granulométrica do produto final ou da alimentação de processos a jusante. São constituídas de uma ou mais estruturas de suporte para as telas, conhecidos como *decks*, montados um acima do outro, com cada *deck* tendo uma abertura de tela menor que o outro acima dele. A montagem pode ser horizontal ou inclinada, considerando a alimentação para a descarga, conforme Wills (2006). Na Figura 3.9 temos uma peneira vibratória inclinada.



Figura 3.9: Peneira Vibratória Inclinada.

Fonte: Santos *et al.* (2020).

As peneiras vibratórias inclinadas são um dos tipos de peneiras mais aplicadas na indústria da mineração. São constituídas basicamente por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório, e um, dois ou três suportes para as telas (*decks*), conforme exemplificado na Figura 3.10. Tem inclinações variando entre 15° e 35° e transportam o material do leito a uma velocidade de 18 a 36 m/min, dependendo da inclinação. Tem um movimento vibratório circular ou elíptico, ilustrado na Figura 3.11. Este movimento faz com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar

para a tela várias vezes. Este movimento vibratório causa também a estratificação do conjunto de partículas sobre a tela, de modo que as partículas maiores fiquem por cima e as partículas menores por baixo (CHAVES e PERES, 2003).

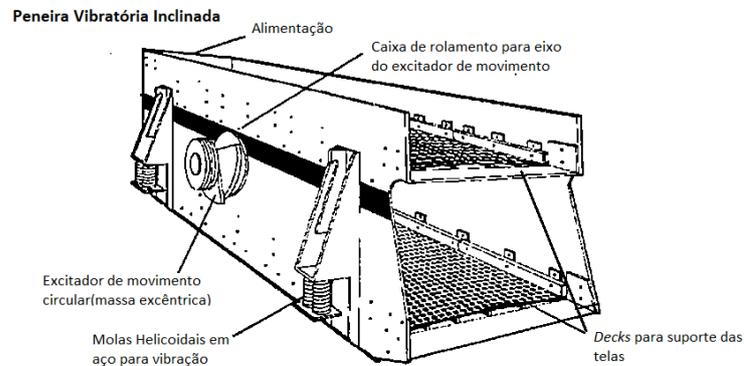


Figura 3.10: Peneira Vibratória Inclinada de Dois Decks.

Fonte: Wills (2006).

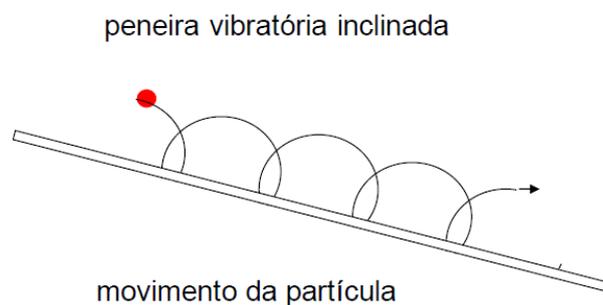


Figura 3.11: Trajetória de uma Partícula Submetida ao Movimento Vibratório.

Fonte: Galery (2007).

3.1.2. Processo de peneiramento

De acordo com King (2001), é sempre necessário controlar as características de tamanho de um material particular que é alimentado em equipamentos de processo que separam componentes mineralógicos. Não é possível dentro de um ambiente de produção exercer controle preciso sobre o tamanho de todas as partículas em uma população e, na maioria dos casos, equipamentos de classificação por tamanho são projetados para dividir a alimentação de um material particular em uma porção grossa (*oversize*) e outra fina (*undersize*). Ocasionalmente um ou dois fluxos de produto de tamanho intermediário podem ser produzidos por uma peneira de dois ou três *decks*. Provavelmente a aplicação mais comum de uma classificação por tamanho via peneiramento é o seu uso para evitar materiais grossos (acima da especificação de

tamanho) deixando um circuito de cominuição. Os materiais grossos, ou *oversize*, é recirculado para um estágio de cominuição para mais uma redução de tamanho antes de seguir para etapas subsequentes do processo.

O peneiramento tem aplicabilidade dentro de uma faixa extensa de tamanho das partículas, desde maticões de 18" (0,46 m) a talco ($130 \mu m$), embora a eficiência diminui rapidamente para processar materiais mais finos. Sendo assim, o peneiramento é favorecido em aplicações de classificação grosseira e os hidrociclones predominam na extremidade mais fina da escala (WILLS, 2006). O peneiramento é dito "a seco" quando é feito com o material na sua umidade natural (que não pode, entretanto, ser muito elevada) e dito a úmido ou via úmida quando o material é alimentado na forma de uma polpa ou recebe água adicional através de *sprays* convenientemente dispostos sobre os *decks* do peneiramento (CHAVES e PERES, 2003).

O processo de peneiramento pode ser dividido em dois subprocessos, estratificação e passagem conforme Figura 3.12. No processo de estratificação, as frações finas mudam de posição vertical com as frações grossas que estão localizadas em camadas inferiores (DAVOODI *et al.*, 2019). Deslocando as frações mais finas para a camada mais inferior do leito de material sobre a peneira, dar-se a chance de se apresentarem à tela e passarem através dela, constituindo o subprocesso de passagem ou peneiramento propriamente dito.

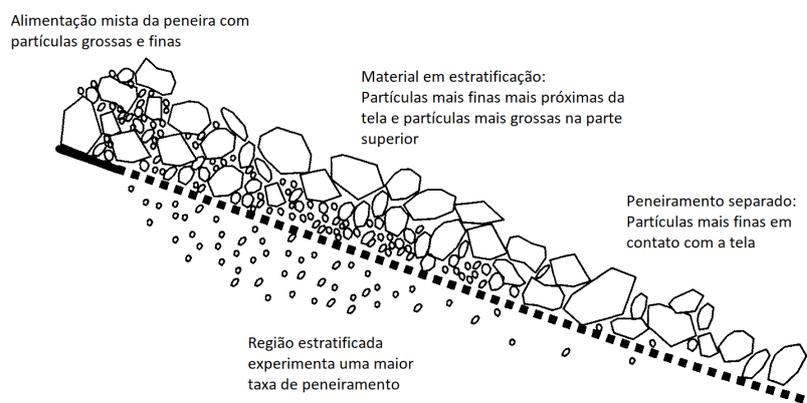


Figura 3.12: Processos do Peneiramento - Estratificação e Passagem.

Fonte: Wills (2006).

Na sua forma mais simples, a peneira é uma superfície tendo muitas aberturas, ou buracos, geralmente com dimensões uniformes. Partículas apresentadas a essa superfície ou vão passar através dela ou vão ficar retidas, de acordo com se as partículas são menores ou maiores que as dimensões da abertura. A eficiência do peneiramento é determinada pelo grau de perfeição da separação do material em frações de tamanho acima ou abaixo do tamanho da abertura.

Não existe um método universalmente aceito para se definir a eficiência de uma peneira e uma série de métodos são empregados, (WILLS, 2006). O critério mais comum para eficiência de peneiramento são aqueles baseados na recuperação do material de um dado tamanho, ou na

massa de material fora da especificação encontrada no *oversize* ou *undersize*.

Wills (2006) discute sobre eficiência de peneiramento. Vamos considerar a peneira da Figura 3.13 com a alimentação sendo $F \text{ th}^{-1}$. Dois produtos são gerados. Um produto grosseiro sendo $C \text{ th}^{-1}$, o *oversize* da peneira, e um produto fino sendo $U \text{ th}^{-1}$, o *undersize* que passa através da peneira, sendo f a fração de material acima do tamanho de corte na alimentação; c é a fração de material acima do tamanho de corte no *overflow*; e u é a fração de material acima do tamanho de corte no *underflow*. Os valores de f, c e u podem ser determinados peneirando uma amostra representativa de cada uma das frações em uma peneira de laboratório com o mesmo tamanho de abertura da tela e assumindo que esta esteja 100% eficiente.

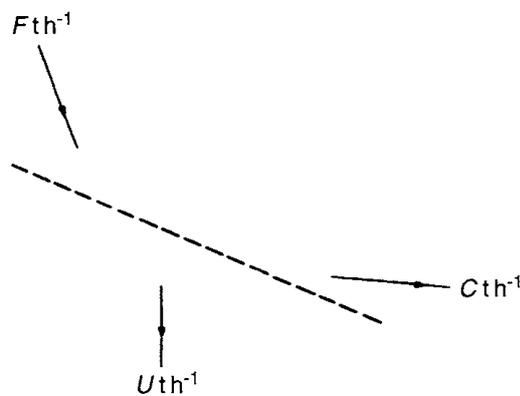


Figura 3.13: Balanço de Massa da Peneira.

Fonte: Wills (2006).

O balanço de massa da peneira é:

$$F = C + U$$

O balanço de massa do *overflow* é:

$$F_f = Cc + Uu$$

E o balanço de massa do *underflow* é:

$$F(1 - f) = C(1 - c) + U(1 - u)$$

Portanto

$$\frac{C}{F} = \frac{f - u}{c - u}$$

E

$$\frac{U}{F} = \frac{C - F}{c - u}$$

A recuperação do material *oversize* no *overflow* da peneira é:

$$= \frac{Cc}{Ff} = \frac{c(f-u)}{f(c-u)}$$

e a correspondente recuperação do material *undersize* no *underflow* da peneira é dado pelas Equações 3.1 e 3.2:

$$= \frac{U(1-u)}{F(1-f)} \quad (3.1)$$

$$= \frac{(1-u)(c-f)}{(1-f)(c-u)} \quad (3.2)$$

As equações 3.1 e 3.2 medem a eficácia da peneira em separar o material grosso do *underflow* e o material fino do *overflow*.

Uma eficácia combinada, ou eficiência global, E, é então obtida pela multiplicação das duas equações, como mostra a Equação 3.3.

$$E = \frac{c(f-u)(1-u)(c-f)}{f(c-u)^2(1-f)} \quad (3.3)$$

Para peneiras as quais o tamanho da abertura da tela e o tamanho do tamanho de corte são iguais (sendo assim não existem aberturas quebradas ou deformadas), a quantidade de material grosso no *underflow* é usualmente muito baixa, podendo ser desprezada. Uma equação simplificada é então gerada assumindo que $u=0$ para a recuperação de finos e a eficiência geral:

$$E = \frac{c-f}{c(1-f)}$$

Essa fórmula é muito utilizada e implica que a recuperação do material grosso no *underflow* é 100%.

Em se tratando de fatores que afetam o desempenho das peneiras, King (2001) apresenta modelos baseados na capacidade da peneira, isto é, sua habilidade em lidar com determinada tonelagem de alimentação de material. Sua capacidade básica, I_u , é determinada sob condições padrão de operação e material. Na operação real, teremos diversas variáveis operacionais que modificam a capacidade real da peneira. Essas modificações são representadas por fatores de capacidade, que podem variar no tempo, e multiplicam a capacidade básica da peneira para gerar a capacidade real sob condições encontradas na planta.

$$\text{Capacidade nominal de alimentação da peneira} = I_u K_1 K_2 K_3 \dots$$

onde K_i são os fatores de capacidade para desvios das condições padrão no qual foi determinada a capacidade básica.

Com foco nas características do material de alimentação, teremos como principais fatores a própria distribuição granulométrica, a umidade da superfície e a densidade. Uma maior

concentração de massa com tamanhos mais próximo ao tamanho de corte dificulta o peneiramento podendo afetar seu desempenho. Ao contrário disso, uma grande proporção de material que é consideravelmente menor que a malha da peneira será processado mais facilmente.

A umidade da superfície do material tende a fazer as partículas aderirem e a capacidade da peneira é reduzida. Isso acontece, pois, as partículas menores são arrastadas para o *overflow* ou tem menores chance de passagem por se apresentarem menos vezes à tela. Essa redução pode chegar à ordem de 40% conforme Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Impactos da umidade do material

Condição de alimentação	K_i
Material molhado, lamacento ou pegajoso	0,6
Superfície úmida e material de pilhas com até 15% de umidade	0,68
Material britado seco	0,8
Material seco natural	1,0

Fonte: Adaptado de King (2001)

Por último temos a densidade aparente, que também afeta dinamicamente a capacidade. Materiais mais densos são peneirados mais facilmente que materiais mais leves. O fator de capacidade considera esse efeito quando a densidade difere do padrão de 1600 kg/m^3 .

$$K_d = \frac{B}{1600}$$

em que B é a densidade do material no momento.

3.2. Controle *Fuzzy*

3.2.1. Introdução à lógica *Fuzzy*

A teoria da lógica *fuzzy* ou sistemas *fuzzy* abriu muitas possibilidades em diversas áreas de conhecimento devido sua capacidade de gerar soluções em meio às incertezas, imprecisões e ambiguidade das informações. Segundo Ross (2009), um dos principais benefícios da teoria de sistemas *fuzzy* é aproximar o comportamento de sistemas onde funções analíticas ou relações numéricas não existem. Portanto, apresentam grande potencial para entender sistemas que são desprovidos de formulações analíticas. Também, de forma alternativa, a teoria de sistemas *fuzzy* tem utilidade na avaliação de sistemas convencionais e menos complexos. Por exemplo, em problemas que soluções exatas não são necessárias e uma solução aproximada, mas rápida, pode ser satisfatória quando se admite certo grau de imprecisão. Sendo assim, em muitos problemas de engenharia, (ROSS, 2009) sugere que se deve balancear a precisão que buscamos com a incerteza que existe.

Lógica *fuzzy* tem uma vasta variedade de aplicações, dentre elas, métodos de classificação, reconhecimento de padrões, sistemas de controle, simulação de sistemas não lineares, processos de tomada de decisão, análise de séries temporais, estimação e otimização. Para a pesquisa em questão, a abordagem será em sistemas de controle, o chamado controlador *fuzzy*.

Nas próximas seções serão abordados alguns fundamentos da lógica *fuzzy*, que são base para desenvolvimento de controladores *fuzzy*. Em seguida mais detalhes do controlador *fuzzy* em si serão apresentados.

3.2.2. Conceitos básicos de conjuntos *Fuzzy*

Para falarmos de conjuntos *fuzzy*, primeiramente vamos descrever o conceito de conjuntos clássicos. Conforme Ross (2009), o universo de discurso é o universo de todas as informações disponíveis em um dado problema. Como exemplo, poderemos considerar o universo de discurso X representando a faixa de temperatura de uma sala de cinema entre 0°C e 35°C. Uma vez definido o universo de discurso é possível definir certos eventos ou propriedades nesse espaço amostral, criando conjuntos. Para o caso em questão vamos definir um conjunto clássico Temperatura Agradável que chamamos de A, sendo composto pelos elementos de 19°C a 24°C. Um elemento x em um universo de discurso X ou é membro de um determinado conjunto ou não é. Essa relação binária de pertinência a um conjunto clássico pode ser representada matematicamente pela função abaixo:

$$X_A(x) = \begin{cases} 1, & \in A \\ 0, & \notin A, \end{cases} \quad (3.4)$$

onde o símbolo $X_A(x)$ fornece uma clara indicação de pertinência do elemento x no conjunto A, podendo assumir apenas dois valores: 0 (não pertence ao conjunto A) e 1 (pertence ao conjunto A). Na Figura 3.14 temos a representação gráfica do conjunto A no referido universo de discurso X

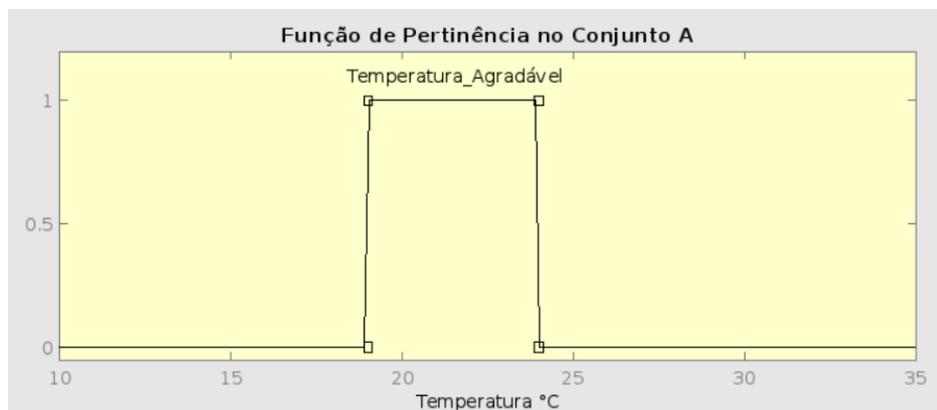


Figura 3.14: Função de pertinência do conjunto *fuzzy* A.

Fonte: O autor.

Para os conjuntos *fuzzy*, o conceito foi estendido para suportar vários graus de pertinência dentro do intervalo contínuo $[0, 1]$, onde os valores 0 e 1 significam nenhuma pertinência ou pertinência completa, respectivamente. Sendo isso também observado nos conjuntos clássicos, mas com a diferença que um conjunto *fuzzy* pode assumir um infinito número de valores entre 0 e 1 representando vários graus de pertinência de um determinado elemento x em algum conjunto do universo de discurso. Também mencionado em Ross (2009), conjuntos em um universo de discurso X que podem acomodar diversos graus de pertinência são denominados de conjuntos *fuzzy*. Seguindo com o exemplo citado, vamos considerar agora um conjunto *fuzzy* B para representar Temperatura Agradável. A Figura 3.15 ilustra um possível conjunto *fuzzy* para essa representação:

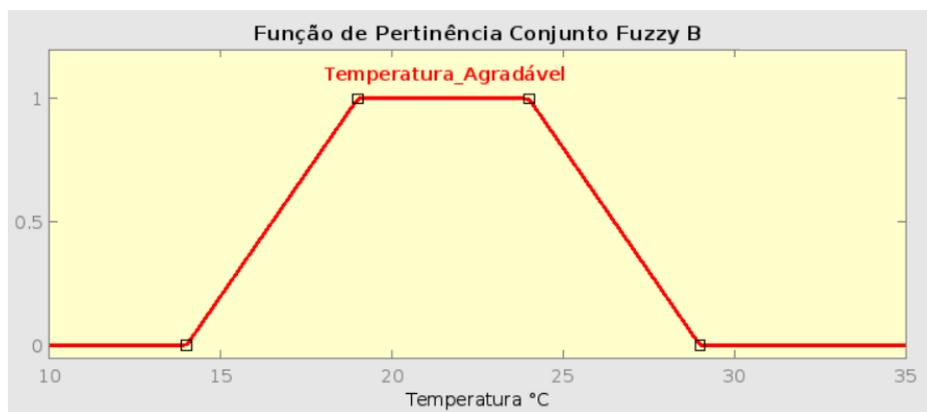


Figura 3.15: Função de pertinência do conjunto *fuzzy* B .

Fonte: O autor.

Podemos perceber que já não mais temos apenas dois valores de pertinência, 0 ou 1, mas sim valores dentro do intervalo $[0, 1]$. Em se tratando de conjuntos *fuzzy*, podemos ter um número infinito de funções de pertinência ao contrário do conjunto clássico. Isso confere à lógica *fuzzy* uma grande flexibilidade de ajuste para maximizar a eficiência de cada aplicação. Sendo assim, a representação matemática de um conjunto *fuzzy* pode ser dada conforme abaixo:

$$\mu_A(x) \in [0, 1]$$

Portanto, $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência de um elemento x em um conjunto *fuzzy* A . Sendo um valor no intervalo unitário que mede o grau que um elemento x pertence ao conjunto *fuzzy* A . Equivalentemente, $\mu_A(x) = \text{grau que } x \in A$. As Figuras 3.16 e 3.17 apresentam outros tipos de funções de pertinência também utilizadas nas diversas aplicações *fuzzy* além da função trapezoidal apresentada.

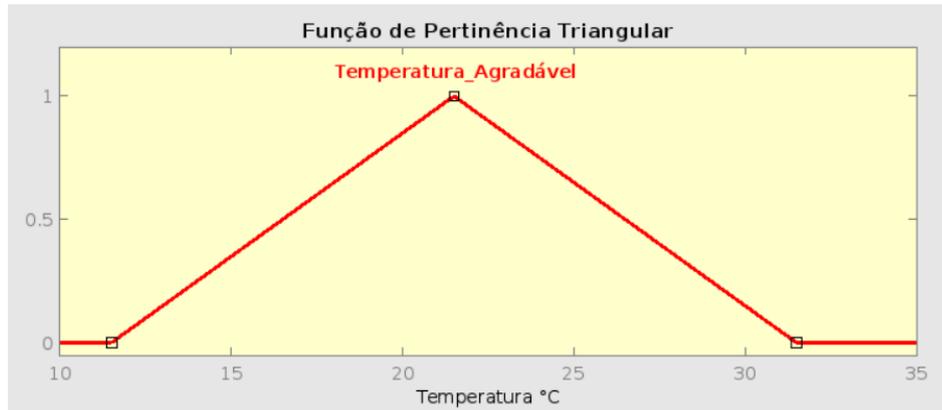


Figura 3.16: Função de pertinência do conjunto *fuzzy* B.

Fonte: O autor.

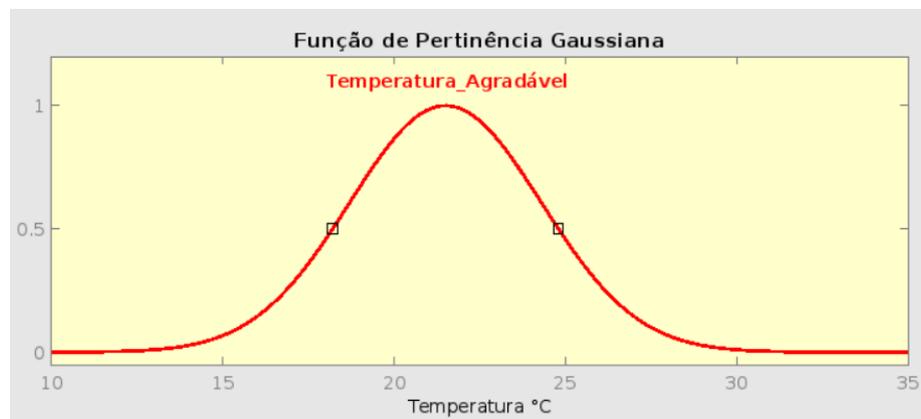


Figura 3.17: Função de pertinência do conjunto *fuzzy* B.

Fonte: O autor.

3.2.3. Controlador *Fuzzy*

Na abordagem desse assunto é comumente utilizado comparações e associações com controladores convencionais, baseados principalmente na teoria de controle clássico. Sendo assim, diante de um problema de controle, os seguintes passos são seguidos dentro das técnicas de controle convencionais segundo Passino *et al.* (1998):

- Definição dos requisitos de projeto;
- Desenvolvimento do modelo matemático da planta a ser controlada;
- Utilização do modelo matemático, ou uma versão simplificada dele, para projeto do controlador, via, por exemplo, técnicas de controle clássico a partir de um modelo linear;
- Utilização do modelo matemático do sistema em malha fechada em análises matemáticas ou baseadas em simulação para estudo do seu desempenho (com possibilidade de ajustes no projeto do controlador);

- Implementação do controlador e avaliação de seu desempenho em malha fechada no sistema real (também com possibilidade de ajustes no controlador).

O procedimento acima é concluído quando demonstrado que o comportamento do controle atingiu seus objetivos de projeto.

Já contrastando o controlador convencional com o controlador fuzzy, o primeiro tem abordagens como, por exemplo, proporcional-integral-derivativo (PID), compensadores por avanço ou atraso de fase ou controle por realimentação de estados, onde o foco é a modelagem e o uso deste modelo para construir um controlador descrito por equações diferenciais. O segundo, por sua vez, tem seu foco na obtenção do entendimento intuitivo de como melhor controlar o processo, e então carregar essas informações direto no controlador conforme bem exposto por Passino *et al.* (1998). Enquanto um tem como base para o projeto análises matemáticas baseadas em modelo, o outro tem sua estrutura desenhada para tornar possível a tradução do conhecimento intuitivo de controle em uma base de regras a ser utilizada pelo controlador fuzzy. Sendo assim, ao passo que equações diferenciais são a linguagem para o controle convencional, heurísticas e “regras” sobre como controlar a planta são a linguagem do controle fuzzy, tornando-o uma metodologia formal para representar, manipular e implementar o conhecimento heurístico humano sobre como controlar um sistema.

Na Figura 3.18 temos um diagrama de blocos básico de um sistema de controle convencional em malha fechada,

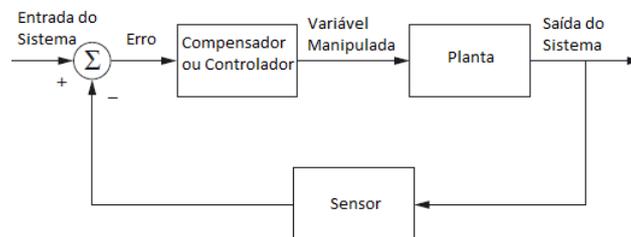


Figura 3.18: Diagrama de Blocos Padrão Sistema Controle Convencional.

Fonte: Ross (2009).

no qual o controlador pode ser um PID ou mesmo um compensador por atraso ou avanço de fase. Segundo Passino *et al.* (1998), mais de 90% dos controladores em operação são controladores PID (ou pelo menos uma forma de um controlador PID como, por exemplo, um controlador PI). Sendo assim são frequentemente utilizados para comparações com controladores fuzzy.

Para auxiliar o entendimento, o sistema da Figura 3.19 poderia representar uma malha de controle de nível de câmara de um britador cônico, onde teríamos as seguintes relações:

- Entrada do Sistema: referência de setpoint de nível de câmara;
- Sensor: o instrumento utilizado para medição de nível de câmara, como por exemplo um sensor a laser para medição de distância;

- Erro: a diferença algébrica entre o set point e valor atual da variável de processo (medida pelo elemento sensor);
- Compensador ou Controlador: controlador proporcional – integral responsável por processar a entrada (erro) e definir a saída (entrada para a planta) de forma que o processo seja controlado conforme os requisitos definidos;
- Variável Manipulada: saída do controlador e entrada da planta;
- Planta: processo a ser controlado, que nesse caso é um britador cônico;
- Saída do Sistema: variável de processo a ser controlada e medida pelo sensor.

Em se tratando de controladores fuzzy, teríamos, em muitas situações, basicamente a mesma estrutura acima com a principal alteração sendo o bloco do controlador. Esse, ao invés de ser um algoritmo PID ou suas variações, que são baseados em equações diferenciais ou a diferenças, passa a ser um controlador fuzzy conforme demonstrado na Figura 3.19.

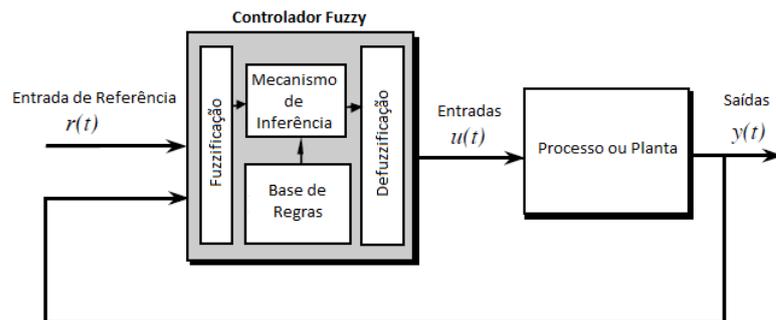


Figura 3.19: Arquitetura Controlador Fuzzy.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Sendo esse controlador composto por quatro componentes principais conforme relatado em Passino *et al.* (1998):

- Base de Regras: abriga o conhecimento intuitivo, na forma de um conjunto de regras, de como melhor controlar o processo;
- Mecanismo de inferência: avalia quais as regras de controle são relevantes no instante atual e decide qual será a entrada fuzzy para o processo;
- Fuzzificação: modifica as entradas escalares para que elas possam ser interpretadas e comparadas com as regras dentro da base de regras;
- Defuzzificação: converte as conclusões encontradas pelo mecanismo de inferência em entrada(s) para o processo.

Portanto, o controlador fuzzy também opera em um sistema de malha fechada em tempo real. Ele coleta os dados de saída da planta $y(t)$, compara com a referência de entrada $r(t)$, e define qual deve ser a entrada $u(t)$ da planta que assegure os objetivos de desempenho definidos no projeto. Objetivos esses que geralmente são os mesmos quando estamos abordando o problema via controle convencional. E também, quando falamos de limitações e dificuldades impostas pela planta, como, por exemplo, estabilidade, essas também valem tanto para controle convencional quanto para controle fuzzy.

Conforme já citado, o assunto é frequentemente abordado em meio a comparações e relações com o controle convencional. Mas uma pergunta que fica é: quais as condições mais favoráveis à sua aplicação? Segundo Passino *et al.* (1998), Ross (2009) e Reznik (1997) essas são as principais motivações:

- Em processos onde existe grande dificuldade de obtenção de modelos matemáticos da planta. Controladores *fuzzy* são capazes de implementar o conhecimento heurístico humano em uma base de regras sem conhecer de fato o modelo matemático da planta;
- Em processos onde há forte presença de não linearidades e aproximações lineares não são viáveis. Controladores *fuzzy* lidam melhor com as questões de não-linearidades;
- Quando se busca uma solução aproximada, mas não exatamente a solução ótima. Controladores *fuzzy*, muitas vezes, são um meio mais rápido para se implementar controles em sistemas onde uma solução ótima e altamente precisa não é necessário;
- Quando existe um corpo de conhecimento sobre como controlar o processo (vindo de um operador ou mesmo um engenheiro) que pode ser expresso em termos de regras linguísticas. Controladores *fuzzy* demandam um conhecimento humano heurístico de como controlar o processo.
- Em sistemas MIMO ou MISO, devido à grande dificuldade de abordar esses tipos de problemas via controle convencional. Controladores *fuzzy* lidam melhor com sistemas multivariáveis;
- Em problemas com alta presença de incertezas e vagueza nas informações. A lógica *fuzzy*, base do controlador *fuzzy*, tem em seus fundamentos a capacidade de lidar com problemas onde há presença de incerteza e vagueza nas informações;

Nas próximas subseções descreveremos mais detalhes sobre cada um dos componentes do controlador *fuzzy* apresentado na Figura 3 19, tendo como referência Passino *et al.* (1998).

3.2.3.1. Fuzzificação

O processo de *fuzzificação* é o ato de obter um valor de uma variável de entrada e encontrar os valores numéricos da(s) funções de pertinência que são definidas para aquela variável.

Vamos considerar, para efeito de esclarecimento dos componentes, um controlador *fuzzy* de duas entradas e uma saída de um problema de controle de equilibrar um pêndulo invertido em um carrinho, como mostrado na Figura 3.20.

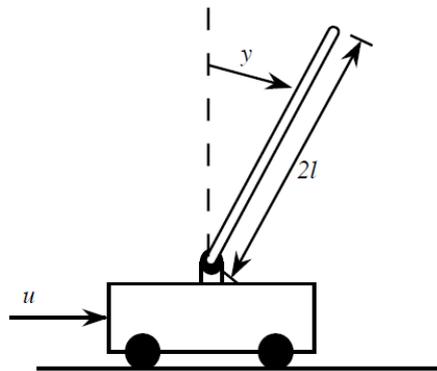


Figura 3.20: Pêndulo Invertido em Carrinho.
Fonte: Passino *et al.* (1998).

As entradas definidas são

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

e

$$\frac{d}{dt}e(t)$$

as quais serão utilizadas para basear as decisões. Como saída do controlador, variável controlada, teremos a força que move o carrinho, $u(t)$. A variável de processo, $y(t)$, é o ângulo que o pêndulo faz com o eixo vertical, em radianos. A referência a ser utilizada será $r=0$, isto é, o pêndulo na posição vertical. Na Figura 3.21 temos o sistema de controle *fuzzy* para o pêndulo invertido, considerando as entradas e saídas escolhidas.

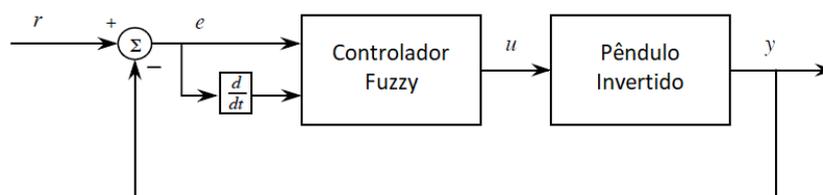


Figura 3.21: Controlador *Fuzzy* Pêndulo Invertido.
Fonte: Passino *et al.* (1998).

Então, para cada instante de tempo, o processo de *fuzzificação* vai ler as entradas e obter os valores numéricos das funções de pertinência definidas para aquelas entradas. Na Figura

3.22 temos as funções de pertinência definidas para as duas entradas, $e(t)$ e $\frac{d}{dt}e(t)$, que variam no tempo e tem seus valores definidos em rad e rad/sec respectivamente.

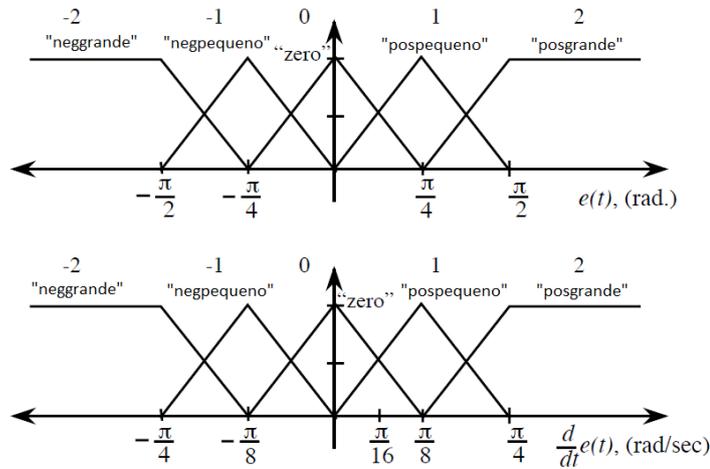


Figura 3.22: Funções Pertinência Entrada.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Então, por exemplo, em determinado instante em que $e(t) = \frac{\pi}{4}$ e $\frac{d}{dt}e(t) = \frac{\pi}{16}$, o processo de *fuzzificação* resultará nas seguintes saídas:

Para $e(t)$:

$$\mu_{neggrande}(e(t)) = 0$$

$$\mu_{negpequeno}(e(t)) = 0$$

$$\mu_{zero}(e(t)) = 0$$

$$\mu_{pospequeno}(e(t)) = 1$$

$$\mu_{posgrande}(e(t)) = 0$$

Para $\frac{d}{dt}e(t)$:

$$\mu_{neggrande}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0$$

$$\mu_{negpequeno}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0$$

$$\mu_{zero}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0,5$$

$$\mu_{pospequeno}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0,5$$

$$\mu_{posgrande}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0$$

Em resumo, para o exemplo dado, a cada instante o processo de fuzzificação terá duas entradas e dez saídas, sendo as saídas o valor correspondente à aplicação de cada função de pertinência à sua entrada em questão, isto é, no seu devido universo de discurso.

3.2.3.2. Base de regras

É esse componente do controlador que torna possível capturar o conhecimento heurístico de como melhor controlar o processo através de uma linguagem natural, uma descrição “linguística”. Com isso, é possível estabelecer uma série de regras que serão processadas pelo mecanismo de inferência para gerar as funções de pertinência de saída. Para suportar essa etapa, precisamos das definições das variáveis linguísticas e dos valores linguísticos. As variáveis linguísticas descrevem cada entrada variante no tempo do controlador *fuzzy*, sendo nesse caso:

“erro” descreve $e(t)$
“variação” no erro descreve $\frac{d}{dt}e(t)$
“força” descreve $u(t)$

As variáveis linguísticas assumem valores linguísticos, que mudam dinamicamente. Para o exemplo em questão as variáveis linguísticas “erro”, “variação no erro” e “força” podem assumir os seguintes valores:

“neggrande”
“negpequeno”
“zero”
“pospequeno”
“posgrande”

Desse modo, as variáveis linguísticas e os valores linguísticos fornecem uma linguagem para o especialista expressar suas ideias sobre o processo de tomada de decisão do controle no contexto de uma estrutura estabelecida pela escolha das entradas e saídas do controlador. As declarações abaixo são exemplos que descrevem diferentes configurações ou estados do pêndulo invertido, descrevendo sua dinâmica linguisticamente:

- A declaração “erro é posgrande” representa uma situação em que o pêndulo está em um ângulo significativamente à esquerda do eixo vertical;
- A declaração “erro é negpequeno” representa uma situação em que o pêndulo está levemente a direita do eixo vertical, mas não tão perto ao eixo vertical para justificar quantificá-lo como “zero”;
- A declaração “erro é zero” representa uma situação em que o pêndulo está bem próximo do eixo vertical (uma quantificação linguística não é precisa, portanto é aceitável qualquer valor em torno de $e(t) = 0$);

- A declaração “erro é posgrande **E** variação do erro é pospequeno” representa uma situação em que o pêndulo está significativamente para a esquerda do eixo vertical e o pêndulo está se afastando da posição vertical (perceba que nesse caso o pêndulo está se movendo no sentido anti-horário);
- A declaração “erro é negpequeno **E** variação do erro é pospequeno” representa uma situação em que o pêndulo está levemente para a direita do eixo vertical e o pêndulo está se movendo em direção da posição vertical (perceba que nesse caso o pêndulo também está se movendo no sentido anti-horário).

Em seguida, com o conhecimento da quantificação linguística serão especificados um conjunto de regras (uma base de regras) que capturam o conhecimento do especialista sobre como controlar a planta. Para o problema do pêndulo, com duas variáveis de entrada e cinco valores linguísticos para cada uma delas, podem existir no máximo $5^2 = 25$ regras possíveis. As regras linguísticas são apenas ideia abstratas sobre como atingir um bom controle que pode significar coisas um pouco diferentes para diferentes pessoas. Elas são, no entanto, um nível de abstração com o qual humanos estão geralmente confortáveis em especificar como controlar um processo. A forma geral de uma regra linguística é:

Se premissa **Então** resultado

As premissas são associadas com as entradas do controlador. Os resultados são associados com as saídas do controlador. Cada premissa pode ser composta da conjunção de vários termos. Para exemplificar, abaixo temos 3 regras criadas e descritas conforme os três estados do pêndulo na Figura 3.23.

1. **Se** erro é neggrande **E** variação no erro é neggrande **Então** força é posgrande

Esta regra quantifica a situação na qual o pêndulo tem um grande ângulo positivo e está se movendo rapidamente no sentido horário; portanto está claro que devemos aplicar uma força grande positiva (para a direita) para que possamos tentar mover o pêndulo para a correta direção.

2. **Se** erro é zero **E** variação no erro é pospequeno **Então** força é negpequeno

Esta regra quantifica a situação na qual o pêndulo tem aproximadamente um ângulo zero com a vertical e está movendo na direção anti-horária; portanto devemos aplicar uma força negativa pequena (para a esquerda) para contrariar o movimento para que se mova em direção ao ângulo zero (uma força positiva pode resultar em um *overshooting* da posição desejada do pêndulo).

3. **Se** erro é posgrande **E** variação no erro é negpequeno **Então** força é negpequeno

Esta regra quantifica a situação na qual o pêndulo está muito a esquerda da vertical e está se movendo no sentido horário; portanto devemos aplicar pequena força negativa para

auxiliar o movimento, mas não uma força grande pois o pêndulo já está se movendo na direção correta.

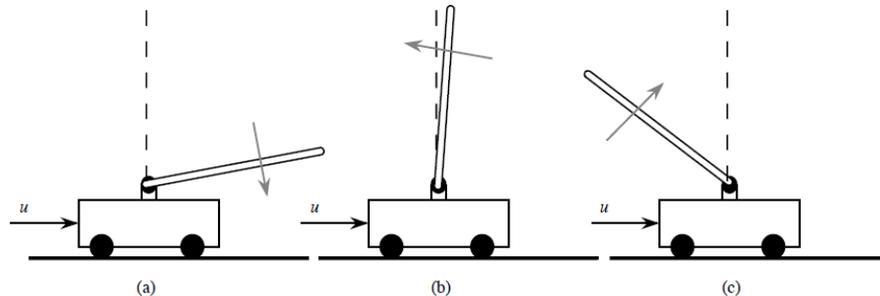


Figura 3.23: Pêndulo Invertido em Vários Estados.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

3.2.3.3. Mecanismo de inferência

O mecanismo de inferência, em geral e em termos básicos, envolve duas etapas:

1. As premissas de todas as regras são comparadas com as entradas do controlador para determinar quais regras se aplicam à situação atual. Esse processo, conhecido como *matching*, envolve determinar o grau de certeza que cada regra se aplica e, normalmente, é levado mais em consideração as recomendações de regras que apresentam maior grau de certeza para aplicação na situação atual;
2. As conclusões (quais ações de controle tomar) são determinadas utilizando as regras que foram determinadas para aplicação no instante atual. A conclusão é caracterizada por um conjunto ou vários conjuntos *fuzzy* que representam o grau de certeza que a entrada para a planta deve assumir.

Como o foco na etapa 1, é preciso quantificar o significado de todas as regras que são compostas por vários termos, sendo que cada termo envolve uma entrada do controlador *fuzzy*. Para exemplificação utilizaremos a regra abaixo com dois termos linguísticos na premissa, representados na Figura 3.24 supondo as entradas $e(t) = \frac{\pi}{8}$ e $\frac{d}{dt}e(t) = \frac{\pi}{32}$. Portanto é necessário quantificar a premissa linguística “erro é zero E variação no erro é possmall”. Sendo assim, o objetivo se torna como quantificar a operação lógica “E” que combina o significado de dois termos linguísticos.

Se erro é zero **E** variação no erro é possmall **Então** força é negsmall

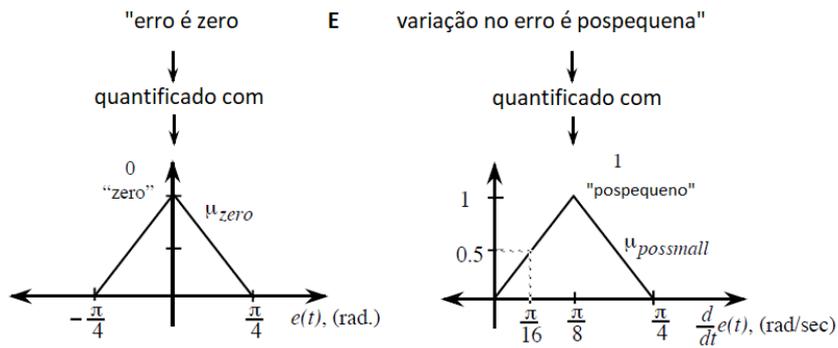


Figura 3.24: Funções Pertinência Termos Premissa.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Portanto, para as entradas informadas obteremos $\mu_{zero}(e(t))$ e $\mu_{pospequeno} \frac{d}{dt}e(t)$, que representam o grau no qual cada valor linguístico adequadamente descreve o valor atual de $e(t)$ e $\frac{d}{dt}e(t)$ respectivamente. Então teremos:

$$\mu_{zero}(e(t)) = 0,5$$

E

$$\mu_{pospequeno} \left(\frac{d}{dt}e(t) \right) = 0,25$$

Substituindo esses valores na premissa teremos:

$$0,5 \text{ E } 0,25$$

Abaixo temos duas formas de definição da operação lógica acima:

- Operação de mínimo: define $u_{premissa} = \min \{0,5; 0,25\} = 0,25$, que é, utilizando o mínimo dos dois valores de pertinência;
- Operação de produto: define $u_{premissa} = (0,5)(0,25) = 0,125$, que é, utilizando o produto dos dois valores de pertinência.

Portanto, $u_{premissa}$ deve ser encontrado para todas as regras ativadas e será definido como um valor entre 0 e 1.

Determinar a aplicabilidade de cada regra é chamado de *matching*. Uma regra está “ativada para um instante t” se a função de pertinência da premissa $u_{premissa} > 0$. Portanto, o mecanismo de inferência busca determinar quais regras estão ativadas para descobrir quais são as regras relevantes para a situação atual. Em seguida descreveremos a etapa de inferência: determinando as conclusões. Vamos supor agora as seguintes entradas:

$$e(t) = 0$$

E

$$\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0,294$$

Para as entradas em questão, apenas os termos da premissa abaixo tem valores diferentes de zero, estando então todas as outras funções de pertinência desativadas conforme visto na Figura 3.25.

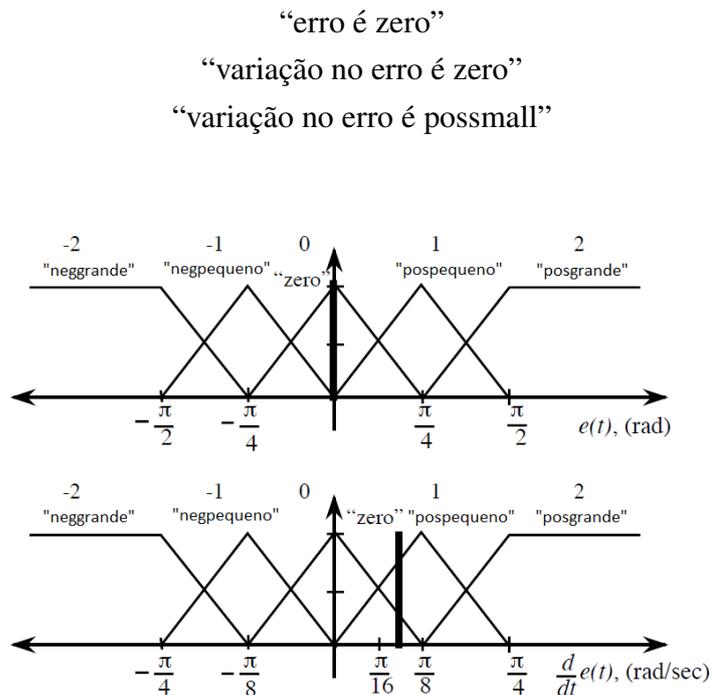


Figura 3.25: Funções Pertinência Entrada com Valores de Entrada.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Portanto teremos apenas as duas regras abaixo ativadas.

1. **Se** erro é zero **E** variação no erro é zero **Então** força é zero
2. **Se** erro é zero **E** variação no erro é possmall **Então** força é negsmall

Será considerado agora as recomendações ou conclusões de cada regra independentemente. Em seguida todas as recomendações de todas as regras serão combinadas para determinar a saída, que nesse caso é a força de entrada para o carrinho.

Para encontrar a recomendação da primeira regra já sabemos que $u_{premissa(1)} = \min\{0,25; 1\} = 0,25$ utilizando a operação de mínimo. Isto significa estar 0,25 certo que esta regra se aplica para a situação atual. Para a regra 1 o consequente é “força é zero” (que faz sentido pois o pêndulo está equilibrado). Na Figura 3.26 (a) temos a função de pertinência desse consequente e a Figura 3.26 (b) apresenta a função de pertinência para esse consequente, denotada por

$$u_{(1)} = \min \{0, 25; \mu_{zero}(u)\}$$

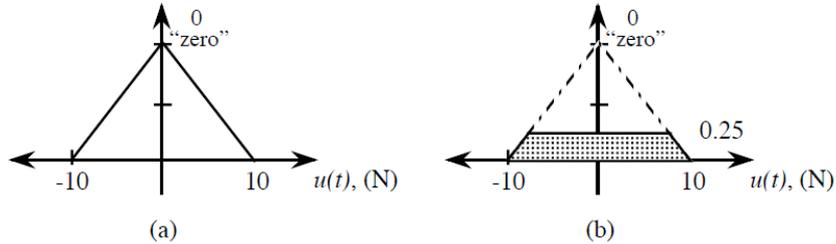


Figura 3.26: a) Função Pertinência Consequente e b) Conjunto Fuzzy Implícito.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Essa função de pertinência define o “conjunto *fuzzy* implícito” para a regra 1, isto é, a conclusão inferida pela regra 1. A justificativa para o uso do operador mínimo para representar a implicação é que não podemos estar mais certos sobre nosso consequente do que nossa premissa. É possível também utilizar o operador produto para representar a implicação.

Observe que a função de pertinência $\mu_{(1)}(u)$ é uma função de u e que o operador de mínimo vai geralmente “cortar o topo” da função de pertinência $\mu_{(zero)}(u)$ para produzir $\mu_{(1)}(u)$. Para diferentes valores de $e(t)$ e $\frac{d}{dt}e(t)$ existirão diferentes valores da certeza da premissa $\mu_{premise(1)}(e(t), \frac{d}{dt}e(t))$ para a regra 1 e, portanto, diferentes funções $\mu_{(1)}(u)$ obtidas, isto é, irá cortar o topo em pontos diferentes.

Podemos concluir que, em geral, $\mu_{(1)}(u)$ é uma função variante no tempo que quantifica o grau de certeza que a regra 1 determina que a força de entrada u deve assumir certos valores. A função de pertinência $\mu_{(1)}(u)$ quantifica a conclusão alcançada por apenas a regra 1 e para os valores atuais de $e(t)$ e $\frac{d}{dt}e(t)$. É importante ser capaz de imaginar como a forma do conjunto *fuzzy* implícito muda à medida que o grau de certeza da premissa da regra varia ao longo do tempo. Para a próxima regra obtemos a função de pertinência consequente e o conjunto *fuzzy* implícito $\mu_2(u)$ conforme Figura 3.27 (a) e Figura 3.27 (b) respectivamente.

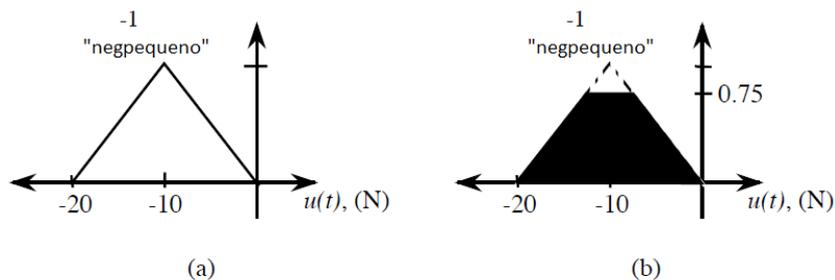


Figura 3.27: a) Função Pertinência Consequente Regra 2 b) Conjunto *Fuzzy* Implícito Regra 2.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Dessa forma as operações do mecanismo de inferência são concluídas resultando em

dois conjuntos *fuzzy* implícitos gerados pelas duas regras ativadas para o instante em questão. Em outras palavras, enquanto a entrada para o processo de inferência é o conjunto de regras que estão ativadas, sua saída é o conjunto de conjuntos *fuzzy* implícitos que representam as conclusões alcançadas por todas as regras que estão ativadas.

3.2.3.4. Defuzzificação

A etapa de *defuzzificação* será agora descrita, que é o componente final do controlador *fuzzy*. A *defuzzificação* opera nos conjuntos *fuzzy* implícitos produzidos pelo mecanismo de inferência e combina os seus efeitos para gerar a “mais certa” saída do controlador (entrada da planta). A *defuzzificação* pode ser entendida como a “decodificação” da informação do conjunto *fuzzy* produzido pelo processo de inferência (isto é, os conjuntos *fuzzy* implícitos) em saídas numéricas do controlador *fuzzy*.

Para seguir com a *defuzzificação*, primeiramente é preciso agregar os conjuntos *fuzzy* implícitos em um só eixo conforme mostrado na Figura 3.28. O objetivo é encontrar uma saída, que será denominada μ^{crisp} , que melhor representa as conclusões do controlador *fuzzy* que são representadas pelos conjuntos *fuzzy* implícitos. Existem várias abordagens para a *defuzzificação*, consideraremos apenas uma aqui.

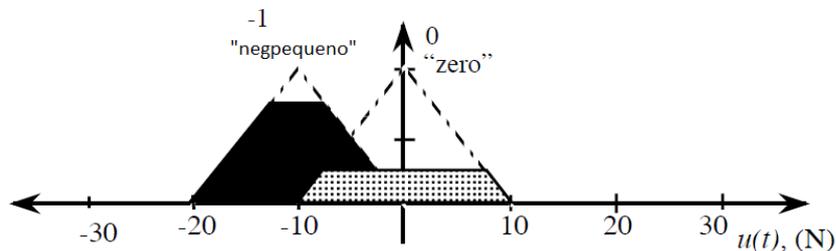


Figura 3.28: Conjuntos *Fuzzy* Implícitos Agregados.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

Consideraremos para a *defuzzificação* o método do centroide, o mais popular deles. Denotaremos b_i como o centro de cada função de pertinência do consequente de cada regra (i). Então teremos:

$$b_1 = 0$$

E

$$b_2 = -10$$

como mostrada na Figura 3.28. Sendo

$$\int \mu_{(i)}$$

a área sob a função de pertinência $\mu_{(i)}$. O método de *defuzzificação* da centroide vai computar a saída para ser

$$u^{crisp} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_i \int \mu_{(i)}}$$

Para as entradas $e(t) = 0$ e $\frac{d}{dt}e(t) = 0,294$ temos

$$u^{crisp} = \frac{(0)(4,375) + (-10)(9,375)}{4,375 + 9,375} = -6,81$$

Na Figura 3.29 temos os conjuntos *fuzzy* implícitos e a indicação do valor do resultado do processo de *defuzzificação*. O resultado de $-6,81\text{Newtons}$ significa que o carrinho será levemente puxado. Como o pêndulo está na posição de equilíbrio, mas está se movendo no sentido anti-horário, faz todo sentido essa reação do controlador *fuzzy*.

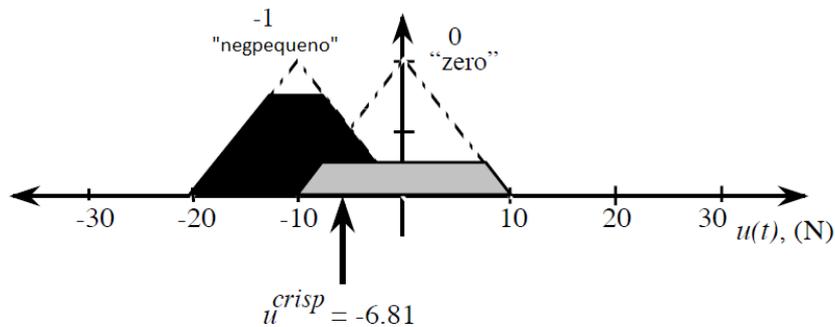


Figura 3.29: Conjuntos *Fuzzy* Implícitos com Indicação Saída.

Fonte: Passino *et al.* (1998).

4. Circuito de Beneficiamento de Serra Sul

O processo de beneficiamento do minério, na usina de Serra Sul, começa na etapa de peneiramento primário e britagem secundária, ilustrada na Figura 4.1. O minério vindo da mina é retomado por oito alimentadores igualmente distribuídos em duas pilhas e é carregado nos transportadores de correia de longa distância. O último dos transportadores dos circuitos, composto por seis transportadores, é dotado de cabeça móvel, realizando a descarga do minério para os seis silos do peneiramento primário e britagem secundária, de forma contínua e sequencial.

Cada linha é equipada com silo, alimentador, peneira e britador. O *overflow* das peneiras é direcionado ao britador e o *underflow* segue para etapas posteriores, juntamente com o produto dos britadores. Cada par de linhas, 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, formam um circuito de saída que tem como possibilidades de rota o pátio de regularização ou o peneiramento secundário e britagem terciária.

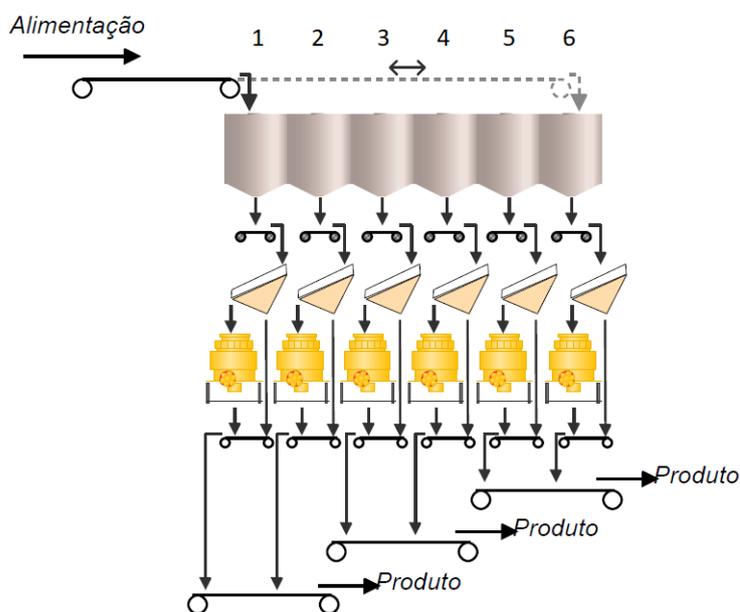


Figura 4.1: Peneiramento Primário Britagem Secundária.

Fonte: O autor.

4.1. Peneiramento Secundário e Britagem Terciária

Nesta etapa do processo, o material é processado em três prédios, paralelos e similares. Cada prédio é constituído por dez linhas paralelas, cada uma contendo silo, alimentador, peneira e transportador. O material de alimentação tem como origem o peneiramento primário e britagem secundária ou o pátio de regularização, podendo ter também alimentação combinada. O processo de peneiramento é a seco, isto é, à umidade natural. A alimentação dos dez silos é realizada através de transportador dotado com cabeça móvel, que realiza a descarga do minério de forma contínua e sequencial.

O minério alimentado nos silos, com capacidade útil cada de 1300 toneladas, é retomado por alimentadores e encaminhado para as peneiras. Os alimentadores tem velocidade variável, no intervalo de 30% a 100% da velocidade nominal, sendo definida automaticamente pelo sistema de controle da usina a ser apresentado posteriormente. As peneiras classificam o material por tamanho em 19 mm.

A Figura 4.2 ilustra uma peneira vibratória modular, equipamento utilizado no peneiramento secundário. Apresentam 2.440 mm de largura x 9.760 mm de comprimento, sendo cada módulo de 2.440 mm x 4.880 mm, com dois *decks*. Cada peneira é acionada por dois motores de 45 kW através de inversor de frequência, sendo cada motor responsável pelo acionamento de um módulo.

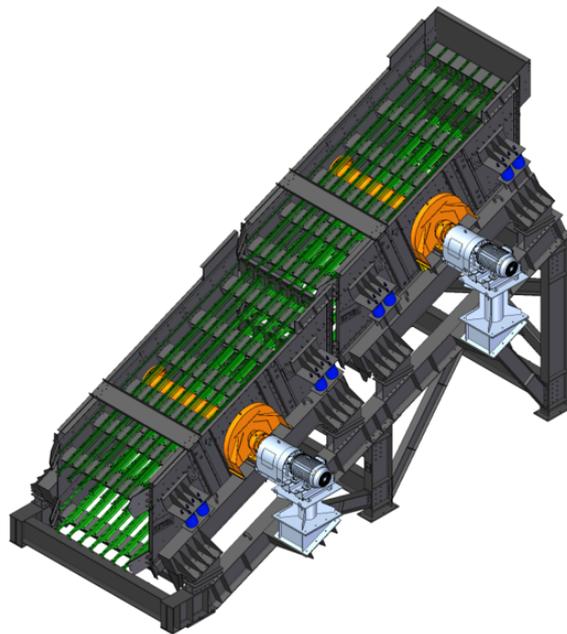


Figura 4.2: Peneira Vibratória Modular.

Fonte: O autor.

Conforme fluxograma de processo representado na Figura 4.3, o material retido no primeiro e segundo *decks* das peneiras modulares, fração maior que 19 mm e fora da especificação de tamanho, segue através de sistemas de transportadores de correia em série para a britagem terciária. Essa etapa é onde estão instalados os britadores terciários do tipo cônico, que são responsáveis pelo processo de cominuição para adequação do tamanho das partículas. O produto dos britadores terciários retorna para a alimentação das peneiras modulares do peneiramento secundário, para serem novamente submetidos ao processo de classificação por tamanho, fechando o circuito. O material passante no segundo *deck* das peneiras modulares, fração menor que 19 mm, denominada *sinter feed*, é encaminhado através de sistemas de transportadores de correia em série para o pátio de estocagem de produto.

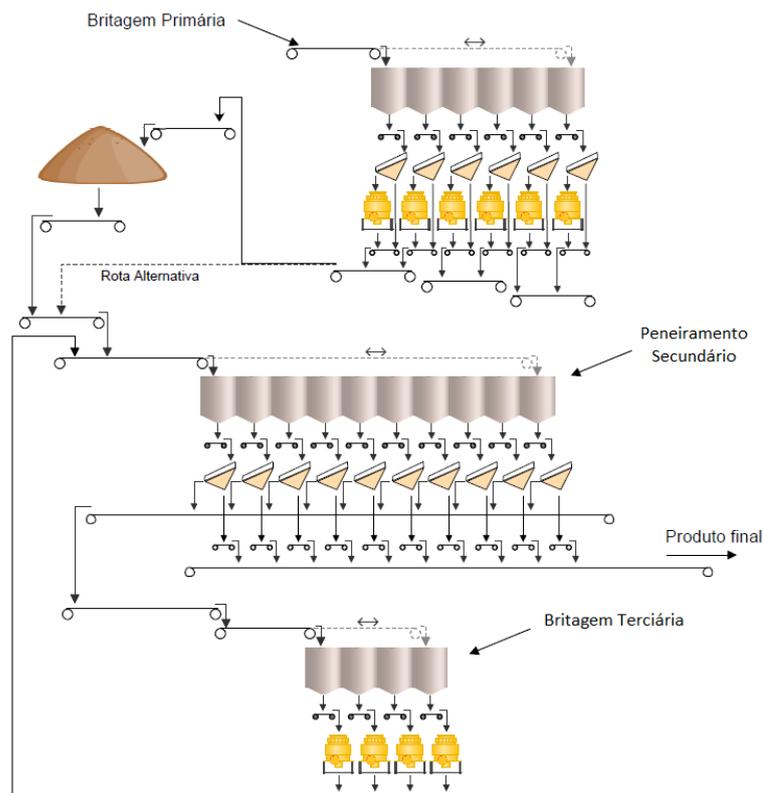


Figura 4.3: Peneiramento Secundário e Britagem Terciária.

Fonte: O autor.

4.1.1. Descrição do cabeça móvel e processo de distribuição de minério

Os transportadores de correia que alimentam os três prédios do peneiramento secundário são equipados com cabeça móvel retrátil, ilustrado na Figura 4.4, a qual é utilizada para distribuir o minério nos silos. A cabeça móvel, que se encontra acima dos silos, se desloca utilizando um sistema de acionamento tipo pinhão-cremalheira e uma unidade motriz independente.

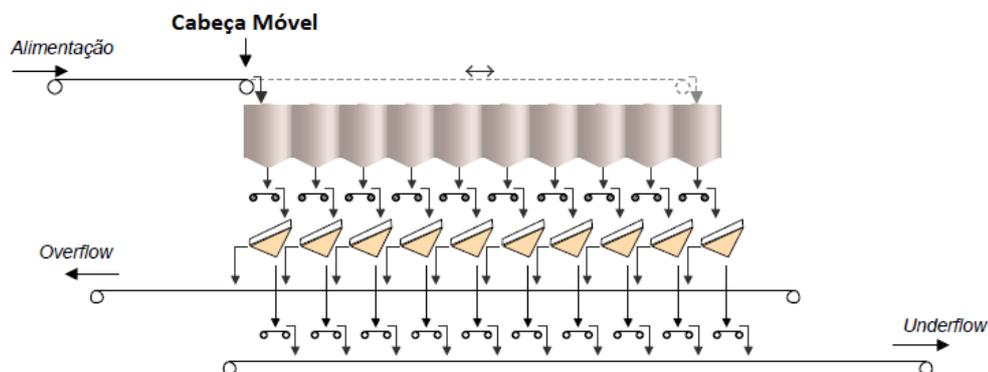


Figura 4.4: Diagrama Processo Distribuição Minério via Cabeça Móvel.

Fonte: O autor.

Apresenta velocidade variável de deslocamento definida automaticamente, por um al-

goritmo que considera o nível do silo em questão (silo no qual se encontra o cabeça móvel no instante avaliado) e também os níveis de todos os outros silos (média dos níveis dos silos). Estratégia essa que tem como objetivo melhor distribuir o minério entre os silos, evitando paradas por nível alto e nível baixo. Seu movimento é contínuo, com velocidade variável e com reversões ocorrendo no centro dos silos das extremidades.

As reversões são temporizadas, isto é, o cabeça móvel é paralisado por um tempo nos silos das extremidades, pois os mesmos são desprivilegiados em relação ao demais silos no que diz respeito aos ciclos de abastecimento. Para exemplificar, observe a Figura 4.5, que demonstra que o silo da extremidade, silo 1, é alimentado menos vezes que o silo 2 para um mesmo número de transições entre silos. O silo 1 é alimentado duas vezes e o silo 2 três vezes. Albuquerque *et al.* (2019) detalham a aplicação de um controlador de nível médio baseado em regras em simulador dinâmico dessa britagem terciária. Outro detalhe importante, é que, o ciclo de abastecimento do silo depende de sua posição e varia dependendo da direção do cabeça móvel.

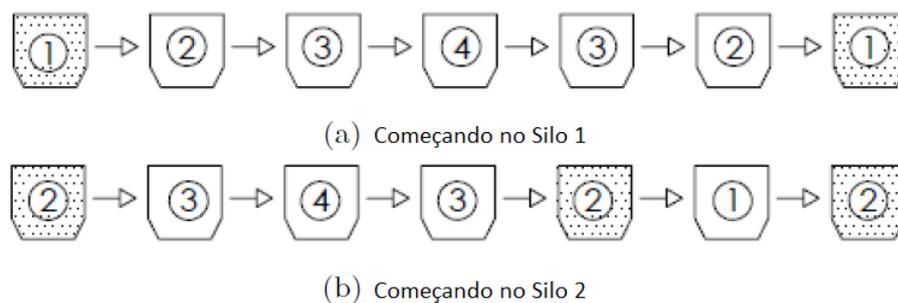


Figura 4.5: Ciclo Abastecimento Silo Extremidade.

Fonte: (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).

4.2. Estratégia de Controle do Peneiramento Secundário

Esse sistema é baseado em estruturas de controle *override* capaz de identificar automaticamente as principais restrições de processo e regular dinamicamente o *setpoint* da taxa de produto ou atuar diretamente na velocidade dos alimentadores. Tem como principais objetivos de controle:

- Oferecer condições de operação seguras reduzindo o risco de sobrecarga nos equipamentos de transporte;
- Promover uma operação contínua e ao mesmo tempo maximizar a utilização da capacidade de processamento disponível, que varia com o tempo. Dessa forma obtendo ganhos de produção e produtividade;
- Manter e regular o estoque de minério nos silos da britagem terciária sempre que possível;

- Balancear os níveis nos silos;
- Regular a taxa de produto na saída do Peneiramento Secundário, sujeito às seguintes restrições:
 - Potência alta no acionamento da peneira (restrição de linha);
 - Nível médio baixo nos silos do Peneiramento Secundário (restrição de processo);
 - Nível médio alto nos silos da Britagem Terciária (restrição de processo);
 - Carga circulante alta proveniente do material retido das peneiras (restrição de processo).

Com tal esquema de controle, na ausência de alguma restrição de processo, o valor do *setpoint* do controlador de taxa do produto das peneiras assume o valor determinado pelo operador, que é definido como sendo máximo *setpoint* admitido para o circuito. Em caso de ativação de alguma restrição, isto é, alguma variável de processo violar limites estabelecidos, o controlador em questão assumirá a definição do *setpoint* no esforço de regular o processo e permitir sua continuidade operacional na maior taxa de produto possível, sem alcançar os limites de segurança e intertravamento. Esse chaveamento entre as seleções disponíveis, ocorre dentro do conceito da estrutura *override*, no qual o controlador selecionado é o que apresenta o menor valor na sua saída, isto é, a menor CO (*controller output*). Essa tarefa é realizada por um bloco lógico do tipo seletor de mínimo, que tem em suas entradas a CO de cada controlador e o valor máximo determinado pelo operador. Sua saída é simplesmente o menor entre os valores de suas entradas. Os controladores utilizados nesse arranjo são os tão conhecidos e praticados na indústria, controladores PI.

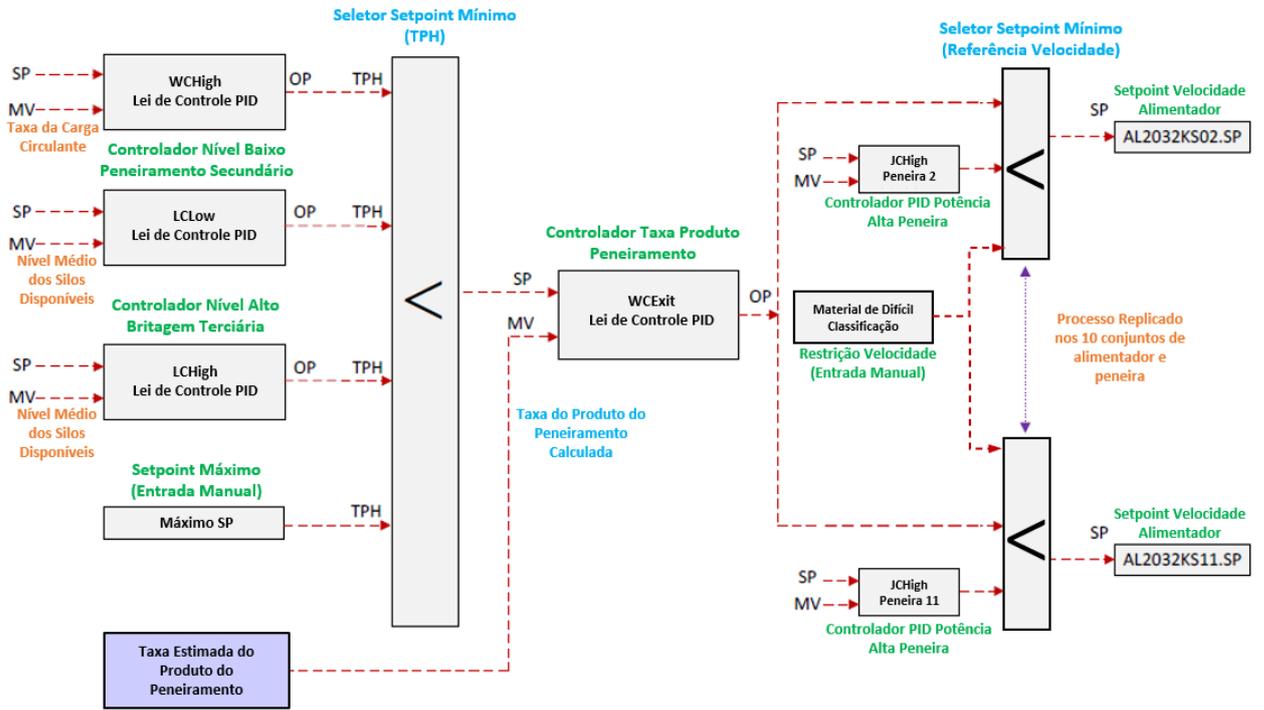
Seguindo o fluxo do controle, temos o controlador de taxa de produto do peneiramento, também um PI, sendo responsável pela camada regulatória conforme *setpoint* definido pela estrutura *override* mencionada. Esse controlador, tem como principal particularidade, trabalhar com uma variável de processo estimada e não o valor propriamente lido do instrumento de medição de taxa, que no caso é uma balança integradora. A técnica é realizada com o objetivo de eliminar o tempo morto intrínseco do processo proporcionando ao controlador uma sintonia mais agressiva e uma resposta mais rápida no rastreamento do *setpoint*. Essa variável de processo estimada, em termos básicos, é a multiplicação do somatório das velocidades reais dos alimentadores por um ganho e pela porcentagem de carga direcionada ao produto, após partição da peneira. Tratamentos via filtros de primeira ordem são realizados para efeitos de suavização. Esse ganho, conhecido como ganho do alimentador, é atualizado dinamicamente e tem seu valor definido pela razão da taxa pelo somatório de velocidade atrasado no tempo (considerando a posição da balança integradora). A porcentagem de carga direcionada para o produto também é calculada dinamicamente. A equação abaixo descreve o cálculo da PV estimada por

$$PV_{est} = \left(\sum_{f=1}^{10} S_f \right) K_{feeder}(t) \%CP(t),$$

onde PV_{est} é a variável de processo estimada, S_f é a velocidade real do alimentador de índice f (examinando os 10 alimentadores), $K_{feeder}(t)$ é o ganho do alimentador calculado dinamicamente, e $\%CP(t)$ é a porcentagem de carga direcionada para o produto calculada dinamicamente.

Avançando no tema, temos a saída do controlador de taxa de produto, CO, conectada em outro bloco seletor de mínimo, sendo esse responsável pela definição de velocidade dos alimentadores, formando uma outra estrutura *override*. Essa por sua vez, tendo como entradas a CO do controlador mencionada, a CO do controlador de potência alta das peneiras e uma entrada manual. Essa entrada manual é utilizada para restringir a velocidade dos alimentadores caso seja verificado em campo a presença de um material muito fora de especificação, isto é, de extrema dificuldade de classificação, que traz até mesmo riscos para o processo, expondo a peneira, circuito de transporte e britador a uma condição de sobrecarga. Em cenários com referência de velocidade definida pela saída do controlador, condições normais de operação, todos os alimentadores operam com mesma velocidade, e variam conforme lei de controle do controlador responsável por regular o *setpoint* de taxa de produto.

O controlador de potência alta das peneiras, por sua vez, do ponto de vista operacional, tem o objetivo de atuar em situações de baixa eficiência de peneiramento, detectadas quando há um volume maior de material sobre a peneira, isto é, no *overflow*. É específico por linha e busca regular o processo reduzindo a taxa de alimentação em situações de sobrecapacidade, protegendo os equipamentos contra sobrecargas e também contribuindo para a eficiência de peneiramento. Em paralelo à atuação do controlador automático, existe a opção da atuação manual para restringir a velocidade dos alimentadores, praticado geralmente em situações de maior criticidade. Na Figura 4.6, temos um diagrama sintetizando o sistema de controle mencionado.



Nota: Estratégia de Controle utilizada para os 3 prédios do Peneiramento Secundário

Figura 4.6: Diagrama de Controle do Peneiramento Secundário - Saída.

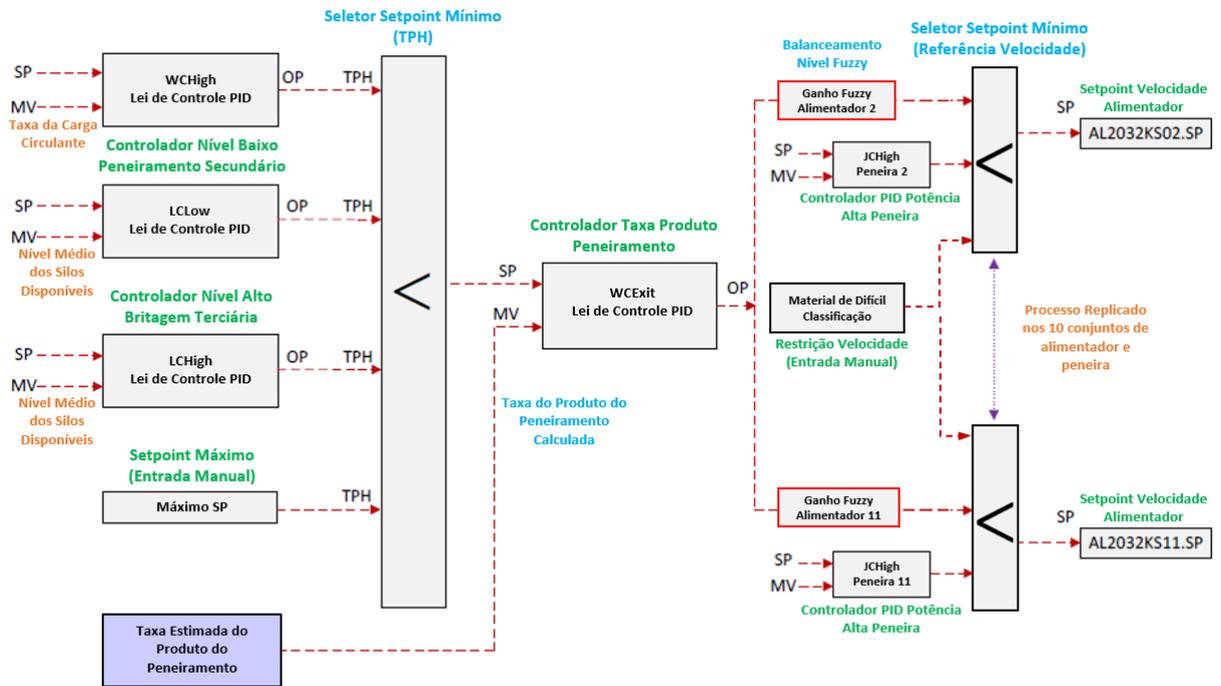
Fonte: O autor.

5. Controle Fuzzy Implementado

5.1. Nova estratégia de controle

Em condições normais de operação, isto é, sem restrição ativa no bloco seletor de mínimo dos alimentadores, os mesmos operam com velocidade igual e definida pela saída do controlador de taxa de produto, cenário esse que supera facilmente 90% do tempo em operação. Com mesma referência de velocidade, a tarefa de equilibrar os níveis dos silos e evitar paradas de linha por nível baixo ou paradas do circuito a montante por nível alto ficam a cargo do cabeça móvel.

Com a nova estrutura de controle aplicada, essa função de distribuição de material teria contribuição também dos alimentadores, através do desbalanceamento de suas velocidades. Ao invés dos alimentadores terem a mesma velocidade, alguns alimentadores teriam suas velocidades reduzidas e outros suas velocidades aumentadas, dentro de um contexto de compensação, isto é, a porção de redução de velocidade em alguns alimentadores seriam compensadas no aumento de velocidade de outros. Esse papel é desempenhado pelo controlador *fuzzy*, e em termos de diagrama de controle da saída do peneiramento secundário teremos a seguinte atualização conforme Figura 5.1, sinalizada com contorno em vermelho. Esse bloco lógico, sinalizado em vermelho, em termos práticos, vai atuar como um ganho perante a CO do controlador, podendo amplificar ou atenuar seu valor original. Em outras palavras, vai acelerar alguns alimentadores e desacelerar outros, de acordo com as condições de processo computadas pelo controlador *fuzzy*. Sua amplitude de atuação, isto é, o quanto seu valor pode ser amplificado ou atenuado será um parâmetro fixo do controlador, a ser definido manualmente. Na Figura 5.2, temos um trecho do código, online, demonstrando as velocidades originais definidas pelo controle regulatório de taxa, em verde, e as velocidades modificadas pelo controlador *fuzzy*, em vermelho. As referências estão em m/s e note que algumas velocidades estão acima da original e outras abaixo.



Nota: Filosofia de Controle utilizada para os 3 prédios de Peneiramento – ED-2032KS-01/02/03

Figura 5.1: Novo Diagrama Controle Peneiramento Secundário Saída.

Fonte: O autor.

```

IF DisLevBalRatios THEN
  IF NOT (EnLevBalFuzzy) THEN
    SP_24 [ 0.1774 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_25 [ 0.18549 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_26 [ 0.0 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_27 [ 0.17162 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_28 [ 0.18486 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_29 [ 0.14983 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_30 [ 0.1851 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_31 [ 0.23269 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_32 [ 0.22953 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
    SP_33 [ 0.25535 ] :=AL_2032KS_ED03_WC.OP [ 0.19708 ];
  ELSE
    SP_24 [ 0.1774 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_01_Speed [ 0.17754 ];
    SP_25 [ 0.18549 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_02_Speed [ 0.18563 ];
    SP_26 [ 0.0 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_03_Speed [ 0.0 ];
    SP_27 [ 0.17162 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_04_Speed [ 0.1717 ];
    SP_28 [ 0.18486 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_05_Speed [ 0.185 ];
    SP_29 [ 0.14983 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_06_Speed [ 0.14997 ];
    SP_30 [ 0.1851 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_07_Speed [ 0.18524 ];
    SP_31 [ 0.23269 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_08_Speed [ 0.23272 ];
    SP_32 [ 0.22953 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_09_Speed [ 0.22978 ];
    SP_33 [ 0.25535 ] :=ED03_2032_AIs_Speed.AL_10_Speed [ 0.2561 ];
  END_IF
ELSE

```

Figura 5.2: Trecho Código Modificações Controle Fuzzy.

Fonte: O autor.

5.2. A estrutura macro do controle *fuzzy*

Esta seção descreve a estrutura macro do controle *fuzzy*, bem como suas interligações com o controle original. Conforme exposto no diagrama, o sistema *fuzzy* modificará a referência de velocidade vinda da saída do controle de taxa de produto, podendo esse valor ser amplificado ou reduzido em cada alimentador. Cada linha do peneiramento tem sua própria lógica *fuzzy*, que terá como saída um valor entre 0 e 1 representando sua necessidade de aceleração / desaceleração. Quando mais próximo de 0 maior necessidade de desaceleração e quanto mais próximo de 1 maior a necessidade de aceleração. Essa lógica *fuzzy* por linha trabalha com duas entradas, sendo elas a distância do cabeça móvel para o silo em questão e o nível desse silo. . Sendo assim teremos o seguinte diagrama por linha conforme Figura 5.3.

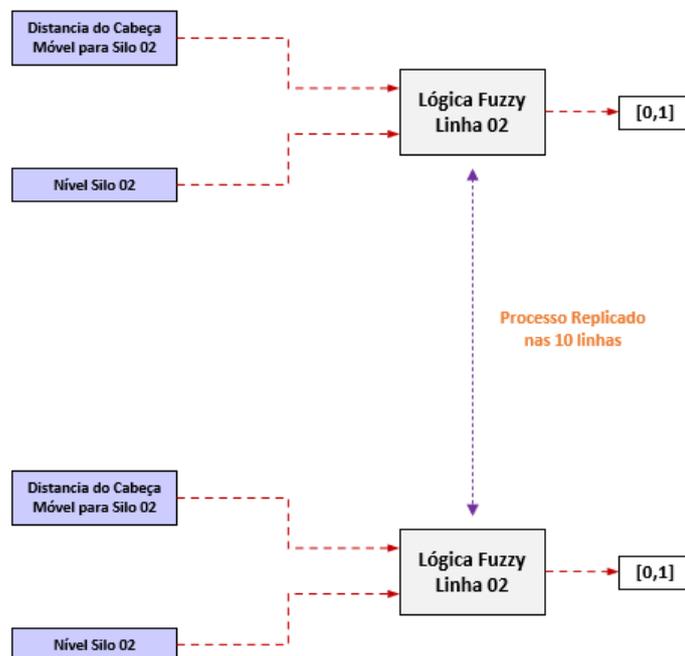


Figura 5.3: Diagrama Básico Lógica *Fuzzy* Linhas Peneiramento Secundário.

Fonte: O autor.

A próxima etapa é entender como essas saídas das lógicas *fuzzy* alteram de fato a velocidade dos alimentadores. Um bloco lógico foi construído especialmente para tratar esses valores e gerar em suas saídas as velocidades modificadas dos alimentadores. Esse bloco tem, como uma de suas entradas, a saída do controlador de taxa de produto. Essa entrada, é multiplicada pelo número de alimentadores online (rodando), para se obter o que entendemos como somatório de velocidade dos alimentadores. Esse somatório, é separado em uma parte fixa e outra parte variável. A parte fixa será dividida igualmente entre os alimentadores e a parte variável será entregue de forma proporcional de acordo com a necessidade de aceleração/desaceleração de cada alimentador (saída da lógica *fuzzy*), causando o desbalanceamento das velocidades.

Essa técnica foi realizada para que se pudesse, via parâmetro de configuração, ajustar a amplitude da capacidade do controle *fuzzy* de alterar as velocidades. Quanto maior a parcela fixa menor a capacidade do *fuzzy* de desbalancear as velocidades. As equações abaixo ajudam a esclarecer a técnica e a definição de velocidade via sistema *fuzzy* para o alimentador 2, por exemplo. Os demais alimentadores apresentam o mesmo cálculo. Na Figura 5.4 temos o diagrama representando esse tratamento.

$$S_{sum} = F_{on} * PID_{out}$$

$$S_{sumF} = S_{sum} \times K_{fp}$$

$$S_{sumV} = S_{sum} - S_{sumF}$$

$$Fuzzy_{s2} = \left(\frac{Fuzzy_{out2}}{\sum_{n=1}^{10} F_{outn}} * S_{sumV} \right) + \frac{S_{sumF}}{F_{on}}$$

Onde:

- S_{sum} = somatório de velocidade baseado na saída do controlador de taxa de produto;
- F_{on} = número de alimentadores online;
- PID_{out} = saída do controlador de taxa de produto;
- S_{sumF} = somatório de velocidade da porção fixa;
- K_{fp} = constante ajustável da porção fixa de velocidade;
- S_{sumV} = somatório de velocidade da porção variável;
- $Fuzzy_{s2}$ = referência de velocidade para o alimentador 2 definida pelo sistema fuzzy;
- $Fuzzy_{out2}$ = saída da lógica *fuzzy* para a linha 2;
- $\sum_{n=1}^{10} Fuzzy_{outn}$ = somatório da saída da lógica *fuzzy* para todas as linhas (alimentadores que não estão online é definido o valor zero);

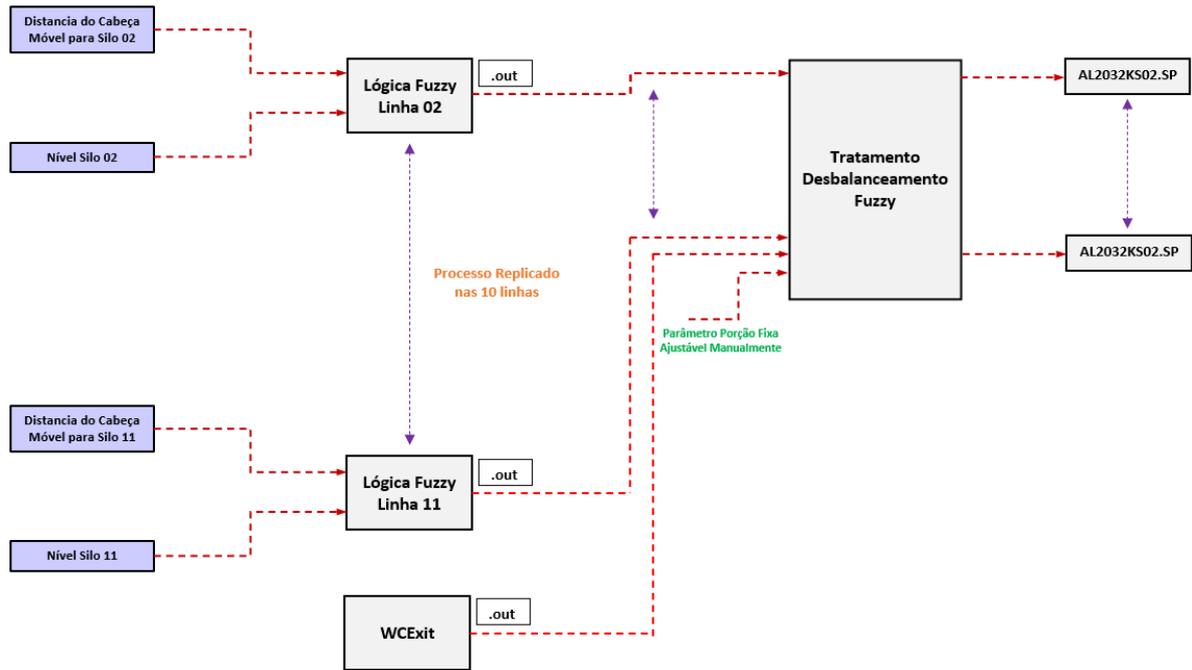


Figura 5.4: Diagrama Tratamento Dados Saída *Fuzzy*.

Fonte: O autor.

5.3. *Framework utilizada*

As principais motivações da utilização da lógica *fuzzy* para essa aplicação são sua capacidade de lidar com um sistema multivariável e a ausência de um modelo do processo. Somado a isso, ainda temos a existência de uma biblioteca *fuzzy* no SDCD utilizado em Serra Sul, do fornecedor ABB, o 800xA®. O desenvolvimento foi realizado na ferramenta de engenharia Control Builder®, também do fornecedor ABB. Essa biblioteca conta com blocos funcionais para realizar, em termos básicos, as seguintes funções dentro de um sistema *fuzzy*:

- Receber as entradas reais (escalares), realizar operações lineares e converter em uma estrutura de dados para serem utilizadas em funções *fuzzy* (blocos *FuzzySpPvIn* ou *FuzzyPvIn*);
- Definir funções de pertinência para as entradas do sistema *fuzzy*. Para cada valor de entrada um grau de pertinência é calculado para o correspondente conjunto *fuzzy* (bloco *InputMembership*);
- Montar as condições *fuzzy*, premissas das regras linguísticas utilizando operações de mínimo entre as funções de pertinência de entrada selecionadas, simbolizadas pelo operador AND (bloco *FuzzyCondition*);
- Agrupar as premissas (condições *fuzzy*) e computar, via operações de máximo, as regras

que definem determinada função de pertinência de saída, dessa forma definindo os conjuntos *fuzzy* implícitos (bloco *FuzzyRule*);

- Definir função de pertinência para as saídas do sistema *fuzzy* (bloco *OutputMembership*). Cada função de pertinência de saída tem seu grau de satisfação calculado a partir do conjunto de regras que a definem;
- Computar a estrutura de dados formada por todas as funções de pertinência de saída conectadas (conjuntos *fuzzy* implícitos) e realizar a etapa de *defuzzificação* a partir do método do centro de gravidade (centroide), gerando assim uma saída defuzzificada (bloco *Defuzzification*);
- Receber a estrutura de dados da etapa de *defuzzificação* e computar uma saída escalar para utilização no processo (bloco *FuzzyOut*).

A biblioteca *fuzzy*, somada aos recursos do SDCD, permitem que o engenheiro monitore o processo online, verificando o comportamento das funções de pertinência e processo de *defuzzificação*. Também é possível, de forma online, adicionar ou remover regras à base de conhecimento. Na Figura 5.5 temos uma representação gráfica genérica da disposição dos blocos funcionais citado.

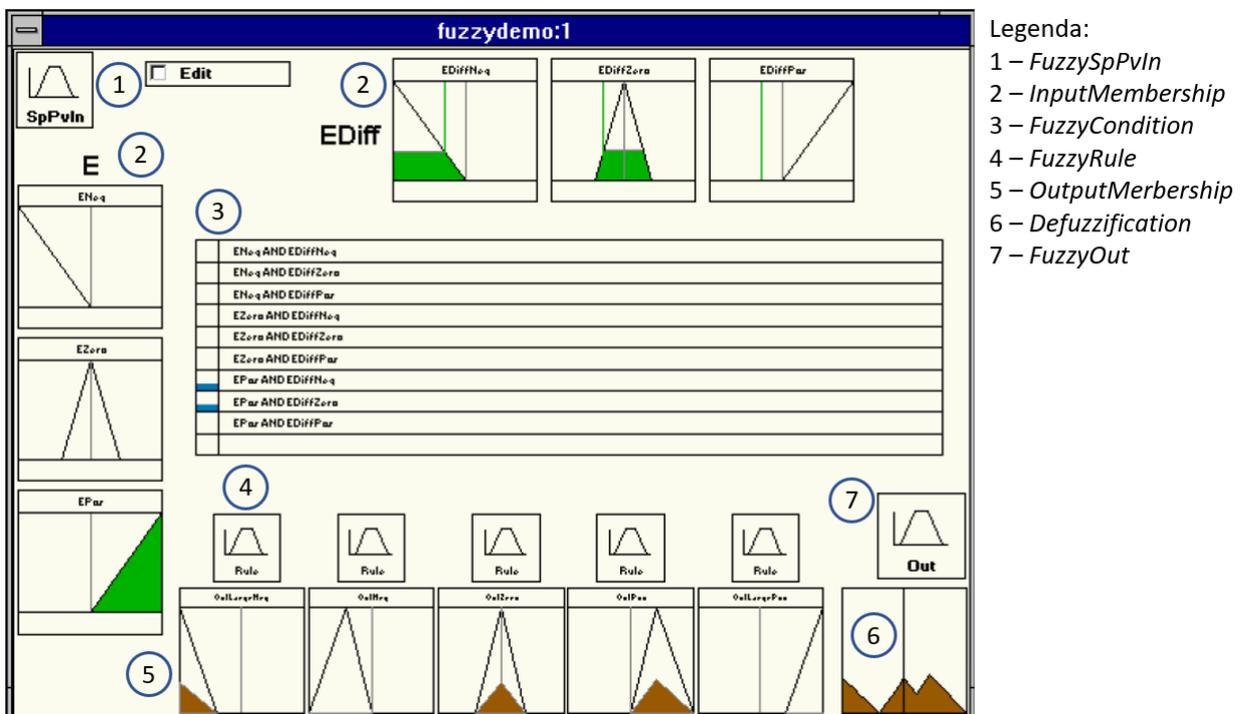


Figura 5.5: Disposição Genérica Elementos Controlador *Fuzzy*.

Fonte: O autor.

5.4. Funções de Pertinência de Entrada / Saída

Para o projeto do controlador *fuzzy*, foram desenvolvidas dez lógicas *fuzzy* iguais, uma para cada linha do peneiramento, e foram selecionadas duas entradas e uma saída. Como entradas, através de observações de processo, foram definidas o nível do silo e a distância do cabeça móvel para o silo em questão. Como saída, o indiciador de necessidade de aceleração / desaceleração. A Tabela 5.1 representa as variáveis utilizadas no sistema *fuzzy*.

Tabela 5.1: Variáveis do Sistema *Fuzzy*.

Entradas <i>Fuzzy</i>	Saídas <i>Fuzzy</i>
1 - Nível do silo	1 - Indicador de aceleração-desaceleração
2- Distância do cabeça móvel	

Para definir o conjunto de funções de pertinência de entrada e saída, foi utilizado conhecimento empírico do processo. Valores linguísticos foram definidos para as entradas e saída conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores Linguísticos Entrada / Saída.

Entrada/Saída <i>Fuzzy</i>	Valores linguísticos
1 - Nível do silo	Muito baixo / Baixo / Normal / Alto / Muito alto
2 - Distância do cabeça móvel	Muito perto / Perto / Longe / Muito longe
3 - Indicador de aceleração/desaceleração	Reduz muito / reduz / Mantém / Aumenta / Aumenta muito

O universo de discurso das variáveis de entrada / saída são descritos abaixo:

- Nível do silo: apresenta intervalo entre 10% e 100%, com 10% ocorrendo intertravamento por nível baixo e 100% ocorrendo intertravamento por nível alto;
- Distância do Cabeça Móvel: apresenta intervalo entre 0 e 150 metros, sendo próximo de zero indicando que o cabeça móvel está no silo em questão e próximo de 150 metros que ele está o mais distante possível, isto considerando seu trajeto de ida e volta;
- Indicador de Aceleração / Desaceleração: apresenta intervalo entre 0 e 1, sendo quanto mais próximo de zero maior a necessidade de desacelerar e quanto mais próximo de 1 maior a necessidade de acelerar.

Foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais e triangulares. Na Figura 5.6 temos as funções de pertinência de nível, na Figura 5.7 as funções de pertinência de distância para o cabeça móvel e na Figura 5.8 as funções de pertinência de saída.

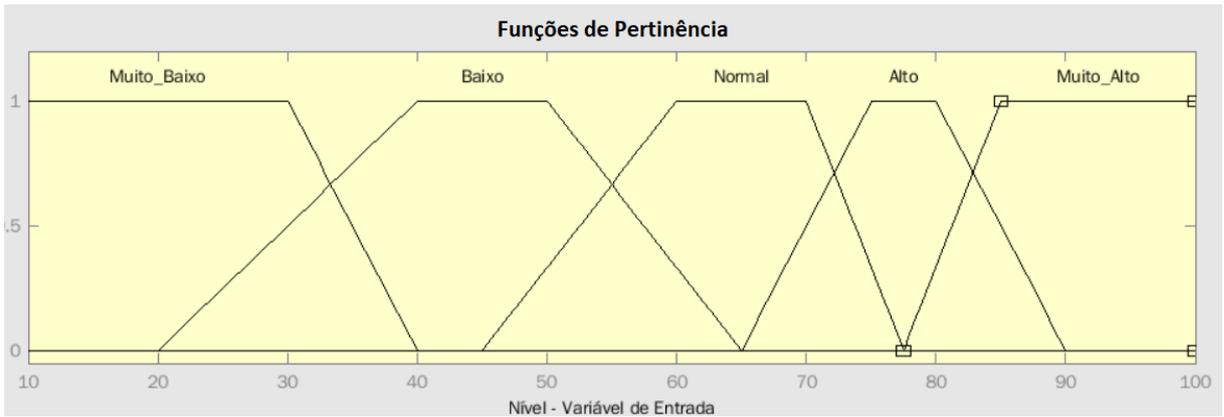


Figura 5.6: Funções Pertinência Nível.

Fonte: O autor.

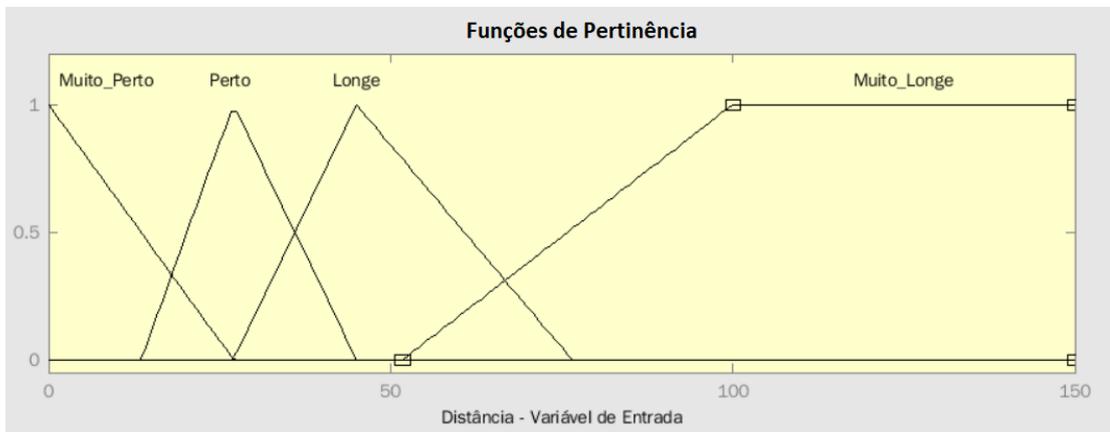


Figura 5.7: Funções Pertinência Distância Cabeça Móvel.

Fonte: O autor.

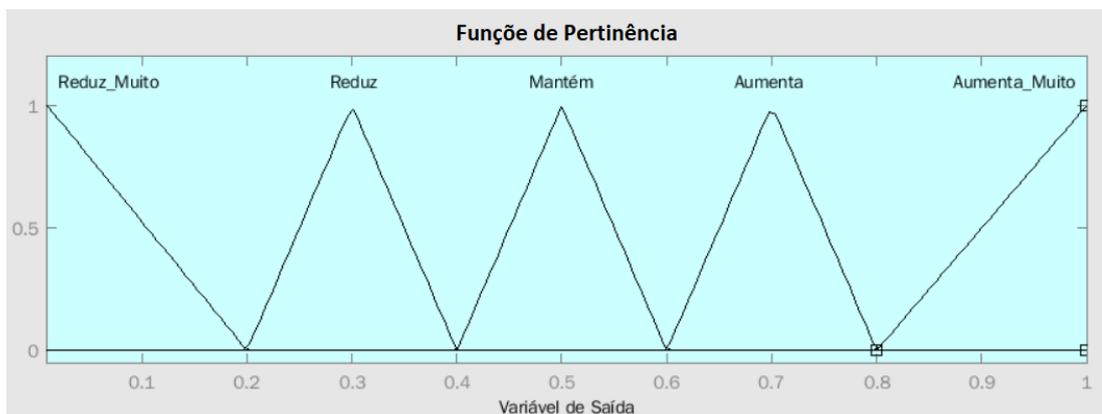


Figura 5.8: Funções Pertinência Saída.

Fonte: O autor.

5.5. A base de regras *fuzzy*

O desenvolvimento da base de regras requer informação sobre o processo e experiência no seu comportamento. Associado a esse conhecimento, a base de regras foi construída de acordo com o objetivo do sistema *fuzzy*, que é reduzir paradas de linhas por nível baixo e reduzir paradas do circuito a montante por nível alto em alguma linha.

Com as combinações disponíveis das funções de pertinência de nível e distância do cabeça móvel podemos obter 20 regras. Todas as 20 regras foram definidas. Para efeito de simplificação temos a Tabela 5.3 com abreviações das variáveis para utilização na base de regras, sendo elas NS, DC e OP.

Tabela 5.3: Abreviações.

Variáveis	Abreviação
1 - Nível do silo	NS
2 - Distância do cabeça móvel	DC
3 - Indicador de aceleração/desaceleração	OP

Na Tabela 5.4 temos o primeiro grupo de regras, que processadas pelo mecanismo de inferência definem o grau de satisfação da função de pertinência de saída reduz muito.

Tabela 5.4: Conjunto Regras para Função Pertinência Reduz Muito.

Regras	Descrição
Regra 1	SE (NS Muito baixo) E (DC Muito longe) ENTÃO (OP Reduz muito)
Regra 2	SE (NS Muito baixo) E (DC Longe) ENTÃO (OP Reduz muito)
Regra 3	SE (NS Muito baixo) E (DC Perto) ENTÃO (OP Reduz muito)
Regra 4	SE (NS Muito baixo) E (DC Muito perto) ENTÃO (OP Reduz muito)
Regra 5	SE (NS Baixo) E (DC Muito longe) ENTÃO (OP Reduz muito)

Essas regras geram uma grande necessidade de desaceleração do alimentador para que se evite paradas por nível baixo de linhas, mantendo o processo estável.

Na Tabela 5.5 temos o segundo grupo de regras, que processadas pelo sistema de inferência definem o grau de satisfação da função de pertinência de saída reduz, que já realiza inferências a partir de níveis de silo menos criticamente baixos e algumas valores linguísticos de distância do cabeça móvel.

Tabela 5.5: Conjunto Regras para Função Pertinência Reduz.

Regras	Descrição
Regra 6	SE (NS Baixo) E (DC Longe) ENTÃO (OP Reduz)
Regra 7	SE (NS Baixo) E (DC Perto) ENTÃO (OP Reduz)
Regra 8	SE (NS Normal) E (DC Muito longe) ENTÃO (OP Reduz)

Na Tabela 5.6 temos o terceiro grupo de regras, que processadas pelo sistema de inferência definem o grau de satisfação da função de pertinência de saída mantém, que tende a manter a velocidade original considerando a referência da saída do controlador de taxa de produto e a situação dos demais silos.

Tabela 5.6: Conjunto Regras para Função Pertinência Mantém.

Regras	Descrição
Regra 9	SE (NS Baixo) E (DC Muito perto) ENTÃO (OP Mantém)
Regra 10	SE (NS Normal) E (DC Longe) ENTÃO (OP Mantém)

Na Tabela 5.7 temos o quarto grupo de regras, que processadas pelo sistema de inferência definem o grau de satisfação da função de pertinência de saída aumenta, que tende a acelerar diante de alguns cenários de nível e distância do cabeça móvel, para evitar paradas por nível alto e para também propiciar desacelerações de alimentadores que precisam atrasar a evolução da queda de nível para evitar uma parada de linha por nível baixo.

Tabela 5.7: Conjunto Regras para Função Pertinência Aumenta.

Regras	Descrição
Regra 11	SE (NS Normal) E (DC Perto) ENTÃO (OP Aumenta)
Regra 12	SE (NS Alto) E (DC Muito longe) ENTÃO (OP Aumenta)
Regra 13	SE (NS Alto) E (DC Longe) ENTÃO (OP Aumenta)

Na Tabela 5.8 temos o quinto grupo de regras, que processadas pelo sistema de inferência definem o grau de satisfação da função de pertinência de saída aumenta muito, que tende a acelerar muito diante de alguns cenários de nível e distância do cabeça móvel, para evitar paradas por nível alto e para também propiciar desacelerações de alimentadores que precisam atrasar a evolução da queda de nível para evitar uma parada de linha por nível baixo.

Tabela 5.8: Conjunto Regras para Função Pertinência Aumenta Muito.

Regras	Descrição
Regra 14	SE (NS Normal) E (DC Muito perto) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 15	SE (NS Alto) E (DC Perto) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 16	SE (NS Alto) E (DC Muito perto) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 17	SE (NS Muito alto) E (DC Longe) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 18	SE (NS Muito alto) E (DC Perto) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 19	SE (NS Muito alto) E (DC Muito perto) ENTÃO (OP Aumenta muito)
Regra 20	SE (NS Muito alto) E (DC Muito longe) ENTÃO (OP Aumenta muito)

Desacelerações só acontecem com acelerações compensando essa queda de velocidade, e vice-versa. É premissa do sistema *fuzzy* não perturbar o controle regulatório, e isso é alcançado mantendo o mesmo somatório de velocidade original, isto é, anterior ao desbalanceamento.

5.6. A Representação Gráfica do Sistema *Fuzzy*

Por fim, definidas as funções de pertinência e base de regras, juntamente com os outros blocos que executam as demais funções, temos o sistema *fuzzy* representado na Figura 5.9. Esse sistema foi construído utilizando a biblioteca *fuzzy* do sistema 800xA®, do fornecedor ABB.

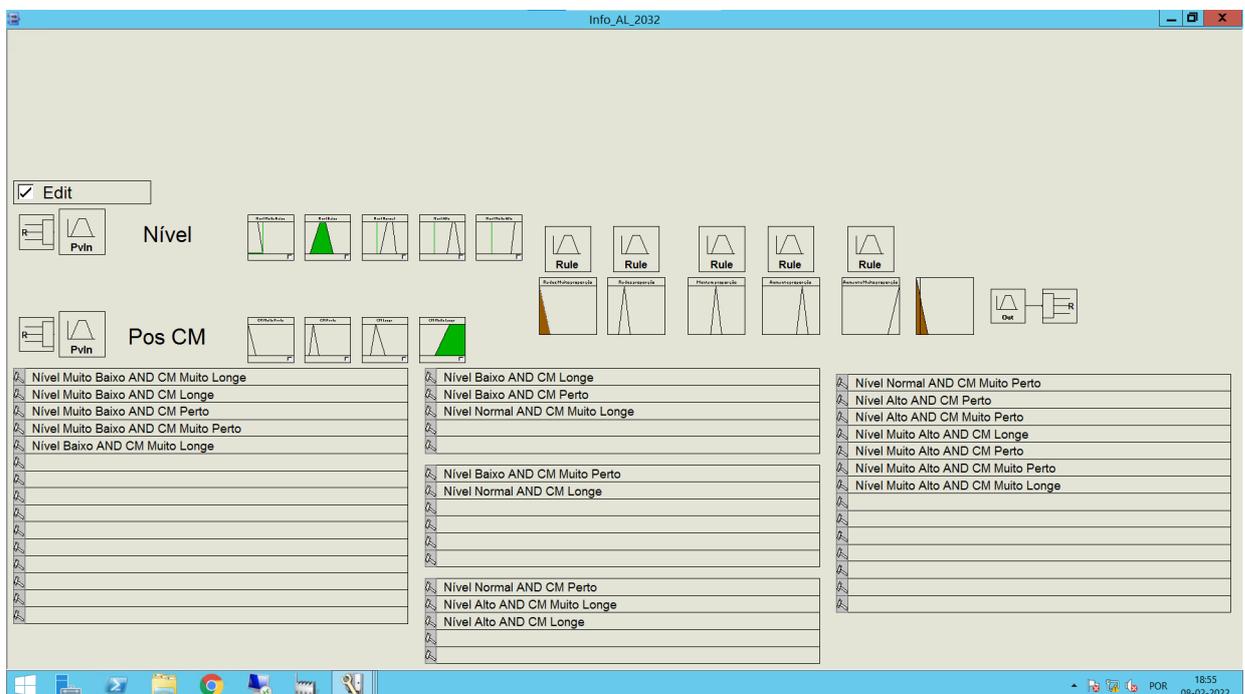


Figura 5.9: Representação Gráfica do Sistema *Fuzzy* Implementado.

Fonte: O autor.

6. Resultados e Discussões

Os resultados dessa dissertação são baseados em testes práticos industriais realizados após o desenvolvimento, implementação e comissionamento do controlador nas três Usinas de Serra Sul, complexo de mineração de ferro operado pela Vale SA no estado do Pará. O teste prático foi realizado através da comparação de desempenho entre as Usinas 01 e 02, estando o controle *fuzzy* desligado na Usina 01 e ligado na Usina 02. Essa avaliação de desempenho do controlador *fuzzy* foi realizada em um período de 24 horas de operação.

Para avaliar o controlador *fuzzy* utilizaremos os seguintes indicadores de desempenho:

- Desvio padrão dos níveis dos silos: utilizado para verificar a capacidade do controlador *fuzzy* de melhor equalizar os níveis;
- Número médio de linhas em operação: utilizado para verificar a capacidade do controlador *fuzzy* de maximizar as linhas em operação;
- Tempo médio operando por linha: utilizado para verificar a capacidade do controlador *fuzzy* de manter as linhas operando mais tempo;
- Zonas de velocidade dos alimentadores: utilizado para averiguar a capacidade do controlador em contribuir para uma redução de velocidade dos alimentadores;
- Velocidade média dos alimentadores: também utilizado para averiguar a capacidade do controlador em contribuir para uma redução de velocidade dos alimentadores;
- Porcentagem de carga circulante: utilizado para avaliar o ganho de eficiência de peneiramento diante da operação dos alimentadores com velocidades mais baixas;
- Produtividade do circuito de britagem: utilizado para avaliar o efeito do ganho de eficiência do peneiramento na produtividade da Usina.

Conforme exposto ao longo dessa dissertação, determinadas condições operacionais, como por exemplo o balanço de massa do circuito, afetam os indicadores de desempenho utilizados para avaliar o controlador *fuzzy*. Para obter uma avaliação de qualidade, foi selecionado um dia de operação em que as usinas 01 e 02 operaram com maior similaridade, para que tais condições pudessem ter seus efeitos isolados ou bem minimizados, propiciando resultados autênticos. Primeiro apresentaremos as principais condições que nortearam a escolha dessa janela de teste e depois apresentaremos os resultados obtidos. Na Figura 6.1 podemos perceber que a Usina 01 operou 22h28min e a Usina 02 22h27min, diferença de 0,075%, que favorece a comparação.

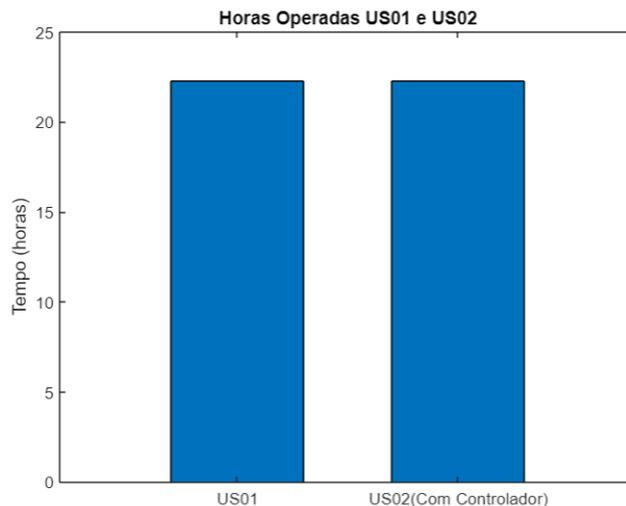


Figura 6.1: Horas operadas Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Outro aspecto que corrobora com cenário de comparação é que grande parte da alimentação das usinas veio do peneiramento primário durante o mesmo intervalo de tempo, podendo ser inferido que as características do material de alimentação eram bem próximas para as duas usinas.

Na Figura 6.2 podemos verificar um dos principais parâmetros utilizados como referência de equalização da condição das usinas para a comparação, que é a taxa média de alimentação. Taxas médias de alimentação mais baixas provocam o aumento das paradas de linhas por falta de minério. As Usinas 01 e 02 operaram com valores muito próximos, 6564 t/h e 6433 t/h, uma diferença de apenas 2% e em favor da Usina 01 que estava sem controlador, satisfazendo o critério.

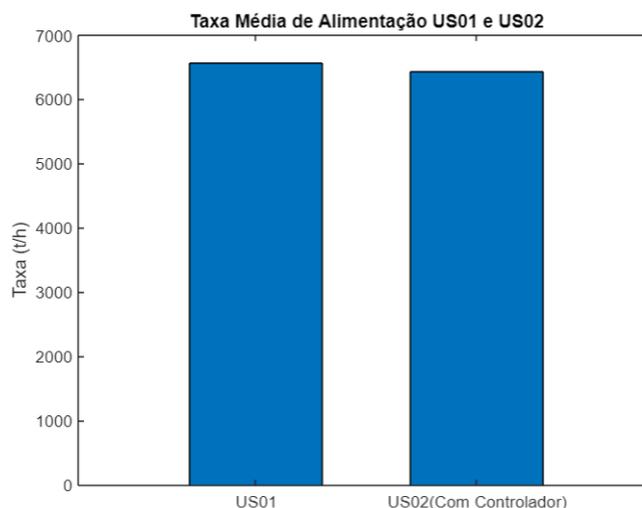


Figura 6.2: Taxa Média de alimentação das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Desse ponto em diante apresentaremos os resultados observados. Começando pela função primária do controlador *fuzzy*, que é melhor equilibrar os níveis dos silos, temos na

Figura 6.3 o desvio padrão dos níveis dos silos das Usina 01 e 02. Note que o desvio padrão da Usina 02 apresentou um valor 14,06% menor que da Usina 01, demonstrando que com o controlador *fuzzy* a variabilidade dos níveis dos silos foi reduzida.

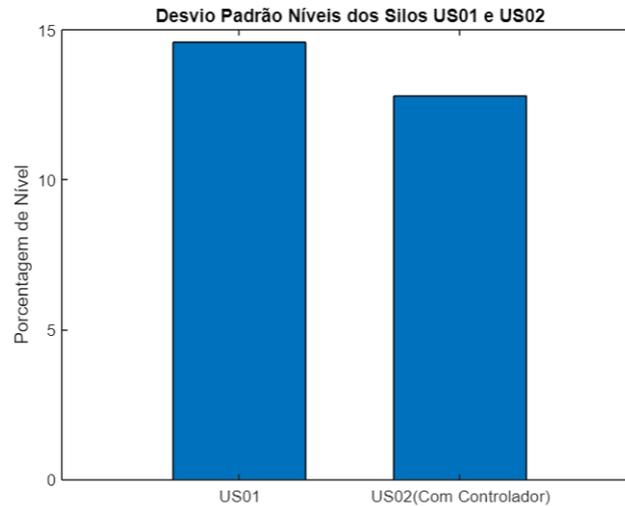


Figura 6.3: Desvio Padrão Níveis dos Silos das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Uma análise foi realizada para calcular o número médio de linhas em operação durante todo o período de comparação e apresentada na Figura 6.4. A cada minuto operado foi registrado o número de linhas em operação e a média de todos esses valores minuto a minuto foi calculada. Lembrando que o objetivo do controlador é maximizar o número de linhas em operação para que seja possível operar com velocidades mais baixas nos alimentadores e com maior eficiência de peneiramento. Resultado muito positivo para a Usina 02 que estava com o controlador *fuzzy* ligado, que registrou um indicador 10,65% melhor. Apresentou uma média de 9,27 linhas em operação contra 8,37 da usina sem controlador, cumprindo seu objetivo de melhor equilibrar os níveis e maximizar o número de linhas operando. Objetivo esse também comprovado pela Figura 6.5, que apresenta o tempo médio de operação de cada linha das Usinas 01 e 02. A Usina 02 apresentou um tempo médio de 57,7 minutos, 25,96% superior ao da Usina 01, que foi de 45,8 minutos.

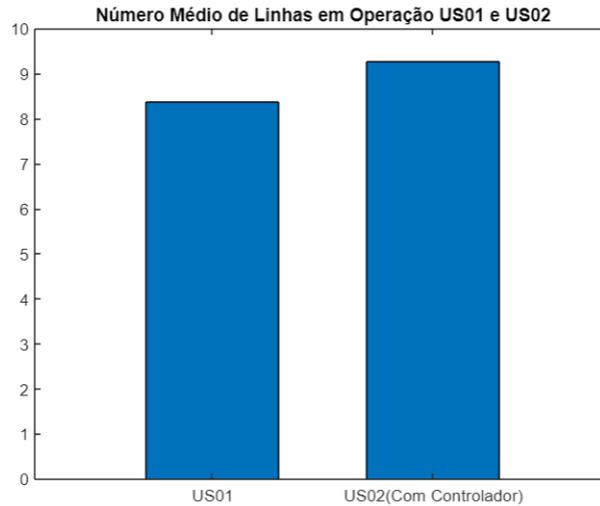


Figura 6.4: Número Médio de Linhas em Operação nas Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

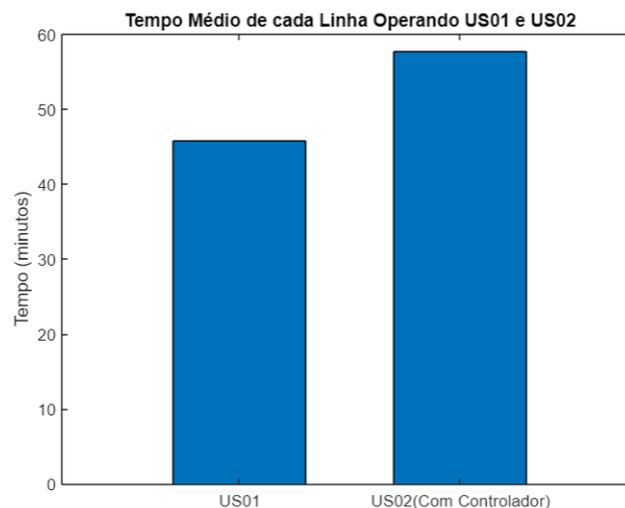


Figura 6.5: Tempo Médio de cada Linhas em Operação nas Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Com o desempenho comprovado na tarefa de maximizar as linhas em operação do controlador *fuzzy*, a próxima etapa é a análise do perfil de velocidade dos alimentadores conforme apresentado na Figura 6.6. Nota-se que os alimentadores da Usina 2, que está com controlador *fuzzy* ligado, operaram bem menos expostos a velocidades mais altas. A compilação dos dados de velocidade pode ser vista na Figura 6.7, na qual é exibida a velocidade média de todos os alimentadores durante o período de avaliação, para as Usinas 01 e 02. Na Usina 02, com o controlador *fuzzy* maximizando as linhas em operação foi possível obter uma redução de 15,84% da velocidade média em relação à Usina 01. Dessa forma comprovando que equilibrando melhor os níveis e reduzindo as paradas de linhas por nível baixo obtemos um efeito positivo que é a redução da velocidade dos alimentadores.

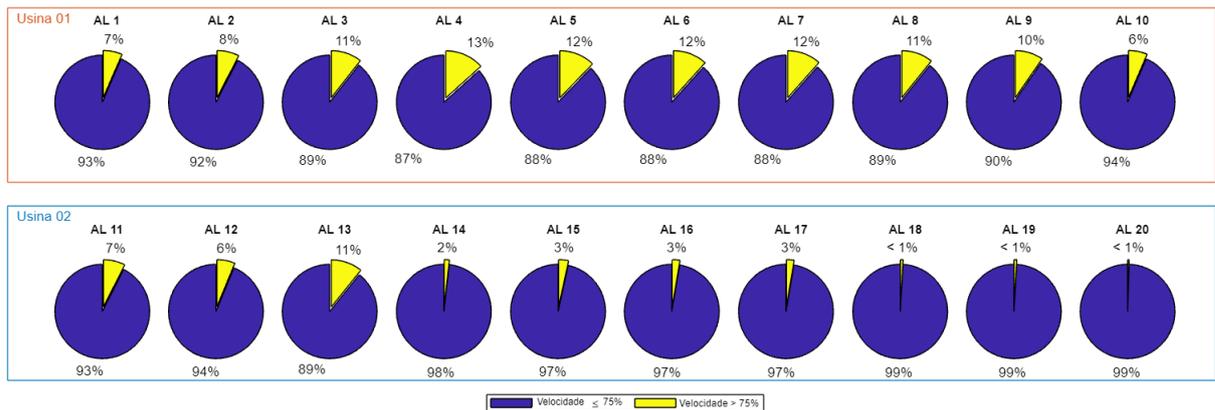


Figura 6.6: Zonas de Velocidades dos Alimentadores das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

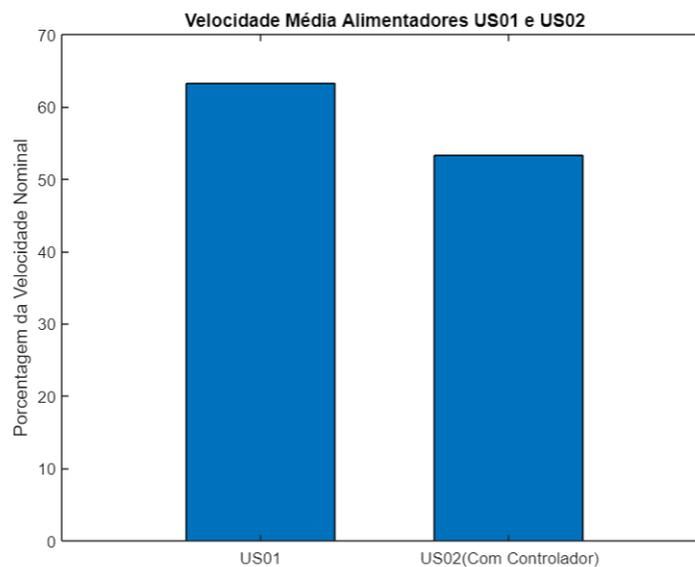


Figura 6.7: Velocidade Média dos Alimentadores das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Seguindo a cadeia dos resultados, após demonstrar ganhos mais diretos como variabilidade de nível, redução da velocidade dos alimentadores e maximização do número de linhas em operação, partimos para avaliar os resultados em indicadores fins de processo, como carga circulante e produtividade. A Figura 6.8 apresenta a porcentagem de carga circulante durante o período de avaliação das Usinas 01 e 02. Observe que a Usina 02 apresentou uma menor carga circulante, 7,66% menor, ganho esse oriundo de um processo de peneiramento mais eficiente, principal objetivo desse trabalho e alcançado com sucesso.

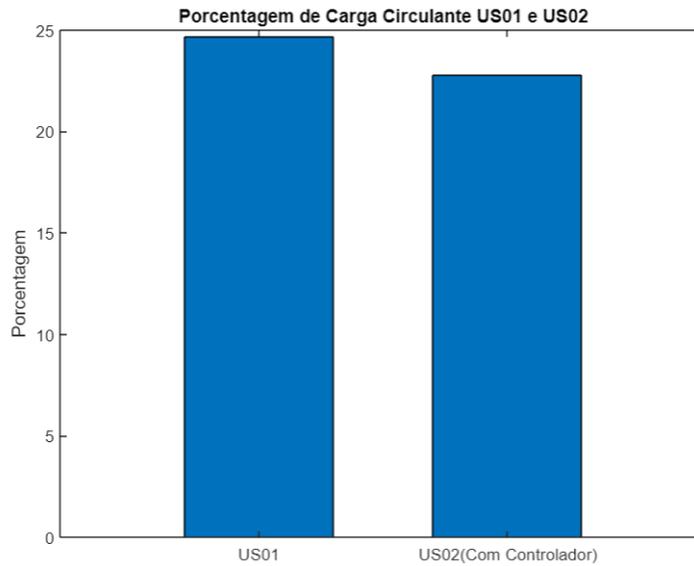


Figura 6.8: % de carga circulante das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

Por fim, a produtividade das Usinas 01 e 02 foi avaliada. Com uma melhor eficiência de peneiramento, já comprovada, é esperado também um ganho de produtividade. A Figura 6.9 apresenta a produtividade das Usinas 01 e 02 para efeito de comparação. A Usina 02 obteve uma produtividade 2,37% maior que a Usina 01, fechando a cadeia de ganhos do controlador.

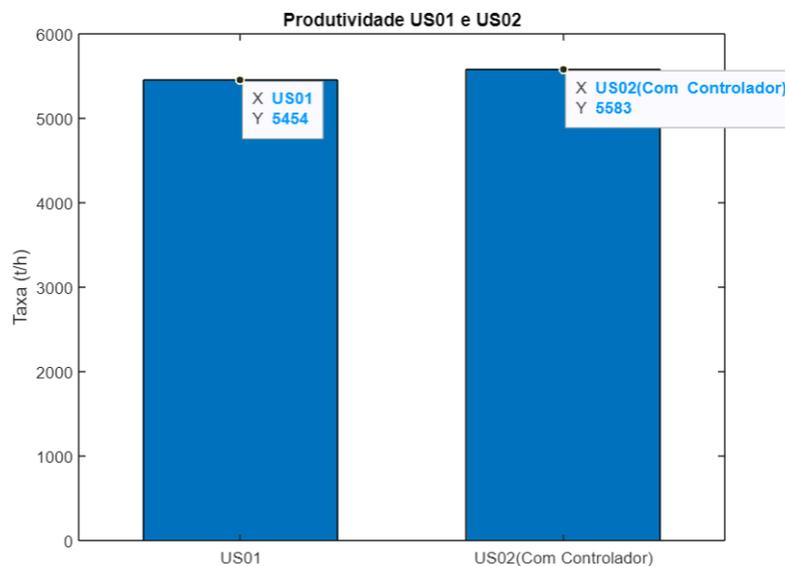


Figura 6.9: Produtividade das Usinas 01 e 02.

Fonte: O autor.

7. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

Essa dissertação demonstra que soluções de controle para aumento de eficiência em processos de peneiramento podem ser aplicadas de forma eficaz. Outra conclusão importante é quanto ao alto grau de aplicabilidade de controladores *fuzzy* dentro da indústria de mineração. Uma ampla gama de processos em ambiente multivariável, não linearidades e ausência de modelos matemáticos da planta favorecem sua aplicação. Além disso, a agilidade de implementação e o avanço da presença de bibliotecas *fuzzy* em SDCDs, também corroboram para sua utilização. Para concluir esse trabalho, são revisitadas nessa seção as perguntas formuladas para o desenvolvimento dessa pesquisa, trazendo as respostas obtidas nessa dissertação:

- O controlador *fuzzy* será capaz de reduzir a variabilidade entre os níveis dos silos?

Sim, os resultados comprovam uma redução significativa da variabilidade, com desvio padrão 14,06% menor.

- O controlador *fuzzy* será capaz de melhorar a distribuição de minério através do desbalanceamento das velocidades dos alimentadores gerando um aumento do número de linhas em operação?

Sim, os resultados comprovam que o controlador *fuzzy* foi capaz de aumentar o número médio de linhas em operação em 10,65%.

- O controlador *fuzzy* será capaz de provocar uma redução na velocidade média dos alimentadores em operação?

Sim, os resultados comprovam que o controlador *fuzzy* foi capaz de obter uma redução de 15,84% na velocidade média dos alimentadores.

- O controlador *fuzzy* será capaz de contribuir para a eficiência de peneiramento gerando uma redução da porcentagem de carga circulante?

Sim, com a maximização das linhas em operação e conseqüente redução da velocidade média dos alimentadores foi possível aumentar a eficiência de peneiramento e obter uma redução de 7,66% na carga circulante.

- O controlador *fuzzy* será capaz de contribuir para um aumento da produtividade?

Sim, com um processo de peneiramento mais eficiente comprovada pela redução da carga circulante foi possível obter um aumento de produtividade de 2,37%.

Baseando-se na pesquisa realizada nessa dissertação, algumas recomendações de trabalhos futuros surgem como o foco na eficiência de peneiramento. A primeira delas, seria estender o controle *fuzzy* para definir mais uma variável manipulada, que é a velocidade do cabeça móvel. Pode ser feito uma comparação do controle atual baseado em regras com o controlador *fuzzy*.

Como o foco na estabilidade das linhas em operação diante de um balanço de massa tão dinâmico, torna interessante um trabalho futuro direcionado ao controle automático das linhas disponíveis para operação. Em resumo, um controlador manipulando automaticamente o número de linhas disponíveis para operar, através das restrições / liberações do curso do cabeça móvel pelos silos. Controlador esse, que a princípio, deve considerar como variáveis de processo o balanço de massa e os níveis dos silos.

Um outro trabalho também interessante seria o desenvolvimento de um sistema especialista para automatizar o ajuste da amplitude de atuação do controlador *fuzzy* desenvolvido nessa dissertação. Conforme mencionado esse ajuste é possível, mas é manual. Uma automatização do mesmo, aumentando a capacidade de atuação do controlador *fuzzy* quando favorável e necessário e diminuindo quando identificadas restrições. Como base para essas decisões podem ser consideradas informações de nível, de potência de peneiramento (grau de dificuldade de peneiramento), carga circulante, entre outras. Em outras palavras, para conferir ao controle mais capacidade de atuação em cenários favoráveis de peneiramento e que exijam uma resposta mais agressiva do controlador.

Referências Bibliográficas

- ALBUQUERQUE, K., SILVA, H., TEODORO, E., et al.. “Averaging level control of bulk solid material using a tripper car”, *IFAC-PapersOnLine*, v. 52, n. 14, pp. 147–152, 2019.
- ASBJÖRNSSON, G. *Crushing plant dynamics*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2015.
- ASBJÖRNSSON, G., BENGTSSON, M., HULTHÉN, E., et al.. “Model of banana screen for robust performance”, *Minerals Engineering*, v. 91, pp. 66–73, 2016.
- CALDAS, F. N., MARTINS, A. X. “Proposed Solutions to the Tripper Car Positioning Problem.” Em: *ICEIS (1)*, pp. 344–352, 2018.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. “Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem”, 2003.
- DAVOODI, A., ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., et al.. “Application of the discrete element method to study the effects of stream characteristics on screening performance”, *Minerals*, v. 9, n. 12, pp. 788, 2019.
- DUARTE, R. A., PINTO, T. V., JÚNIOR, Ê. L., et al.. “Ganhos de Produtividade em um Circuito de Britagem devido à Aplicação de Controle Override”. Em: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, v. 2, 2020.
- EVERTSSON, C. M. *Cone crusher performance*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2000.
- GALERY, R. “Separação por tamanho”, *Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFGM, cap*, v. 4, 2007.
- HULTHÉN, E. *Real-time optimization of cone crushers*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2010.
- HULTHÉN, E., EVERTSSON, C. M. “Algorithm for dynamic cone crusher control”, *Minerals Engineering*, v. 22, n. 3, pp. 296–303, 2009.

- ITÄVUO, P., VILKKO, M., JAATINEN, A., et al.. “Dynamic modeling and simulation of cone crushing circuits”, *Minerals Engineering*, v. 43, pp. 29–35, 2013.
- ITÄVUO, P., HULTHÉN, E., VILKKO, M. “Feed-hopper level estimation and control in cone crushers”, *Minerals Engineering*, v. 110, pp. 82 – 95, 2017. doi: 10.1016/j.mineng.2017.04.010.
- ITÄVUO, P., HULTHÉN, E., YAHYAEI, M., et al.. “Mass balance control of crushing circuits”, *Minerals Engineering*, v. 135, pp. 37 – 47, 2019. doi: 10.1016/j.mineng.2019.02.033.
- KARELOVIC, P., PUTZ, E., CIPRIANO, A. “A framework for hybrid model predictive control in mineral processing”, *Control Engineering Practice*, v. 40, pp. 1–12, 2015.
- KING, R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2001.
- PASSINO, K. M., YURKOVICH, S., REINFRANK, M. *Fuzzy control*, v. 42. Citeseer, 1998.
- REZNIK, L. *Fuzzy controllers handbook: how to design them, how they work*. Elsevier, 1997.
- ROSS, T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 2009.
- SANTOS, M. S., PINTO, T. V., JÚNIOR, Ê. L., et al.. “Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 94, pp. 103789, 2020.
- WILLS, B. “NAPIER-MUNN. 2006: Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery”. 2006.