



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**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 AUTOMÁTICO DO PESO DE MATERIAL NO MOINHO SEMI
AUTÓGENO (SAG) EM SOSSEGO**

Thomás Vargas Barsante e Pinto

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2020**

Thomás Vargas Barsante e Pinto

**CONTROLE AUTOMÁTICO DO PESO DE MATERIAL NO MOINHO SEMI
AUTÓGENO (SAG) EM SOSSEGO**

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.

Coorientador: Profa. Iranildes Daniel dos Santos,
D.Sc.

Ouro Preto
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B282c Barsante e Pinto, Thomas Vargas .
Controle Automático do Peso de Material no Moinho Semi Autógeno (SAG) em Sossego. [manuscrito] / Thomas Vargas Barsante e Pinto. - 2020.

62 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Coorientadora: Dra. Iranildes Daniel dos Santos.

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 Minerais.

1. controle regulatório avançado (ARC). 2. Moinho Semi Autógeno (SAG). 3. Simulação (Computadores) - Simulação dinâmica. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Santos, Iranildes Daniel dos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. 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

Thomás Vargas Barsante e Pinto

Controle Automático do Peso de Material no Moinho Semi Autógeno (SAG) em Sossego

Membros da banca

Thiago Antonio Melo Euzébio – Doutor - Instituto Tecnológico Vale Mineração
Iranildes Daniel dos Santos – Doutora - Instituto Tecnológico Vale
Márcio Feliciano Braga – Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Andrei Giordano Holanda Battistel – Doutor - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Adrielle de Carvalho Santana – Mestra - Universidade Federal de Ouro Preto
Gabriel Carvalho Garcia – Mestre - VALE

Versão final

Aprovado em 04 de Setembro de 2020

De acordo,

Aginaldo José da Rocha Reis.



Documento assinado eletronicamente por **Aginaldo Jose da Rocha Reis, COORDENADOR(A) DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROC DE MINERAÇÃO**, em 17/11/2020, às 16:15, 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 **0103474** e o código CRC **AF079F17**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008707/2020-11

SEI nº 0103474

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

*À minha querida tia Deija
(in memoriam).*

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar clareza nas minhas decisões e por seu meu guia durante esta caminhada e todas as outras.

Agradeço aos meus pais, Ademar e Lécia, pelo suporte incondicional. Por não medir esforços em me apoiar, aconselhar e ajudar em todos os momentos que precisei.

Agradeço aos meus irmãos, Arthur e Matheus, pela amizade e companheirismo eterna.

Agradeço à minha noiva, Rogéria, pelo amor e por ter me apoiado e animado em todos meus momentos de dúvida.

Agradeço à toda minha família, a base de tudo, pela união e amor.

Agradeço a todos meus amigos, os de velha data, os que caminham comigo desde a graduação, e os que o mestrado/ITV me trouxe, pela parceria, amizade e momentos de alegria.

Agradeço ao Instituto Tenconógico Vale e Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade de ter feito o mestrado no programa PROFICAM e pela excelente qualidade de ensino.

Agradeço ao meu orientador Thiago Euzébio, pela confiança, suporte e ensinamentos que me ajudam a crescer tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*“Feliz aquele que transfere o que
sabe e aprende o que ensina”
(Cora Coralina)*

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 AUTOMÁTICO DO PESO DE MATERIAL NO MOINHO SEMI AUTÓGENO (SAG) EM SOSSEGO

Thomás Vargas Barsante e Pinto

Setembro/2020

Orientadores: Thiago Antonio Melo Euzébio
Iranildes Daniel dos Santos

Na indústria mineral, moinhos são equipamentos utilizados em processos de cominuição para reduzir a granulometria do minério lavrado. A eficiência de moagem de um moinho é extremamente sensível às variáveis do processo, principalmente a variabilidade do peso de material em seu interior. Neste trabalho são apresentadas estratégias de controle regulatório avançadas para redução da variabilidade do peso de um moinho SAG. As estratégias implementadas são um controlador cascata, um controlador *feedforward* e um controlador *fuzzy*. Todas elas foram desenvolvidas e validadas em um simulador dinâmico construído com base em dados reais de um circuito de moagem. Resultados simulados e práticos indicaram que o uso dessas estratégias de controle pode gerar ganhos diversos a uma usina, como aumento de produção, aumento da estabilidade do circuito e redução do consumo energético.

Palavras-chave: controle regulatório avançado, moinho SAG, simulação dinâmica.

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 Sossego.

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.)

AUTOMATIC MATERIAL WEIGHT CONTROL AT SEMI AUTOGENOUS (SAG) MILL IN SOSSEGO

Thomás Vargas Barsante e Pinto

September/2020

Advisors: Thiago Antonio Melo Euzébio
Iranildes Daniel dos Santos

In the mineral industry, mills are equipment used in comminution processes to reduce the ore mined granulometry. The milling efficiency of a mill is extremely sensitive to process variables, especially material load variability. This work presents advanced regulatory control strategies to reduce the load variability of a SAG mill. The implemented strategies are a cascade controller, a feedforward controller and a fuzzy controller. All of them were developed and validated in a dynamic simulator built based on real data from a milling circuit. Simulated and practical results indicate that the use of these control strategies can generate several gains for a plant, such as increased production, increased circuit stability, and reduced energy consumption.

Keywords: advanced regulatory control, SAG mill, dynamic simulation.

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Analysis and Design of Advanced Control Systems; **Theme:** Variability Reduction and Control Improvement; **Related Area of Vale:** Sossego's Plant.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Variação e taxa média do SAG.	15
Figura 3.1	Regime Cascata, Catarata e Centrifugado (da esquerda pra direita).	21
Figura 3.2	Seções típicas de moinhos AG/SAG.	23
Figura 3.3	Moinho SAG de (a) alta proporção e (b) quadrado	23
Figura 3.4	Efeito de k no cálculo do fator de correção da taxa de quebra do moinho. . .	25
Figura 3.5	Efeito de V_o no cálculo do fator de correção da taxa de quebra do moinho. .	25
Figura 3.6	Efeito de k na produção do moinho.	26
Figura 3.7	<i>Toe angle</i> e <i>shoulder angle</i>	26
Figura 3.8	Potência consumida pelo volume de carga no moinho.	27
Figura 3.9	Circuito de Moagem SAG e Rebritagem de Sossego.	28
Figura 3.10	Moinho SAG da usina de Sossego.	28
Figura 4.1	Interface gráfica do simulador da Moagem de Sossego no <i>software</i> IDEAS. .	30
Figura 4.2	Validação do (a) moinho SAG e (b) britador simulados.	33
Figura 4.3	Estrutura MIMO do circuito de Sossego.	34
Figura 4.4	Sistema típico de controle em cascata.	35
Figura 4.5	Estratégia de Controle Cascata Proposta.	36
Figura 4.6	Sistema típico de controle <i>feedforward</i>	37
Figura 4.7	Estratégia de Controle Cascata + <i>Feedforward</i> proposta.	38
Figura 4.8	Comparação de lógica clássica e lógica <i>fuzzy</i>	39
Figura 4.9	Estrutura completa de um controlador <i>fuzzy</i>	40
Figura 4.10	Desconfiguração da pilha pulmão por uso indevido do alimentador central. .	40
Figura 4.11	Diagrama do controle <i>fuzzy</i> proposto.	41
Figura 4.12	Zonas de atuação do controle <i>Fuzzy</i>	41
Figura 4.13	Funções de pertinência das variáveis de (a) entrada e (b) saída.	42
Figura 4.14	Controlador proposto no padrão ABB.	43
Figura 4.15	Diagrama de controle proposto.	43
Figura 5.1	Granulometria do material novo nas simulações.	44
Figura 5.2	Comparação de peso do moinho SAG e taxa retirada da pilha com uso de estratégias de controle.	45

Figura 5.3	Comparação boxplot entre desempenho de estratégias.	46
Figura 5.4	Granulometria do material extraído pelos ALs (a) central e (b) laterais. . . .	47
Figura 5.5	Taxa de material retirado pelos alimentadores no (a) caso 1 e (b) caso 2. . .	47
Figura 5.6	Granulometria da alimentação nova.	48
Figura 5.7	Comparação de peso do moinho SAG e taxa retirada da pilha com uso de estratégias de controle.	48
Figura 5.8	Função distribuição de probabilidade do peso - Com e sem uso de controla- dor <i>fuzzy</i>	49
Figura 5.9	Equipe do ITV e de Sossego em reunião discutindo possíveis estratégias de controle a serem aplicadas ao SAG.	50
Figura 5.10	Peso do SAG e taxa de minério novo retirado da pilha - Resultado da ação do controlador.	51
Figura 5.11	Velocidade dos Alimentadores.	51
Figura 5.12	Status de funcionamento dos ALs ao longo do tempo.	52
Figura 5.13	Peso do SAG e Taxa de minério novo retirado da pilha - Resultado da ação de Operadores.	52
Figura 5.14	Velocidade dos Alimentadores.	53
Figura 5.15	Status de funcionamento dos ALs ao longo do tempo.	53
Figura 5.16	Função distribuição de probabilidade do peso - com uso do controlador e sob comando do operador.	54
Figura 5.17	Função distribuição de probabilidade da taxa de minério - com uso do con- trolador e sob comando do operador.	54

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Funções de calibração do moinho SAG simulado.	31
Tabela 4.2	Função de classificação do britador simulado.	32
Tabela 4.3	Parâmetros de sintonia dos controladores da estratégia cascata.	37
Tabela 4.4	Parâmetros de sintonia do controlador <i>feedforward</i>	38
Tabela 5.1	Ajuste de sintonia de controladores em teste na planta real.	50

Lista de Siglas e Abreviaturas

AG Autógeno

AL Alimentador

ARC *Advanced Regulatory Control*

EET Energia Específica de Tamanho

IDEAS *Integrated Design Engineering with Advanced Simulation*

MPC *Model predictive control*

OPC *Open platform communications*

PLC *Programmable logic controller*

PSD *Particle Size Distribution*

SAG Semi autógeno

WI *Work Index*

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Contexto	14
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Perguntas	16
1.5	Publicações	17
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	Artigos Científicos	18
2.2	Patentes	20
3	O Processo de Moagem SAG	21
3.1	O Processo de Moagem	21
3.2	Moinhos AG/SAG	22
3.3	Modelos de funcionamento do SAG	24
3.3.1	Modelo de taxa de quebra de minério no moinho SAG	24
3.3.2	Modelo do consumo energético do moinho SAG	26
3.4	Circuito de Moagem SAG e Rebritagem de Sossego	27
4	Desenvolvimento da Estratégia de Controle	29
4.1	Calibração de Modelos e Simulação Dinâmica do Processo de Moagem em Sossego	29
4.2	Estratégia de Controle	33
4.2.1	Controle Cascata	34
4.2.2	Controle <i>Feedforward</i>	37
4.2.3	Controle Fuzzy	38
4.2.3.1	Estrutura Fuzzy para controle em Sossego	40
4.3	Integração com PLC ABB	42
5	Resultados e Discussões	44

5.1	Resultados da Aplicação da Proposta de Controle na	
	Planta Simulada de Sossego	44
5.1.1	Controlador Regulatório Avançado	44
5.1.2	Controlador <i>Fuzzy</i>	46
5.2	Resultados da Aplicação da Proposta de Controle na	
	Planta Real de Sossego	49
5.2.1	Ação do Controlador	50
5.2.2	Ação do Operador	52
5.2.3	Discussão de resultados	53
6	Conclusão	55
6.1	Trabalhos Futuros	56
	Referências Bibliográficas	57
	Apêndices	61
A	Matriz de quebra do britador simulado	62

1. Introdução

1.1. Contexto

Britagem e moagem são processos de cominuição na indústria mineral. São muitas as diferenças entre eles, a britagem utiliza britadores e a moagem utiliza moinhos como equipamentos de quebra; na britagem o minério é quebrado pelo impacto de uma parte rígida do britador no material, já na moagem, a forma de quebra se dá pelo conjunto de impacto, atrito e abrasão entre minério e corpos moedores; a britagem é geralmente feita a seco, enquanto a moagem é feita a úmido (WILLS e FINCH, 2015).

Ambos esses processos se controlados por sistemas automáticos apresentam melhor desempenho do que se controlados por um operador humano. O operador possui inúmeras atribuições, monitorar, avaliar e controlar diferentes processos, todos ao mesmo tempo. Aliado a isso, a complexidade dos processos e os distúrbios inerentes a eles tornam difícil para o operador tomar decisões que respeitem suas restrições e aspectos. Muitas ações do operador humano podem ser tardias, inadequadas ou conservadoras demais. Segundo Brann *et al.* (1996), a tendência de automatização dos processos fará com que o operador deixe de intervir e monitorar os processos para se tornar um gestor de exceções.

O uso de estratégias de controle automáticas gera ganhos para o processo. Esses ganhos aparecem em diferentes aspectos: aumento da estabilidade da planta; redução da variabilidade das variáveis de processo; manutenção das variáveis de processo em um ponto próximo ao limite, o que geralmente acarreta maiores ganhos de produção; aumento da vida útil dos equipamentos devido à redução de paradas desnecessárias; redução no consumo energético; aumento da produção final.

A mina de Sossego é a primeira mina de cobre da Vale e faz parte do segmento de Metais Básicos. Ela está localizada no município de Canaã dos Carajás - PA, a 70 km de Carajás. Próximo a ela está localizada a usina de Sossego, composta pelos circuitos de cominuição, flotação e desaguamento. A produção de concentrado atual da usina é cerca de 30 mil toneladas por mês.

O circuito de cominuição da usina de Sossego contém um moinho semi autógeno (SAG), que é o principal equipamento do circuito. Quaisquer regulagens feitas nos demais equipamentos são realizadas de forma a garantir a maior produtividade do moinho. Garantir um desempenho adequado do SAG, em outras palavras, garantir que o peso de material em seu interior seja estável é essencial, visto que isso influencia na taxa horária de produção da planta.

Neste trabalho será demonstrado um sistema de controle automático baseado em estratégias de controle regulatório avançado (*Advanced Regulatory Control* - ARC) e um controlador *fuzzy*. Este sistema é capaz de aumentar a produção final da usina de Sossego ao ajustar automaticamente a distribuição granulométrica do minério retirado da pilha pulmão e reduzir a variabilidade do peso de minério do moinho SAG.

Os capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte maneira: O Capítulo 1 mostra, além do contexto no qual o trabalho desenvolvido está inserido, quais foram as motivações e objetivos que nortearam as atividades realizadas. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica de artigos científicos e patentes publicados na área de controle de moagem SAG. No Capítulo 3, o processo de moagem e o funcionamento de moinhos são detalhados, com foco maior no moinho SAG, principal objeto de estudo deste trabalho. No Capítulo 4 são apresentadas as três estratégias de controle desenvolvidas, bem como as etapas de criação do modelo digital usado para validação das estratégias. O Capítulo 5 mostra resultados simulados e práticos da aplicação das estratégias de controle propostas. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

1.2. Motivação

A Figura 1.1 apresenta a relação entre a variabilidade do peso do moinho SAG com a produção horária do circuito de moagem SAG. Os dados foram levantados pela equipe de processos da usina de Sossego por quatro meses, período no qual foi calculado o desvio padrão (σ) do peso e a taxa horária do circuito. A relação entre esses dois parâmetros é inversa. Nos períodos em que o desvio padrão do peso foi menor, meses 01 e 04, a produção horária da usina alcançou valores maiores e, no mês com maior desvio padrão, mês 03, a produção foi a mais baixa. A relação entre o peso de um moinho SAG e sua produção horária é estudada nos trabalhos de Van Nierop e Moys (2001) e Apelt *et al.* (2001).

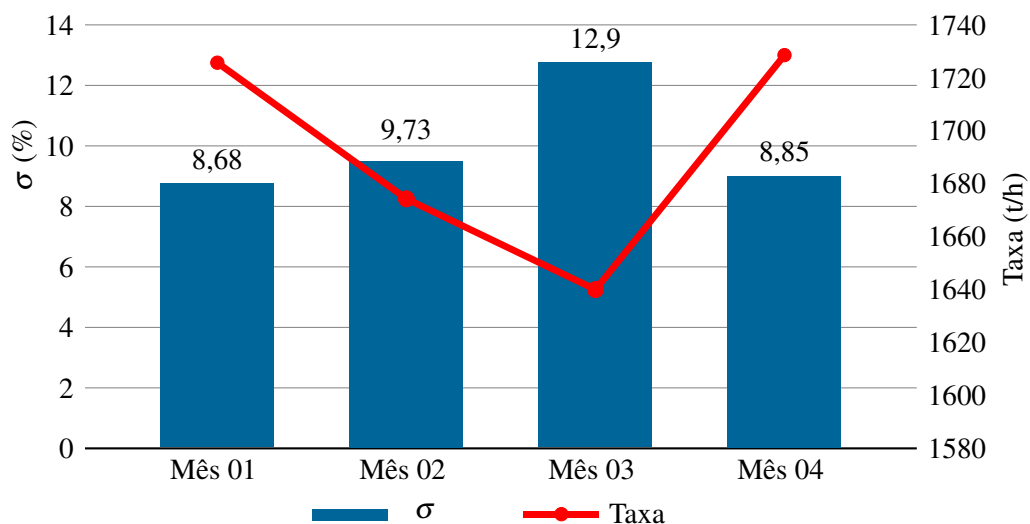


Figura 1.1: Variação e taxa média do SAG.

A variabilidade de peso no interior do moinho SAG pode também aumentar a frequência de manutenção do equipamento. Se o volume de preenchimento do moinho for inadequado, por exemplo se houver excesso de material, à medida que o moinho rotaciona, o material em seu interior irá se chocar contra a própria carcaça, desgastando o revestimento do equipamento

e reduzindo seu tempo de vida útil. Paradas para manutenção possuem um custo monetário inerente ao serviço, interrompem a atividade do circuito e reduzem a produção final da planta.

Atualmente a quantidade de material no SAG é controlada pela ação do operador humano na sala de controle. A estratégia é buscar o máximo de taxa nova, taxa de material retirado da pilha pulmão, ao passo em que o peso do SAG é monitorado. Essa estratégia provoca uma variabilidade alta no peso do SAG e, consequentemente, reduz a eficiência do moinho. Ela provoca também um desequilíbrio na retirada de taxa nova, uma vez que o alimentador (AL) central é sempre o mais utilizado por retirar o minério mais fino da pilha. Outra fragilidade dessa estratégia é ser dependente da experiência e conhecimento do operador do turno, ou seja, não há uma padronização da operação.

1.3. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: aumentar a produção do circuito de moagem SAG e rebritagem da usina de Sossego por meio do controle automático do peso de material no interior do moinho SAG; e ajustar a distribuição granulométrica do material retirado da pilha pulmão utilizando um controlador *fuzzy*.

Objetivos específicos:

- Criar um modelo digital do circuito de moagem SAG e rebritagem da usina de Sossego;
- Validar o modelo digital com dados reais da planta;
- Desenvolver uma estratégia de controle regulatório avançado para o controle do peso do material no interior do SAG;
- Validar o sistema de controle em simulações no modelo digital;
- Aplicar o sistema de controle desenvolvido na planta real;
- Desenvolver um controlador *fuzzy* para ajustar a retirada de material da pilha pulmão;
- Validar o controlador *fuzzy* em simulações no modelo digital.

1.4. Perguntas

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

1. É possível projetar um controlador simples e eficaz capaz de reduzir a variabilidade do peso de material no SAG?
2. O quanto a estabilidade no peso de material no SAG aumenta a produtividade do circuito?

3. Qual o impacto do uso do controlador no consumo energético do SAG?
4. O controlador *fuzzy* melhorou a distribuição granulométrica do material retirado da pilha pulmão?

1.5. Publicações

Abaixo são listadas as publicações de trabalhos científicos realizados ao longo do período do mestrado. Elas não se limitam às atividades que envolveram diretamente este trabalho.

- Relatório técnico intitulado “Resultado Parcial da Aplicação do Controle Automático do Peso de Material no Moinho SAG em Sossego” entregue à equipe da usina de Sossego acerca da aplicação do sistema de controle na planta (EUZÉBIO *et al.*, 2019);
- Relatório técnico intitulado “Simulação dos Efeitos de Substituição dos Britadores CH660 por Britadores CH860 na Britagem Terciária de S11D” entregue à equipe da usina de S11D acerca da simulação referente à troca de britadores na planta (DUARTE *et al.*, 2019);
- Relatório técnico intitulado “Simulação Dinâmica da Área 2012 de S11D: Suporte à Decisão na Alteração da Lógica de Controle e Repotenciamento do Cabeça Móvel” entregue à equipe da usina de S11D acerca das simulações referentes à decisão de alteração na lógica de controle do cabeça móvel da área 2012 de S11D (DUARTE *et al.*, 2020);
- Artigo intitulado “Sistema de Controle no Processo de Flotação: Teoria e Considerações Práticas” apresentado na 4ª edição da ABM WEEK, 2018 (PINTO e EUZÉBIO, 2018);
- Artigo intitulado “Aplicação de *Simheuristic* para Operação Eficiente de um Circuito de Britagem” apresentado no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente 2019 (SANTOS *et al.*, 2019);
- Artigo intitulado “*Simheuristic-Based Decision Support System for Efficiency Improvement of an Iron Ore Crusher Circuit*” publicado no periódico *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (SANTOS *et al.*, 2020);
- Patente BR1020200048546, depositada em 11/03/2020, intitulada “Sistema e Método para Controlar um Circuito de Cominuição Incluindo um Moinho”;

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão acerca de aplicações de técnicas de controle em processos de moagem. As referências foram divididas entre artigos científicos e patentes.

2.1. Artigos Científicos

Wei e Craig (2009) realizaram um estudo sobre o uso de sistemas de controle em processos de moagem, quais as principais variáveis controladas e quais os principais ganhos que estes sistemas acarretam ao processo. Ao final do estudo, 71% dos participantes indicam como principal ganho a melhoria na estabilidade do processo e 63% utilizam controladores PID como principal tecnologia de controle. Um estudo semelhante levanta dados quantitativos dos benefícios do uso de sistemas de controle em processos de moagem (BOUFFARD, 2015).

Apesar da alta complexidade inerente aos processos de moagem, diferentes autores apresentam modelos matemáticos destes circuitos (AUSTIN *et al.*, 1986; MORRELL, 2004; SALAZAR *et al.*, 2009). Estes modelos podem ser usados para estudo do uso de sistemas de controle. Herbst *et al.* (1992) desenvolveram algumas estratégias de controle baseadas em modelos matemáticos para diferentes processos minerais. Três dessas estratégias foram desenvolvidas para serem aplicadas em circuitos de moagem. Na primeira, a taxa de material inserida no moinho é manipulada de forma a manter um consumo de energia em um valor desejado. Na segunda, o intuito é controlar o volume de polpa e granulometria do material que sai do moinho por meio da manipulação da taxa de material que o alimenta e da adição de água. Na terceira, a taxa de material é manipulada de forma a aumentar a produção mantendo o produto do moinho em uma granulometria aceitável. Nenhuma das três estratégias apresentadas considerou a granulometria do material inserido no moinho como variável de perturbação.

Assim como modelos matemáticos, simuladores dinâmicos também são usados para desenvolvimento de estratégias de controle. Guerrero *et al.* (2016) discutem a importância de criar e aplicar essas ferramentas. Baseado em simulação, eles utilizaram um controlador PID *override* com o objetivo de garantir uma carga estável no interior de um moinho SAG. As variáveis de controle são o consumo de energia e o peso do moinho, e a variável manipulada é a taxa de alimentação do SAG. Essa mesma estratégia também é aplicada na usina MMG's Century Zinc - Austrália (THORNTON *et al.*, 2005).

Sbarbaro *et al.* (2005) propõem um controlador regulatório MISO aliado a um Preditor de Smith para controle da taxa de alimentação de um moinho SAG. Além do controle de taxa, um segundo objetivo é manter a granulometria do material que alimenta o SAG em uma faixa preestabelecida. Para isso, são manipuladas as velocidades de três alimentadores que retiram material de uma pilha pulmão levando em consideração a diferença de granulometria do material que cada alimentador retira devido à segregação natural da pilha.

Galán *et al.* (2002) utilizam controladores regulatórios PID para controle de um moi-

inho SAG. A estratégia usada consiste em uma malha *feedback* e uma malha *feedforward*. A variável de controle definida é o consumo energético do moinho e a variável manipulada é a taxa de alimentação. O distúrbio medido e usado pelo controle *feedforward* é a granulometria do material. De forma similar, Maritz *et al.* (2019) desenvolveram um controlador *feedforward* para atuar com base na variação de granulometria do material. Ele mostra como a ação desse controlador melhora o desempenho do sistema de controle por atuar de forma antecipatória à perturbação.

Em Wei e Craig (2009), sistemas especialistas e controladores *fuzzy* foram apontados como uma das principais tecnologias usadas para controle de processos de moagem. Bradford (1992) apresenta o desenvolvimento de um sistema especialista para suporte de decisão em um circuito de moagem em uma usina de ouro na Austrália. O sistema não atua diretamente na planta, o controle das ações ainda está a cargo do operador. A implementação do sistema especialista na planta foi tida como positiva, aumentando o entendimento dos operadores sobre o processo e reduzindo o custo com mão de obra especializada.

van Zyl *et al.* (2013) desenvolveram e aplicaram um controlador *fuzzy* para aprimorar a estabilidade e produção da usina de Kansanshi – Zambia. As variáveis de processo desse sistema são o consumo de energia, peso e ruído do moinho SAG. O ruído emitido pelo moinho indica se os corpos moedores estão se chocando contra a carcaça do equipamento devido a um enchimento inapropriado do moinho. Para controle dessas variáveis, foram manipuladas a taxa de alimentação, a velocidade e a densidade no interior do moinho. A estratégia garantiu um aumento na estabilidade do processo, assim como um aumento na produção de 6%.

Ruel (2013) utilizam um sistema de controle *fuzzy* para melhorar o desempenho de um moinho SAG. O sistema manipula a taxa de alimentação, adição de água e rotação do moinho, granulometria do material, taxa recirculada, potência consumida e densidade do material. O sistema atua em uma planta de níquel no Canadá e obteve uma redução de 8% no consumo energético e um aumento de 8% da taxa de alimentação do minério.

Segundo Garrido e Sbarbaro (2009), o uso de sistemas especialista para controle de moinhos SAG apresentam algumas desvantagens. Para os autores, tais estratégias pecam pela falta de procedimento específico para sintonia de regras e resposta lenta em situações de violação de restrições. Eles desenvolveram um controle preditivo baseado em modelos (MPC, do inglês *model predictive control*) que foi testado em um simulador para verificar a qualidade da estratégia. Com base em testes de alteração de dureza do material, granulometria do material e operação em modo manual, os autores atestam o alto desempenho do controle por maximizar a produção sem violar quaisquer restrições.

Salazar *et al.* (2014) desenvolveram um controle MPC multivariável para moinhos SAG. Eles se baseiam em um modelo que integra representações fenomenológicas e empíricas, além de informações reais do processo. O controle desenvolvido é capaz de manipular diferentes variáveis de forma a garantir que as variáveis controladas, como consumo de energia e nível de enchimento, se mantenham no seu *setpoint*. O trabalho afirma que a principal variável manipu-

lada foi o fluxo de água adicionado, mas também alerta que, na prática, alterações do fluxo de água feitas pelo controlador talvez não sejam factíveis.

Yutronic *et al.* (2010) utilizam uma estratégia de controle MPC baseada em modelos dinâmicos do processo. Algumas das variáveis de processo do controlador são o peso do moinho SAG, o ruído e a potência consumida. Como variáveis manipuladas, o MPC considera a taxa de alimentação, rotação do moinho e porcentagem de sólidos. Os principais ganhos do uso desse sistema foram à redução de consumo energético e aumento da taxa de alimentação.

2.2. Patentes

A patente chinesa CN1903442A, depositada em 26/02/2006, apresenta um outro método de controle para um circuito de cominuição contendo um moinho SAG. O trabalho trata simultaneamente de diferentes malhas de controle, sendo uma delas, de peso. Neste loop, o peso é medido e quando tal valor é diferente do *setpoint* definido, a velocidade do moinho é manipulada de forma que o peso retorne ao ponto desejado. O trabalho, além de não manipular a taxa de adição de material para manter constante o peso do moinho SAG, não considera a granulometria do material que o alimenta.

A patente europeia EP2815813A1, depositada no dia 18/06/2013, e sua correspondente mundial WO2014202276A2, depositada em 07/05/2014, mostram um método de controle ou regulação para circuito de cominuição contendo moinho SAG. O método atua a partir da mediação de peso do moinho, consumo de água, temperatura do material, volume ocupado no interior do moinho, consumo de energia do moinho, dentre outros. Apesar de todas essas variáveis mensuradas pelo sistema, o método não considera a granulometria do material inserido no moinho como variável de perturbação do circuito.

A patente chinesa CN104731005B, depositada em 01/09/2015, descreve um método de controle automático para um moinho SAG, de forma a aumentar a produção. O método do trabalho se propõe a controlar a potência do moinho SAG usando um controlador programável que se baseia na medição de dados pertinentes, como: potência, taxa de inserção de material e taxa de adição de água. Além disso, tal sistema manipula a alimentação de material grosso e fino enviado ao moinho SAG considerando a concentração de moagem do equipamento. O documento, no entanto, não considera em seu método de controle a medição e controle do peso do moinho SAG como forma de aumentar a produção do circuito, nem mesmo a taxa total enviada ao moinho como variável de controle.

A patente CN205042591U, também chinesa, depositada em 21/10/2015, propõe um sistema de controle para um circuito de cominuição com moinho SAG. Ele se baseia na medição de fatores, como: taxa de alimentação, taxa de material recirculado e peso do moinho. A partir dessas leituras, controla o peso pela manipulação da velocidade da correia que transporta material para o interior do moinho. Diferente do sistema aqui proposto, esse trabalho não considera em nenhum momento a granulometria do material como variável pertinente ao sistema.

3. O Processo de Moagem SAG

Este capítulo apresenta uma descrição mais detalhada do processo de moagem, com ênfase no moinho SAG e no circuito de moagem SAG e rebitagem da usina de Sossego, objetos de estudo deste trabalho.

3.1. O Processo de Moagem

O processo de moagem é um tipo de processo de cominuição e tem como objetivo reduzir a granulometria do material até um tamanho adequado para os demais processos de beneficiamento. O principal equipamento do circuito é o moinho, seja ele um moinho de bolas, moinho de barras, moinho vertical, moinho autógeno (AG) ou moinho SAG. A redução do tamanho do minério dentro do moinho é realizada pela ação de mecanismos de fragmentação, chamados corpos moedores, por meio da combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito (CHAVES e PERES, 2003). Os corpos moedores são usualmente bolas de aço ou barras de aço.

O movimento de minério e corpos moedores no interior do moinho apresenta dinâmica variável conforme a velocidade de rotação do equipamento. Para velocidades de rotação baixas, os corpos moedores e minério são elevados até uma certa altura e então, rolam sobre eles mesmos. Esse movimento recebe o nome de regime cascata. À medida que a velocidade de rotação aumenta, além do regime cascata, o regime catarata também ocorre. Ele se caracteriza pelo lançamento dos corpos moedores e minério em um movimento parabólico, os quais caem sobre os outros.

Outro regime passível de ocorrer e evitado ao máximo é o regime centrifugado. À medida que se aumenta a velocidade de rotação do moinho, o material passa a cair sobre o próprio revestimento do equipamento pelo efeito catarata. Aumentando ainda mais a velocidade, chega-se em um ponto em que a carga é centrifugada na carcaça do moinho. Isso acarreta em uma redução significativa da eficiência de moagem, aumenta o desgaste dos corpos moedores e carcaça do moinho e aumenta o consumo energético. A velocidade em que esse efeito ocorre é denominada velocidade crítica. A representação desses regimes é apresentada na Figura 3.1.

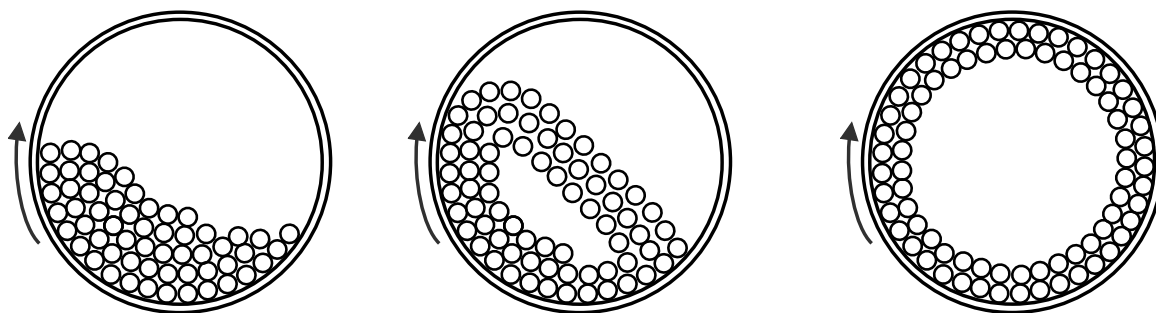


Figura 3.1: Regime Cascata, Catarata e Centrífugado (da esquerda pra direita).

O volume do moinho preenchido pelo material, chamado de volume de carga, composto por corpos moedores, minério e polpa, tem forte influência sobre outros aspectos do processo. O volume de carga é diretamente relacionado ao peso do moinho, um aumento no volume de carga acarreta em um aumento do peso, e uma redução do volume de carga reduz o peso do equipamento. O volume de carga ótimo indica o ponto de maior consumo energético (VAN NIEROP e MOYS, 1997). Diferentes trabalhos consideram essa variável para modelagem de aspectos do processo de moagem (KIME, 2016; YIN *et al.*, 2017).

Na indústria mineral, o processo de cominuição, especialmente a moagem, é o principal consumidor de energia, sendo responsável por cerca de 53% do consumo total (SILVA e CASALI, 2015). A energia requerida para fragmentar o minério depende principalmente do tipo de minério cominuído. Dois parâmetros são usualmente utilizados como indicadores da energia necessária para moagem de materiais: *Work Index* (WI) e Energia Específica de Tamanho (EET), representados pelas Equações 3.1 e 3.2 respectivamente.

$$WI = \frac{E_o}{\frac{10}{(d_{80}^P)^{1/2}} - \frac{10}{(d_{80}^F)^{1/2}}}, \quad (3.1)$$

$$EET_d = \frac{E_o}{\frac{P_d}{100} - \frac{F_{150}}{100}}, \quad (3.2)$$

em que E_o é a energia operacional medida no eixo pinhão do moinho, d_{80}^P é o d80 do produto, d_{80}^F é o d80 da alimentação, P_d é o percentual passante em $d \mu m$ no produto, F_d é o percentual passante em $d \mu m$ na alimentação.

O WI é a energia requerida para reduzir 1 tonelada de material até 80% passante em 100 μm . O EET é energia requerida para reduzir 1 tonelada de material com percentual passante em uma determinada malha. O minério de cobre beneficiando na usina de Sossego tem uma alta resistência à fragmentação, seu WI é de 16 kWh/t . Comparado com o ferro, que possui um WI de 12 kWh/t , a cominuição de partículas de cobre é mais custosa.

3.2. Moinhos AG/SAG

Moinhos AG/SAG são equipamentos de moagem nos quais a ferramenta de fragmentação é, principalmente, o próprio material processado. O moinho AG funciona sem a adição de bolas de aço. Já o moinho SAG conta com uma pequena quantidade de bolas de aço para auxiliar na cominuição do material. Essas características reduzem os custos de operação desses equipamentos (GUPTA e YAN, 2016) e os tornam mais aptos a trabalhar com materiais não ferrosos (SBARBARO *et al.*, 2005).

Esses dois tipos de moinhos são usualmente usados para substituir os dois últimos estágios da britagem, secundário e terciário. Isso gera vantagens aos circuitos que os utilizam, como: diminuição do consumo de aço dos corpos moedores, menor custo de investimento

e capacidade de trabalhar uma variedade maior de minérios (WILLS e FINCH, 2015).

A Figura 3.2 mostra as seções típicas de moinhos AG/SAG. Eles são compostos de uma carcaça na qual são adicionados o material a ser cominuído, os corpos moedores (no caso do SAG) e água. A grelha é o sistema de descarga usualmente utilizado. Ela permite que apenas partículas de dimensões apropriadas deixem o equipamento. Um removedor de polpa é posicionado entre a grelha e a tampa, cuja função é elevar o material até o cone de descarga.

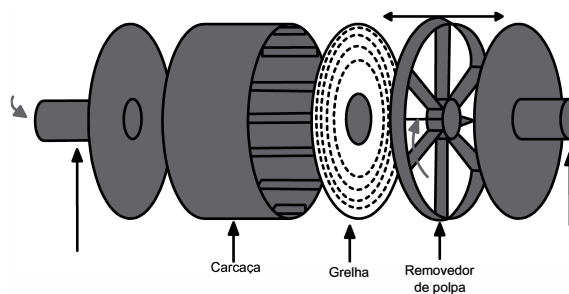


Figura 3.2: Seções típicas de moinhos AG/SAG.
Fonte: Latchireddi (2002).

A relação entre o diâmetro e o comprimento dos moinhos AG/SAG define a proporção do equipamento e os categoriza em moinhos de alta proporção, moinhos quadrados ou moinhos de baixa proporção. Os dois primeiros tipos podem ser vistos na Figura 3.3. Moinhos de alta proporção apresentam diâmetro 1,5 a 3 vezes maior que o comprimento, moinhos quadrados possuem um diâmetro aproximadamente igual ao comprimento, e os moinhos de baixa proporção possuem um comprimento cerca de 1,5 a 3 vezes maior que o diâmetro do equipamento (WILLS e FINCH, 2015).

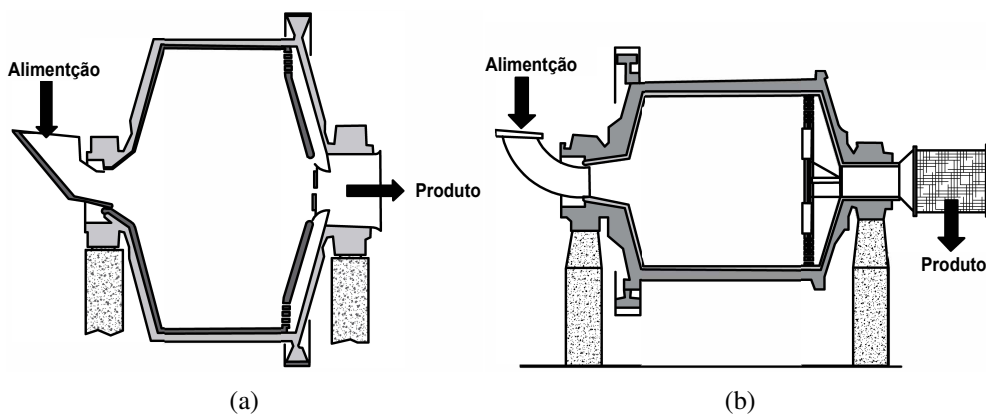


Figura 3.3: Moinho SAG de (a) alta proporção e (b) quadrado
Fonte: Gupta e Yan (2016).

A proporção entre as dimensões do moinho deve ser considerada durante o projeto do equipamento no circuito. Ela influencia no comportamento de parâmetros inerentes ao processo. Morrell (2007) apresenta a relação entre a proporção das dimensões do moinho e sua eficiência energética.

Moinhos AG/SAG são mais influenciados pela granulometria e dureza do material que os alimenta quando comparados com moinhos de bola ou de barras, visto que a principal ferramenta de quebra é o próprio minério. Segundo Morrell e Valery (2001), a granulometria do material que alimenta o moinho SAG é um dos principais parâmetros que influencia o desempenho do equipamento. Essa característica reflete no consumo de energia dos equipamentos por impactar no volume de carga no moinho (VAN NIEROP e MOYS, 2001). Em moinhos AG/SAG, o consumo energético varia consideravelmente ao longo do tempo, enquanto que para moinhos de bolas ou de barras, esse parâmetro é relativamente estável (WILLS e FINCH, 2015).

3.3. Modelos de funcionamento do SAG

A construção de modelos quantitativos de operações unitárias da indústria mineral é uma tarefa desafiadora devido à complexidade do funcionamento dos equipamentos. Esses modelos representam as interações entre variáveis por meio de análises físicas e químicas do processo. Eles podem ser usados para criar simulações mais realistas para treinamento e teste de sistemas de controle (CARVALHO e TAVARES, 2014; KING, 2001). A seguir são apresentados dois modelos de operação do moinho SAG presente no simulador dinâmico IDEAS utilizado neste trabalho.

3.3.1. Modelo de taxa de quebra de minério no moinho SAG

A relação da taxa de produção de um moinho SAG e o volume de carga é uma função complexa que envolve a quebra do minério, o tempo de retenção do material, a taxa de fluxo através da grade e das propriedades de classificação da grade. De acordo com Morrell (2009), um aumento no volume de carga no SAG diminui a produção devido à redução da taxa de quebra do minério. Com a moagem do minério menos eficiente, o tempo de residência do material no moinho aumenta e a taxa de material que alimenta o SAG precisa ser reduzida. No *software* IDEAS, esse fenômeno pode ser ajustado ao usar a Equação 3.3 para definir um fator de correção a ser aplicado às funções de quebra do moinho.

$$R = R_o(1 - k(V_f - V_o)^n), \quad (3.3)$$

em que R é o fator de correção, R_o é a taxa de quebra ajustada ao projeto do moinho, k é um fator de sintonia, V_f é o volume de carga no moinho [%], V_o é uma referência de volume de carga [%], n é um expoente ajustado automaticamente para manter a taxa de quebra entre 0,1 e 1,0. Essa correção é aplicada para volumes de carga entre 0 e 50% do volume do moinho. Acima de 50%, a redução da taxa de quebra no *software* é mantida constante em 10% da taxa de quebra original.

As Figuras 3.4 e 3.5 exemplificam a relação do fator de correção da taxa de quebra do moinho com os fatores k e V_o da Equação 3.3. Esses parâmetros podem ser ajustados para que o comportamento do moinho simulado seja semelhante ao real.

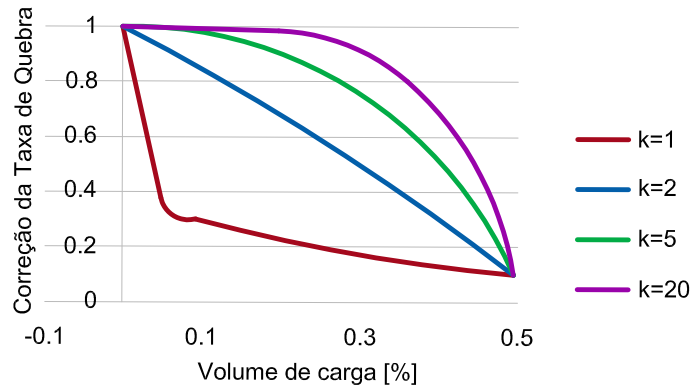


Figura 3.4: Efeito de k no cálculo do fator de correção da taxa de quebra do moinho.

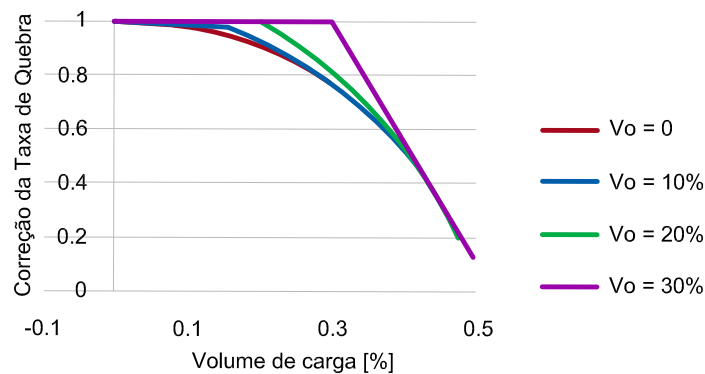


Figura 3.5: Efeito de V_o no cálculo do fator de correção da taxa de quebra do moinho.

O coeficiente k , na Figura 3.4, controla o quão rápido o aumento no volume de carga reduz a taxa de quebra. À medida que k assume valores menores, o valor da correção aplicada à curva de taxa de quebra decresce mais acentuadamente, atingindo valores próximos de 0 mais rápido. Para $k = 2$ a relação entre as variáveis é quase linear. Já na Figura 3.5, V_o define o volume de carga mínimo abaixo do qual a redução na taxa de quebra não acontece. Quanto maior o valor desse parâmetro, maior é a faixa de volume de carga que ocupa o moinho sem que haja redução de eficiência de quebra do minério.

A Figura 3.6 mostra a relação entre o volume de carga no SAG e a produção de um moinho em que $V_o = 0$. A curva azul escura, "sem correção", representa um comportamento ideal da produção do moinho em que não há redução da taxa de quebra. As demais curvas demonstram o efeito do parâmetro ' k ' da Equação 3.3 na taxa de produção.

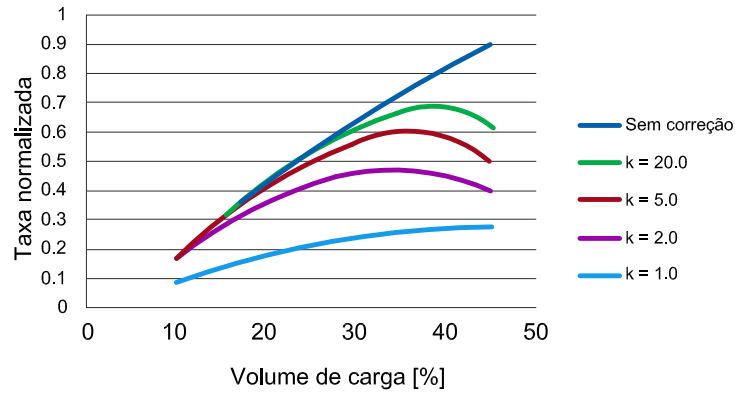


Figura 3.6: Efeito de k na produção do moinho.

3.3.2. Modelo do consumo energético do moinho SAG

A energia consumida pelo moinho SAG durante o funcionamento é afetada pela variação do volume de carga no moinho. Quando a quantidade de material no interior do equipamento altera, a posição dos ângulos de repouso do material, *toe angle* (α_T) e *shoulder angle* (α_S), também altera. O *toe angle* determina a posição em que a polpa de minério está repousada na parte inferior do moinho. O *shoulder angle* determina o ponto em que o material se desprende da carcaça do moinho e inicia o movimento catarata. Este conceito é ilustrado na Figura 3.7. À medida que o volume de carga no SAG aumenta, a polpa se acumula no fundo do equipamento e o *toe* efetivo se desloca ainda mais para a esquerda (considerando o sentido de rotação ilustrado na Figura 3.7), diminuindo o *toe angle*. A polpa acumulada reduz a potência consumida pelo moinho, em contrapartida, a qualidade de quebra do material é reduzida (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

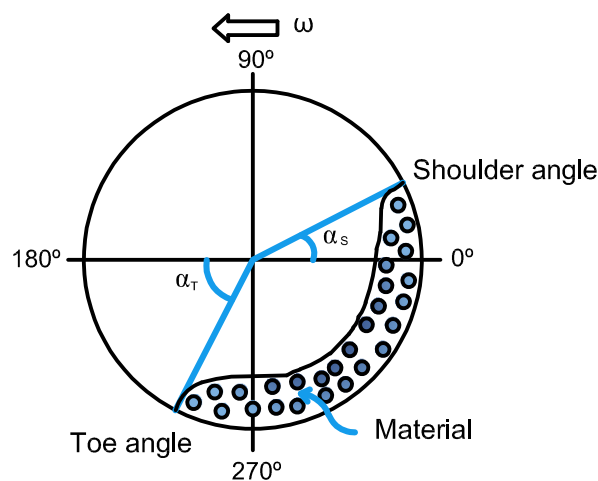


Figura 3.7: *Toe angle* e *shoulder angle*.

Segundo Apelt *et al.* (2001), o *toe angle* e *shoulder angle* do material no moinho são calculados pelas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente.

$$\alpha_T = 2,5307(1,2796 - V_f) \left(1 - e^{-19,42(0,35(3,364 - V_f - \phi_c))}\right) + \frac{\pi}{2}, \quad (3.4)$$

$$\alpha_S = \frac{\pi}{2} - \left(\alpha_T - \frac{\pi}{2}\right) ((0,3386 + 0,1041\phi_c) + (1,54 - 2,5673\phi_c)V_f), \quad (3.5)$$

em que ϕ_c é a fração da velocidade crítica do moinho [%], V_f é o volume de carga no moinho [%].

O design do revestimento do moinho, o desgaste da carcaça e o atrito interno do material no moinho podem variar a relação entre os ângulos de repouso. O *software* IDEAS considera em seu modelo do moinho SAG que o efeito dos ângulos de repouso no cálculo do consumo energético é dado pela Equação 3.6.

$$\lambda = \sin(\alpha_T)^\beta \sin(\alpha_S) \quad (3.6)$$

em que λ é o fator de correção do ângulo de repouso, β é um fator de sintonia.

Como mostra a Figura 3.8, ao manipular β é possível ajustar o volume de carga no moinho correspondente à máxima potência consumida. Quanto menor o valor do fator de sintonia, maior o volume de carga de material no moinho que irá acarretar no pico de consumo energético.

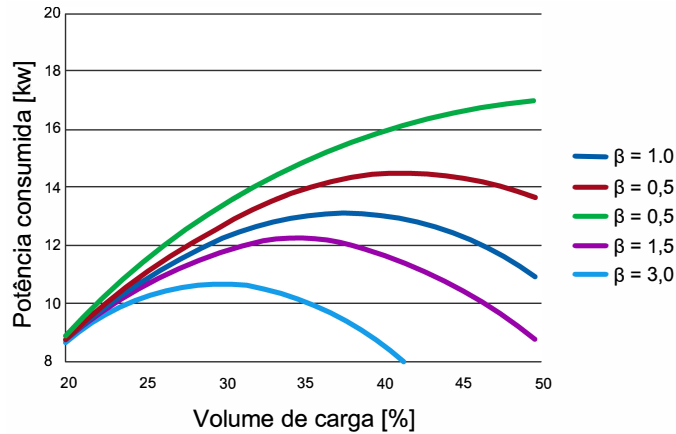


Figura 3.8: Potência consumida pelo volume de carga no moinho.

3.4. Circuito de Moagem SAG e Rebritagem de Sossego

O circuito de moagem SAG e rebritagem, apresentado na Figura 3.9, compõe parte do circuito de cominuição da usina de Sossego. Ele é composto por um moinho SAG de dimensões 11,6 x 7 m, e um potência instalada de 20MW; duas peneiras vibratórias de classificação com tamanho de 3,66 x 7,32 m; dois britadores de recirculação cônicos MP800 da Metso. A jusante do circuito de moagem SAG e rebritagem, há dois moinhos de bolas de 6,7 x 8,7 m e oito ciclones de classificação que completam o circuito de cominuição. A Figura 3.10 mostra o

moinho SAG da planta.

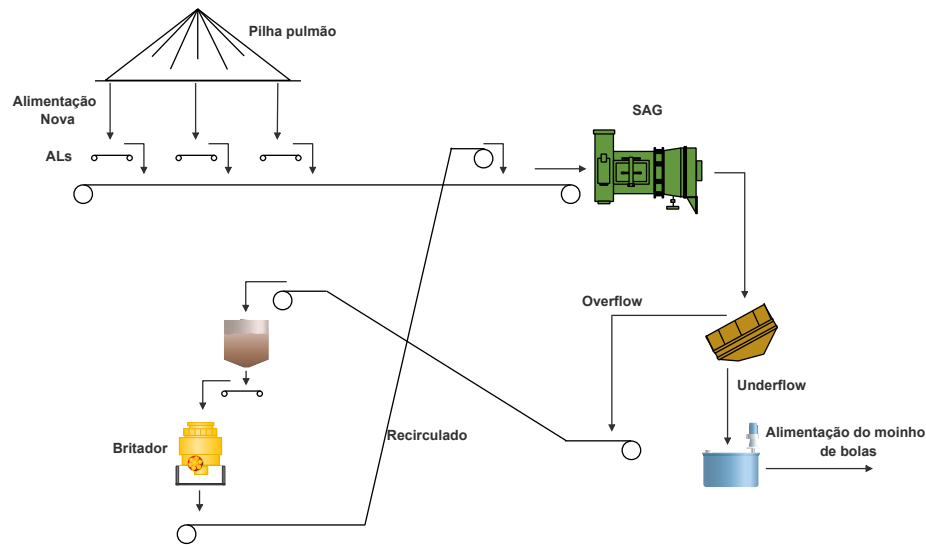


Figura 3.9: Circuito de Moagem SAG e Rebitagem de Sossego.



Figura 3.10: Moinho SAG da usina de Sossego.

A disposição dos equipamentos que compõem circuitos de moagem define qual o tipo de configuração daquele circuito (BERGERMAN, 2009). A configuração do circuito de cominuição de Sossego é do tipo SABC (Moinho Semi Autógeno - Britador de Reciclo - Moinho de bolas). Nessa configuração, três alimentadores retiram minério da pilha pulmão, que é parte da alimentação do moinho SAG. O material descarregado pelo moinho passa por uma etapa de classificação, composta pelas peneiras vibratórias. O *underflow* da peneira segue para o moinho de bolas e posteriores tratamentos. O *overflow*, composto por material mais grosso do que o requerido para seguir o circuito, é enviado a um britador de recirculação. Fechando o circuito, o material de saída do britador é misturado ao material que vem da pilha pulmão para alimentar o SAG.

4. Desenvolvimento da Estratégia de Controle

Este capítulo mostra as atividades realizadas durante o desenvolvimento do sistema de controle regulatório avançado e *fuzzy* para controle do peso de material no moinho SAG. São apresentadas as etapas de: construção do modelo digital do circuito de moagem SAG e rebitagem de Sossego e desenvolvimento das estratégias de controle.

4.1. Calibração de Modelos e Simulação Dinâmica do Processo de Moagem em Sossego

Simuladores dinâmicos de processos industriais desempenham um importante papel no desenvolvimento de estratégias de controle. Eles permitem testar e avaliar o desempenho de diferentes estratégias em variados cenários, sem comprometer a estabilidade e a produção da planta real. Esses simuladores apresentaram um alto desenvolvimento nas últimas décadas devido à necessidade de criar controles de processo avançados que proporcionassem maiores ganhos de produtividade e lucro (GUERRERO *et al.*, 2016).

Um modelo digital é uma representação fiel de um objeto ou processo físico real, que contém todas as informações, aspectos físicos e funcionais desse processo (BOSCHERT e ROSEN, 2016). Ele é usado em aplicações como treinamento de operadores, estudo de novas estratégias de controle e auxílio na tomada de decisões gerenciais. De acordo com Tao *et al.* (2018), as aplicações de modelos digitais têm alto potencial de produção, manufatura e serviço de produtos.

O *software* de simulação usado na etapa de modelagem do circuito foi o IDEAS (*Integrated Design Engineering with Advanced Simulation*), desenvolvido pela Andritz Automation Solutions. Ele contém bibliotecas compostas por objetos com nos quais é possível representar as configurações e aspectos funcionais de processos industriais. Os objetos representam equipamentos como válvulas, britadores, ciclones, correias. E cada um deles é parametrizável, ou seja, é possível modificar propriedades físicas e de funcionamento para tornar o modelo digital o mais próximo da realidade.

As operações unitárias no IDEAS são modeladas baseadas em princípios de balanço populacional, conservação de massa e energia (LOPES JÚNIOR, 2019). São usados modelos semi empíricos para representar o funcionamento de operações unitárias da mineração como britagem, moagem e peneiramento. Esses modelos podem ser encontrados na literatura (FLINTOFF *et al.*, 1987; KING, 2001; WILLS e FINCH, 2015)

Os equipamentos e aspectos funcionais do circuito de moagem SAG e rebitagem de Sossego foram calibrados com base em informações reais da planta. A equipe de processos da usina disponibilizou dados de balanço de massa, distribuição granulométrica do material (*particle size distribution* - PSD), aspectos físicos e curvas características dos equipamentos. Essas informações são necessárias para calibração e validação do simulador.

O circuito completo simulado no IDEAS é apresentado na Figura 4.1. A pilha pulmão da usina, com capacidade de estocagem de 41.000 t, foi representada por três pilhas no simulador. Dessa forma, foi possível configurar a diferença de granulometria do material retirado por cada alimentador. O material retirado pelos alimentadores é somado e, antes de ser enviado à correia que alimenta o SAG, ele passa por um objeto chamado “PSD Shifter” que permite alterar a granulometria do material. Este objeto foi usado para validação apenas do controlador regulatório avançado, cuja simulação incluiu distúrbios de granulometria no material de alimentação do moinho. Antes de entrar no SAG, o material novo é somado ao material recirculado. Isto é feito usando a *label* “Massa recirculada”, que armazena o valor da taxa rebitada. Ainda na entrada do moinho, há a adição de água necessária para o processo. O produto do moinho é enviado à peneira para classificação. O material classificado como *undersize* pela peneira é enviado ao bloco “Sink”, e não terá mais efeito sobre o processo já que essa parte do circuito não faz parte do escopo do trabalho. Já o material classificado como *oversize* é enviado ao britador por uma conjunto de correias. Antes de chegar ao britador, o material é armazenado em dois silos, em que o volume total de cada um é de 122 m^3 . Ao material britado é atribuído à *label* “Massa recirculada”, fechando o circuito.

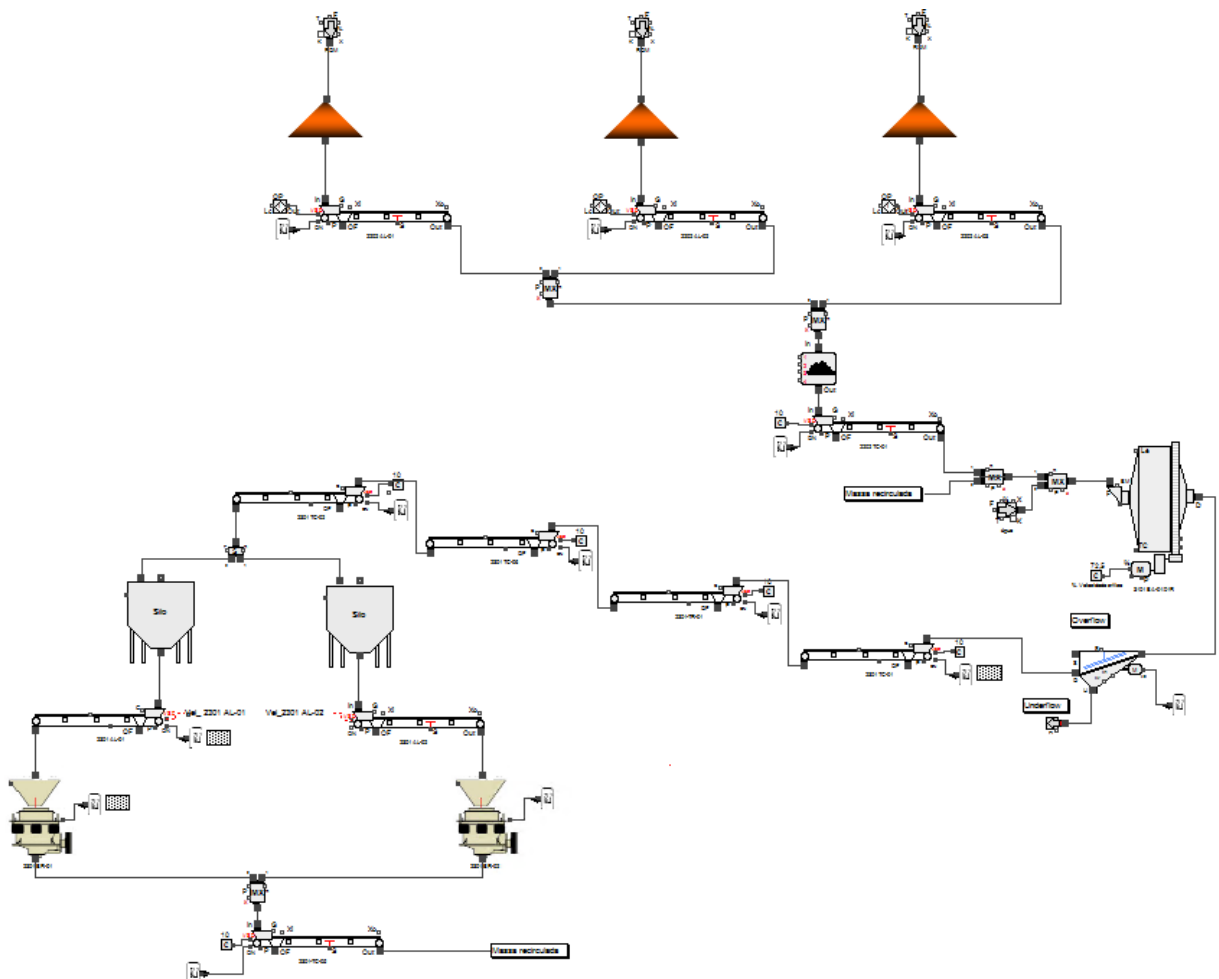


Figura 4.1: Interface gráfica do simulador da Moagem de Sossego no *software* IDEAS.

A equipe de processos de Sossego disponibilizou alguns valores de parâmetros necessários para calibração dos equipamentos no modelo digital. Os demais foram definidos por meio de testes de simulação com o intuito de adequar o desempenho do equipamento simulado ao equipamento real. Por exemplo, para calibrar o moinho SAG são inseridas a função de descarga do equipamento e as funções de quebra de minério por impacto, abrasão e atrito, separadamente. A função de descarga da grade do moinho define a curva de separação do minério, em outras palavras, a probabilidade de uma partícula de diâmetro i transpor a grade como produto da moagem. Essa função foi disponibilizada pela equipe de processos da usina. As funções de quebra indicam a probabilidade de uma partícula de diâmetro i ser quebrada por determinada ação, seja por impacto, abrasão ou atrito. As funções foram ajustadas durante a simulação com base em dados de curvas granulométricas do material na entrada e saída do SAG. Todas as funções de calibração do moinho SAG são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Funções de calibração do moinho SAG simulado.

D_i [mm]	%			
	Descarga do moinho	Impacto	Abrasão	Atrito
0,037	1,0000	0,0136	3,64E-08	8,99E-05
0,052	1,0000	0,0170	1,26E-07	9,63E-05
0,074	0,9929	0,0213	4,73E-07	1,03E-04
0,106	0,9728	0,0269	1,97E-06	1,11E-04
0,150	0,9113	0,0338	8,62E-06	1,19E-04
0,212	0,7616	0,0424	3,78E-05	1,28E-04
0,300	0,6406	0,0531	1,65E-04	1,37E-04
0,425	0,4930	0,0666	6,83E-04	1,46E-04
0,600	0,4151	0,0834	0,0025	1,57E-04
0,850	0,3407	0,1044	0,0077	1,68E-04
1,180	0,2777	0,1301	0,0189	1,80E-04
1,700	0,2648	0,1630	0,0387	1,93E-04
2,360	0,2558	0,2042	0,0661	2,07E-04
3,175	0,2498	0,2502	0,0945	2,20E-04
6,350	0,2466	0,3451	0,1392	2,43E-04
9,525	0,2445	0,4929	0,1800	2,71E-04
12,700	0,2433	0,6163	0,1996	2,91E-04
19,05	0,2426	0,7666	0,2148	3,12E-04
25,400	0,2422	0,9343	0,2262	3,34E-04
38,100	0,2420	1,0560	0,2346	3,58E-04
50,800	0,2418	0,9510	0,2408	3,84E-04
63,500	0,2417	0,6739	0,2442	4,04E-04
76,200	0,2417	0,4317	0,2463	4,20E-04
152,400	0,2417	0,1206	0,2498	4,59E-04
203,200	0,2416	0,0243	0,2523	5,06E-04

Para configurar o britador é necessário estabelecer a matriz de quebra e a função de classificação do equipamento. A matriz de quebra, vista no Anexo A, define uma distribuição granulométrica que é resultado da quebra de uma partícula, originando partículas menores que podem ser novamente quebradas, gerando uma nova população de partículas. A função de classificação, Tabela 4.2, depende da geometria da câmara de britagem, a qual determinará as chances de uma partícula de tamanho i ser aprisionada pelo manto. Como não havia conhecimento prévio dessas funções, foram feitas diferentes simulações ajustando os parâmetros

das funções para encontrar aqueles que levassem o comportamento do britador simulado a ser próximo do real.

Tabela 4.2: Função de classificação do britador simulado.

D_i [mm]	%
0,037	0
0,052	0
0,074	0
0,106	0
0,150	0
0,212	0
0,300	0
0,425	0
0,600	0
0,850	0
1,180	0
1,700	0
2,360	0
3,175	0
6,350	0
9,525	0
12,700	0
19,050	0,4313
25,400	1
38,100	1
50,800	1
63,500	1
76,200	1
152,400	1
230,200	1

O desempenho dos equipamentos foi validado no modelo digital para confirmar a fidelidade com a planta real. A validação ocorreu comparando a distribuição granulométrica do material de saída de cada equipamento simulado com o PSD do material real. O PSD de um material define a quantidade percentual, em massa, de partículas contidas na amostra de acordo com seu tamanho, d_i . As curvas de validação do moinho SAG e britador são mostradas nas Figuras 4.2a e 4.2b, respectivamente.

Foi calculado o coeficiente de determinação, R^2 , para os dados de validação. Esta métrica indica o quanto, em percentual, é eliminado do erro de previsão da variável dependente, $\%passante$, ao usar a regressão de mínimos quadrados sobre a variável independente, d_i . Quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 mais próximos são os dados simulados do real e mais representativo o equipamento calibrado. Os valores de R^2 calculados para a validação do moinho SAG e britador são 0,9524 e 0,9961, respectivamente.

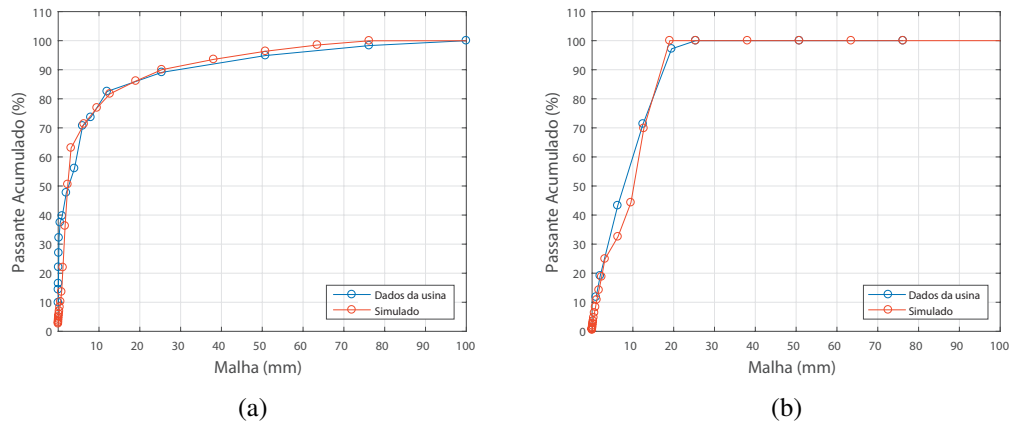


Figura 4.2: Validação do (a) moinho SAG e (b) britador simulados.

4.2. Estratégia de Controle

As variáveis do circuito de moagem SAG e rebitagem de Sossego interagem de maneira simples e direta. O volume de carga no moinho SAG não é medido por falta de instrumentação adequada. As informações sensoreadas pela equipe de automação da planta são o peso do moinho SAG, a taxa de material novo, a taxa de material recirculado e a granulometria do minério vindo da pilha pulmão. Ambas as taxas e o peso são monitorados por meio de células de carga, e a granulometria é aferida usando um analisador ótico.

O peso do moinho possui uma forte interação com o volume de carga no interior do equipamento, alterações no volume refletem diretamente no peso do moinho. Por causa disso, o peso do moinho SAG é a variável que se deseja controlar e a principal variável de processo do sistema de controle. Seu acoplamento mais forte é com a taxa total de material incidente no moinho, taxa nova somada à taxa recirculada. É uma relação direta, o aumento de taxa total resulta em uma tendência de aumento do peso, e a redução de taxa total tende a reduzir o peso. Além da taxa de alimentação, a granulometria do material que alimenta o SAG influencia significativamente no peso do equipamento. Partículas grossas têm um maior tempo de residência no interior do moinho, por ser necessário um maior trabalho de quebra para condicioná-las para sair do equipamento, e isso tende a aumentar o peso do SAG. Para materiais finos, o efeito é o contrário.

Existem dois graus de liberdade neste circuito, a taxa de material novo retirado da pilha pulmão e a porcentagem de velocidade aplicada em cada alimentador. Para manipular a taxa de material nova ajusta-se a velocidade de rotação dos alimentadores por meio de inversores acoplados a eles. Quanto maior a velocidade dos ALs, mais material é retirado da pilha e maior é a taxa nova. A porcentagem de uso de cada alimentador é definida pelo operador. Visto que os alimentadores laterais retiram material mais grosso, e o alimentador central retira material mais fino, ao controlar a porcentagem de uso de cada alimentador é possível ajustar a granulometria

do material retirado da pilha pulmão ao priorizar os alimentadores laterais ou central.

O processo em questão é multivariável e com alto acoplamento entre as variáveis. A Figura 4.3 apresenta uma representação MIMO do circuito de Sossego. A eficiência de moagem do circuito não foi possível considerar como variável de processo já que não era possível aferir a taxa de *undersize* da peneira. Apesar de um controlador MPC ser uma alternativa viável e usualmente aplicada em processos multivariáveis, o uso de controladores clássicos combinados em estratégias avançadas também se apresenta como uma alternativa interessante (WADE, 2004). Como discutido por Forsman (2016), o uso de controladores clássicos em abordagens como controle cascata, *feedforward* e *override* tem vantagens em relação ao uso de MPC: menor custo de implementação e manutenção do controlador, maior simplicidade na etapa de desenvolvimento e sintonia, controlador mais amigável ao operador.

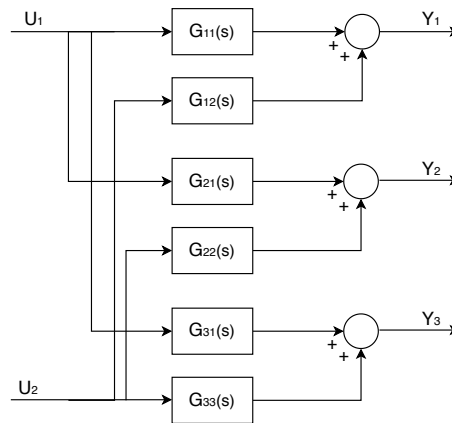


Figura 4.3: Estrutura MIMO do circuito de Sossego.

U_1 : Taxa total, U_2 : Granulometria do material, Y_1 : Peso do moinho SAG, Y_2 : Potência consumida pelo moinho SAG, Y_3 : Eficiência de moagem.

Três técnicas de controle foram desenvolvidas, um controle em cascata, um controlador *feedforward* e um controle *fuzzy*. Elas são complementares, seu uso em conjunto se apresenta como a melhor solução para este desafio. O controlador cascata define a velocidade dos alimentadores para entregar a taxa de material ideal para alimentar o SAG. A taxa ideal é definida com base no sinal de controle do controlador *feedforward* que antevê os efeitos que a granulometria do material irá causar no peso, permitindo que o sistema de controle aja de maneira antecipada. O controle *fuzzy* garante uma distribuição mais adequada da granulometria do material ao ajustar a contribuição de taxa de cada alimentador, facilitando o controle do peso do moinho e evitando uma desconfiguração da pilha pulmão.

4.2.1. Controle Cascata

A estratégia de controle cascata utiliza duas malhas *feedback*, malha externa e malha interna, para aprimorar a resposta de sistemas com distúrbios (SEBORG *et al.*, 2010). Segundo Teixeira *et al.* (2010), um controle em cascata apresenta vantagens, como: a malha interna é

capaz de detectar e corrigir efeitos de perturbações antes que afetem a malha externa, a malha interna acelera a resposta de processo da malha externa e as não linearidades percebidas pela malha externa são compensadas pela malha interna.

A Figura 4.4 apresenta a configuração típica do controle em cascata. Nela, G_{p2} e G_{p1} são os processos da malha interna e externa, respectivamente. O controlador interno, G_{c2} , atua na variável manipulada, u_2 , com base no valor de entrada, calculado como o erro entre o sinal de controle do controlador externo, u_1 , e o sinal da variável adicional y_2 . A entrada do controlador primário, G_{c1} , é a diferença entre o *setpoint* (SP) da variável de processo, r , e o sinal de leitura desta mesma variável, y_1 . Distúrbios, d_1 e d_2 , podem ocorrer nos pontos mostrados. É possível ver então que um distúrbio em d_2 é rapidamente detectado e corrigido por G_{c2} (TORGA, 2018).

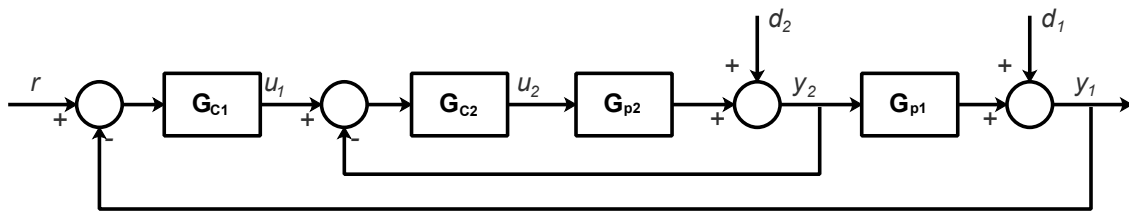


Figura 4.4: Sistema típico de controle em cascata.

Fonte: (TORGA, 2018).

Uma malha PID simples com par de variáveis Peso x Taxa Nova seria uma escolha trivial já que a taxa nova é a o principal grau de liberdade do processo. A taxa recirculada do circuito, que varia de acordo com a qualidade de moagem do SAG e do desempenho de classificação da peneira, é um distúrbio desta malha e compromete o desempenho do controlador. Isto pode ser melhorado usando um controlador cascata, no qual o controlador interno controla a taxa total de alimentação do moinho e o controlador externo controla o peso do SAG. Dessa forma, a malha interna é capaz de perceber variações na taxa recirculada e atuar antes que o peso sofra alguma perturbação.

A malha externa monitora o peso (y_1) de material no moinho SAG e o compara com um *setpoint* (r) estabelecido pela equipe de processos da usina. Ela determina a taxa total (u_1) de material que deve alimentar o SAG, *setpoint* do controlador interno. A malha interna monitora a taxa total de alimentação (y_2), e a compara com o *setpoint* e atua na velocidade (u_2) dos três alimentadores. O sinal enviado pelo controle interno é o mesmo para os três ALs. A Figura 4.5 representa a estrutura em cascata aplicado ao circuito.

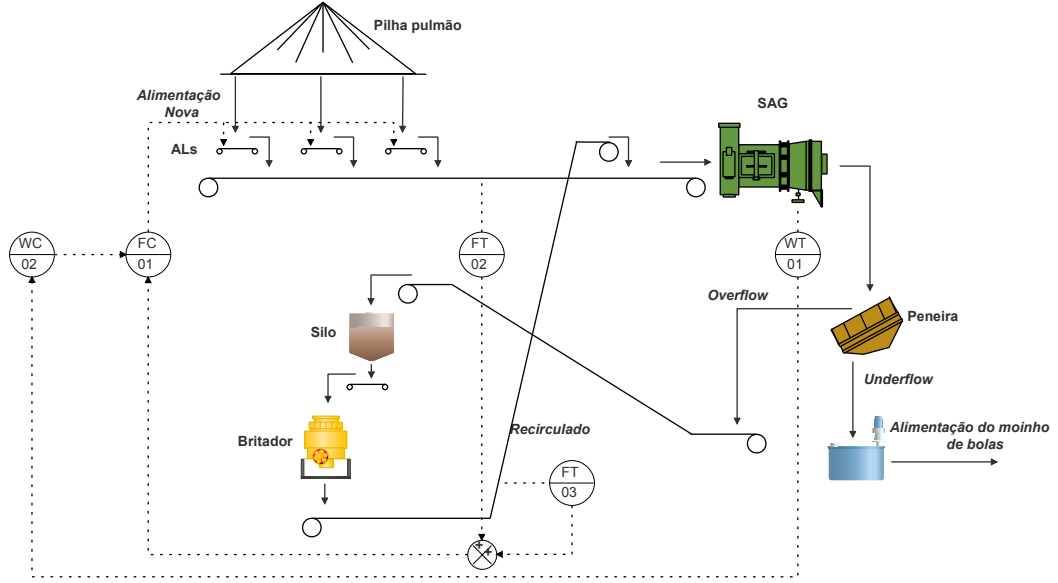


Figura 4.5: Estratégia de Controle Cascata Proposta.

FT: Flow Trasmmitter, WT: Weight Trasmmitter, FC: Flow Controller, WC: Weight Controller

Os modelos dos processos da malha interna, $G_1(s)$, e externa, $G_2(s)$, foram identificados com base em testes em degrau em torno do ponto de operação especificado e no uso do método de mínimos quadrados. Ambos os modelos foram considerados como de primeira ordem, e são apresentados pelas Equações 4.1 e 4.2.

$$G_1(s) = \frac{57,05}{6s + 1} e^{-47s} \quad (4.1)$$

$$G_2(s) = \frac{0,16}{579s + 1} e^{-58s} \quad (4.2)$$

Devido à característica ruidosa das variáveis do processo, foram sintonizados controles PI. A formulação do PI adotada neste trabalho é apresentada pela Equação 4.3. A sintonia foi obtida pelo método IMC, cujos parâmetros são calculados de acordo com as Equações 4.4 e 4.5.

$$G_c(s) = K_p + \frac{1}{sT_i} \quad (4.3)$$

$$K_p = \frac{2\tau + \theta}{2K\lambda}, \quad (4.4)$$

$$T_i = \tau + \frac{\theta}{2}, \quad (4.5)$$

em que K é o ganho estático do processo, τ é a constante de tempo, θ é o atraso e λ é um parâmetro de ajuste que define o desempenho desejado para a dinâmica do processo em malha fechada. O valor de λ deve ser compatível com a restrição dinâmica do sistema, ou seja, $\lambda > 1,7\theta$ (RIVERA, 1999). O valor de λ foi definido a partir de uma série de experimentos nos

quais foi avaliada a performance do controlador para diferentes valores deste parâmetro. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros da sintonia dos controladores.

Tabela 4.3: Parâmetros de sintonia dos controladores da estratégia cascata.

Controlador	K_p	T_i	λ
Controle externo	12,83	608,00	290
Controle interno	0,0037	29,50	141

4.2.2. Controle *Feedforward*

O controlador *feedforward* é usado junto a controladores *feedback*. Ele antecipa a ocorrência de um distúrbio e compensa seu efeito na variável manipulada da malha *feedback* antes que a variável de processo sofra perturbações (TEIXEIRA *et al.*, 2010). Como mostra a Figura 4.6, o controlador C , os processos, P_1 e P_2 , os sinais *setpoint*, y_{sp} , sinal de controle, u , e variável de processo, y , compõem uma malha *feedback*. Um distúrbio, d , perturba a malha *feedback*, sendo P_2P_3 a função de transferência entre d e y . O controlador *feedforward*, G_{ff} , alimentado pelo sinal de distúrbio, envia um sinal de controle que é compensado no sinal de C , com intuito de minimizar os efeitos de d em y (GUZMÁN e HÄGGLUND, 2011).

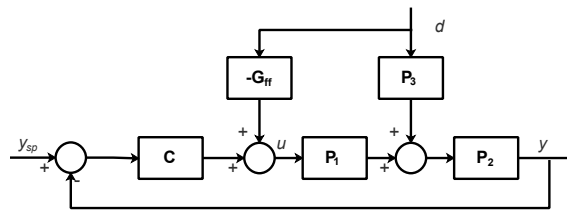


Figura 4.6: Sistema típico de controle *feedforward*.

Fonte: (GUZMÁN e HÄGGLUND, 2011).

O PSD do material que alimenta o circuito é irregular ao longo do tempo. Essa variação de granulometria é um distúrbio para o sistema. Ela ocorre em virtude do desmonte da lavra ser irregular por questões físicas do minério e/ou quantidade de explosivos usados. O analisador ótico usado na planta de Sossego indica o valor de d80 do material novo. Esse valor determina o tamanho tal que 80% das partículas analisadas são menores ou iguais a ele. O d80 instantâneo é comparado com um *setpoint* preestabelecido, e o erro de granulometria é enviado ao controlador *feedforward* que atua de forma a compensar o valor de taxa total enviado pelo controlador externo ao controlador interno. Ele reduz a taxa total requerida para um material de granulometria alta e aumenta para um material de granulometria baixa.

Existem mais de uma estrutura possível para controladores *feedforward*, como o apresentado por Guzmán e Hägglund (2011). De acordo com Teixeira *et al.* (2010), em muitos casos, o uso de um ganho simples já provoca ganhos consideráveis ao processo. A estrutura

usada neste trabalho contempla um ganho estático e um termo de compensação de atraso, como pode ser visto nas Equações 4.6 a 4.8.

$$G_{ff} = K_{ff}e^{-s\theta_{ff}}, \quad (4.6)$$

$$K_{ff} = \frac{K_d}{K_p}, \quad (4.7)$$

$$\theta_{ff} = \theta_d - \theta_p, \quad (4.8)$$

em que K_{ff} é o ganho do controlador, θ_{ff} é o atraso do controlador, K_d é o ganho estático modelado do distúrbio, K_p é o ganho estático do processo, θ_d é o atraso do distúrbio e K_p é o atraso do processo. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros do controlador.

Tabela 4.4: Parâmetros de sintonia do controlador *feedforward*.

Controlador	K_{ff}	θ_{ff}
Controle <i>feedforward</i>	2,87	501

A Figura 4.7 apresenta a estrutura do controlador *feedforward* em conjunto ao controle cascata aplicada no circuito.

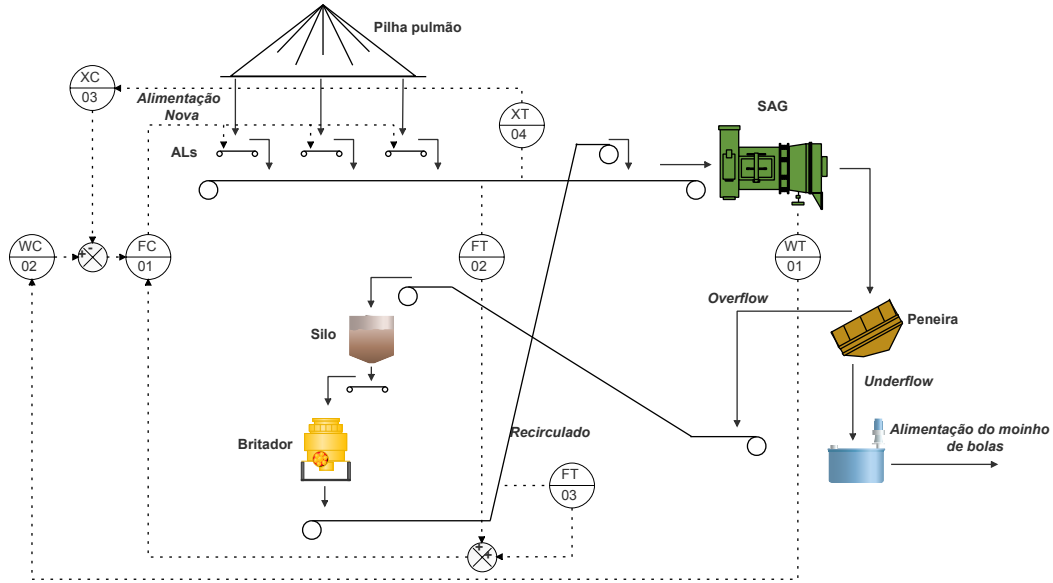


Figura 4.7: Estratégia de Controle Cascata + *Feedforward* proposta.

FT: Flow Transmitter, WT: Weight Transmitter, XT: Granulometry Transmitter, FC: Flow Controller, WC: Weight Controller, XC: Granulometry Controller

4.2.3. Controle Fuzzy

A lógica fuzzy, assim como a lógica clássica, são estruturas usadas para atribuir a uma determinada variável um grau de pertinência ou verdade. Enquanto a lógica clássica classifica

objetos apenas como verdadeiro ou falso, a lógica *fuzzy* é capaz de classificá-los de forma menos rígida, se assemelhando mais ao pensamento humano (JENTZEN, 2013). Isso permite uma transição mais gradual entre diferentes aspectos de uma mesma variável. A Figura 4.8 mostra um comparativo entre a forma de classificação da lógica clássica e fuzzy.

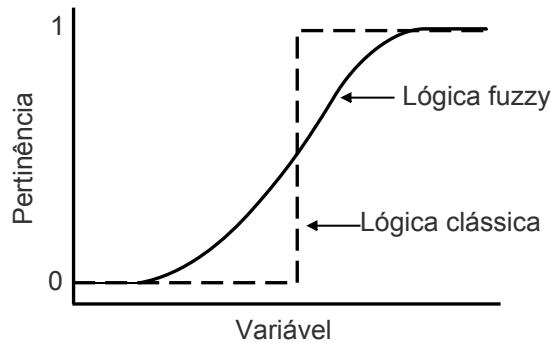


Figura 4.8: Comparação de lógica clássica e lógica *fuzzy*.
Adaptado de (JENTZEN, 2013).

Segundo Nguyen *et al.* (2018), para cada valor de um objeto, ou variável linguística, é atribuído um grau de pertinência (GP). Esse parâmetro possui valor entre 0 e 1, e indica o quanto determinado valor é adequado dentro de um conjunto. Um mesmo valor de uma variável pode ter mais de um grau de pertinência, cada um associado a um conjunto diferente. A esta etapa de associar um grau de pertinência a um valor de uma variável linguística é dado o nome de *fuzzyficação*.

As funções que determinam o grau de pertinência de um valor são chamadas funções de pertinência (FP). Uma variável linguística pode ter inúmeras funções de pertinência. Por exemplo, a variável linguística “Erro” pode ser representada pelo seguinte conjunto de funções de pertinência {muito negativo, pouco negativo, nulo, pouco positivo, muito positivo}. Uma FP pode ser representada de diversas formas, triangular, trapezoidal, senoidal, entre outras. A definição da forma, da quantidade e da abrangência de cada FP dentro de um conjunto fica a cargo do projetista e essa etapa pode ser tratada como a sintonia do controlador. Trabalhos como os de Gomez-Ramirez e Chávez-Placencia (2004) e Dai *et al.* (2005) se dedicam a desenvolver técnicas de sintonia de controladores *fuzzy*.

Um controlador *fuzzy* se baseia em um conjunto de regras lógicas do tipo SE-ENTÃO para determinar sua ação de controle. Essas regras são estabelecidas por observação do processo e/ou reprodução da experiência do operador. Um mecanismo de inferência utiliza essas regras para associar as variáveis de entrada *fuzzyficadas* e variáveis de saída. Os métodos de inferência mais usados são o Sugeno e Mamdani (SIVANANDAM *et al.*, 2007). A *deffuzificação* é a etapa na qual a solução ponderada das regras estabelecidas é usada por funções de pertinência de saída para determinar o valor da variável de saída.

A estrutura completa de um controle *fuzzy* pode ser visto na Figura 4.9.

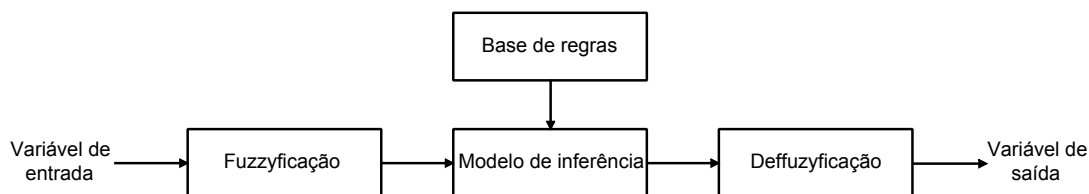


Figura 4.9: Estrutura completa de um controlador *fuzzy*.

Um sistema especialista é um sistema que emula a experiência humana e realiza ações com base no conhecimento passado a ele (TAN, 2017). Por possuir essas características, a lógica *fuzzy* é aplicada como um sistema especialista em sistemas de controle (JÚNIOR *et al.*, 2018; MAGALHAES e EUZÉBIO, 2018). Uma de suas vantagens é não depender de um modelo analítico preciso do processo. Ela pode ser usada como única estrutura de controle de um sistema ou aliada a uma camada de controle regulatória.

4.2.3.1. Estrutura Fuzzy para controle em Sossego

Quanto mais se alimenta o SAG com finos, maior a produção horária do circuito, já que esse tipo de material tem um menor tempo de residência dentro do moinho. Empiricamente, o operador busca sempre utilizar mais o alimentador central e retirar material fino da pilha pulmão. Como mostrado na Figura 4.10, o uso indevido do central pode tornar escasso a quantidade de material fino na pilha, desconfigurando-a. Nesta situação, só haverá material grosso para alimentar o SAG, dificultando o trabalho do operador e comprometendo o desempenho do circuito por não ter como balancear a granulometria de alimentação.

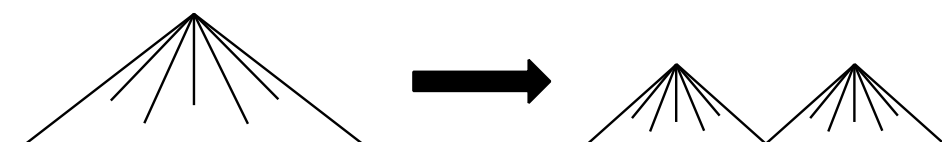


Figura 4.10: Desconfiguração da pilha pulmão por uso indevido do alimentador central.

Pensando nisso, o controlador *fuzzy* tornará a decisão da contribuição na taxa nova de cada alimentador automaticamente, dependendo do *setpoint* de taxa total estabelecido pelo controle cascata. Uma tendência de alta no peso induz uma redução da taxa total, o aumento da proporção do central, que retira minério fino e tem menor tempo de residência, contribuiria melhor para a estabilização do peso. Uma tendência de baixa do peso, induz aumento na taxa total, e um aumento de uso de material das extremidades melhoraria a estabilidade do peso. O objetivo é aplicar variações lentas em relação às dinâmicas do processo para impedir flutuações bruscas do peso.

A estrutura do controlador *fuzzy* e o sistema de controle regulatório avançado é apresentado na Figura 4.11. Com base no valor de taxa total definido pelo controlador externo e *feedforward*, o controlador *fuzzy* regula o sinal enviado aos alimentadores pelo controlador interno.

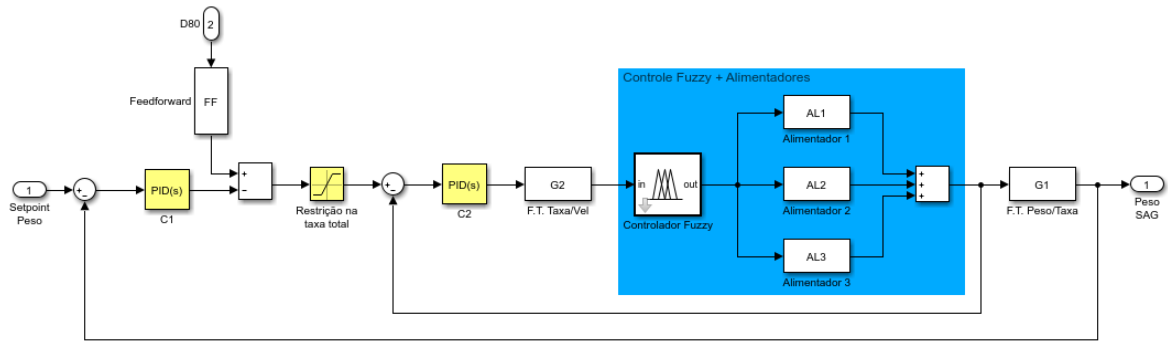


Figura 4.11: Diagrama do controle *fuzzy* proposto.

As zonas de atuação do controlador *fuzzy* foram delimitadas respeitando os limites mínimo e máximo da taxa total, conforme mostra a Figura 4.12. Dentro da zona neutra, a proporção de taxa horária dos três alimentadores é configurada para que a quantidade de taxa de material retirada pelo AL central seja a mesma taxa retirada pelos dois ALs laterais combinados. Se a taxa total for alta, os ALs laterais são priorizados, e se a taxa total for baixa, o AL central é priorizado. A região de atuação do *fuzzy* para taxa total baixa é maior porque a dinâmica de aumento do peso é mais lenta do que a dinâmica de redução do peso.

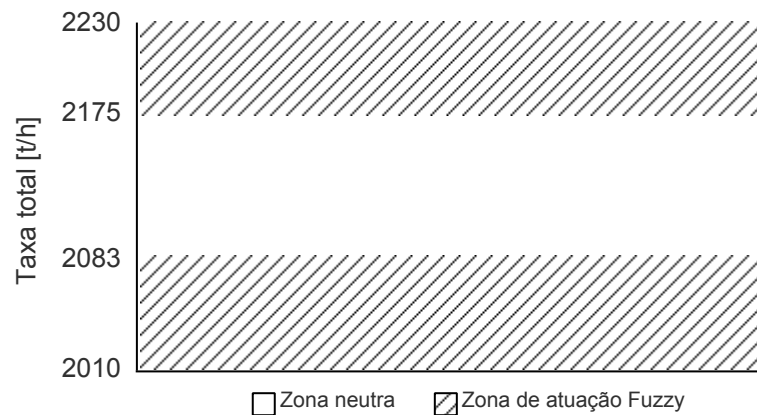
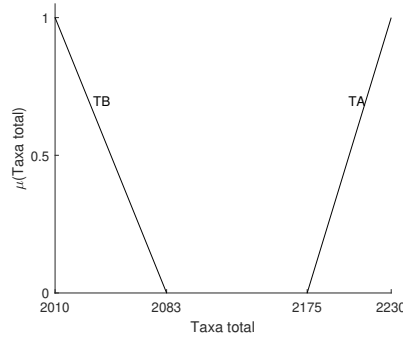


Figura 4.12: Zonas de atuação do controle *Fuzzy*.

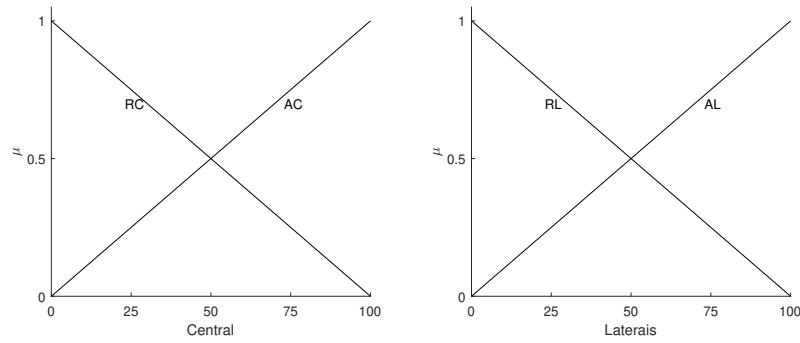
A variável de entrada do controlador *fuzzy* é a taxa total definida pelo controle cascata. As variáveis de saída são a proporção do sinal de controle enviado ao alimentador central e alimentadores laterais. Foram criadas as funções de pertinência TB (Taxa Baixa) e TA (Taxa Alta) para a variável de entrada, as funções RC (Reduz Central) e AC (Aumenta Central) para a variável de saída Central, e as funções RL (Reduz Laterais) e AL (Aumenta Laterais) para a variável de saída Laterais. Todas elas são do tipo triangular e estão apresentadas na Figura 4.13.

Foram criadas e implementadas duas regras na base de conhecimento do controlador. Se a taxa total estiver na zona baixa então o sinal de controle do controlador interno é aumentado para o AL central e reduzido para os ALs alterais. Se a taxa total estiver na zona alta então o sinal de controle do controlador interno é reduzido para o AL central e aumentado para os ALs laterais.

1. **SE** Taxa total é TB **ENTÃO** AC E RL;
2. **SE** Taxa total é TA **ENTÃO** RC E AL.



(a)



(b)

Figura 4.13: Funções de pertinência das variáveis de (a) entrada e (b) saída.

4.3. Integração com PLC ABB

Os controladores propostos foram traduzidos para o padrão da ABB, fabricante dos equipamentos de controle e automação em Sossego. Um PLC (Programmable logic controller) ABB AC 800M foi usado para implementar testes no formato *hardware-in-the-loop*, isto é, o dispositivo da ABB é conectado ao simulador da planta de Sossego e controla a planta simulada como se fosse a real. O objetivo é minimizar os problemas que podem existir na transição do controle simulado para o sistema de controle real da usina. O SDCD usado é o ABB 800xA. Dentre as linguagens de programação disponíveis, tanto o controle cascata quanto o controle *fuzzy* foram desenvolvidos em *Control Module*, visto que é a linguagem utilizada pela equipe de automação da usina de Sossego. As funções de pertinência e as regras do controlador *fuzzy* foram implementadas usando ferramentas da biblioteca *ControlFuzzyLib*. A Figura 4.14 apresenta a parte do código do controlador cascata e *feedforward* e a Figura 4.15 mostra a tela do controlador *fuzzy*.

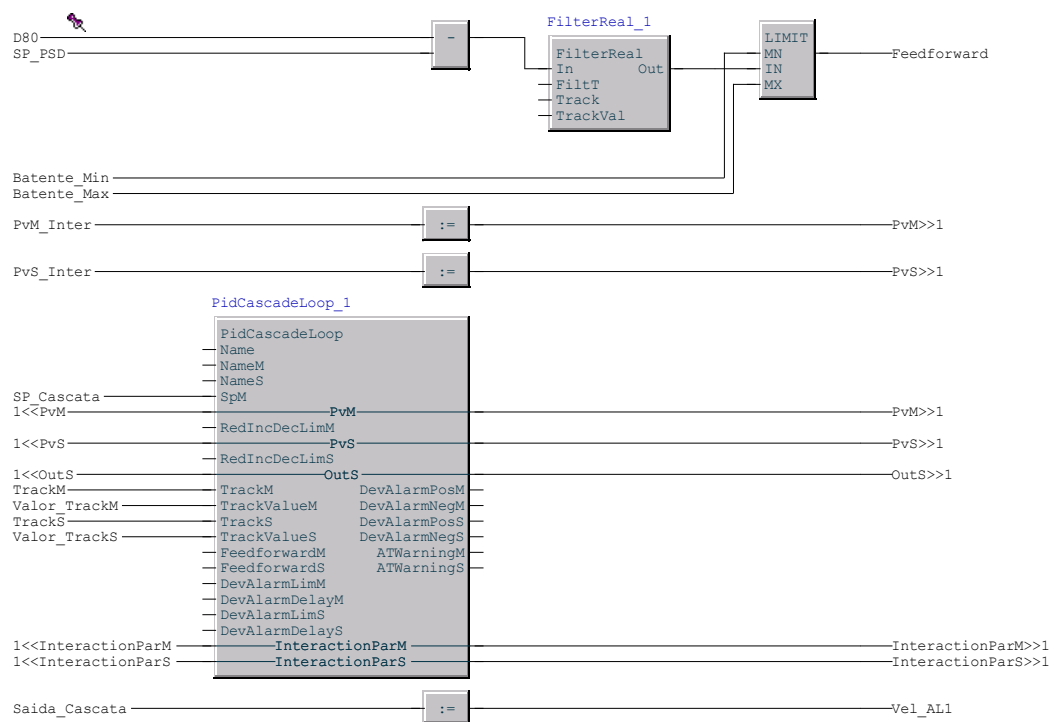


Figura 4.14: Controlador proposto no padrão ABB.

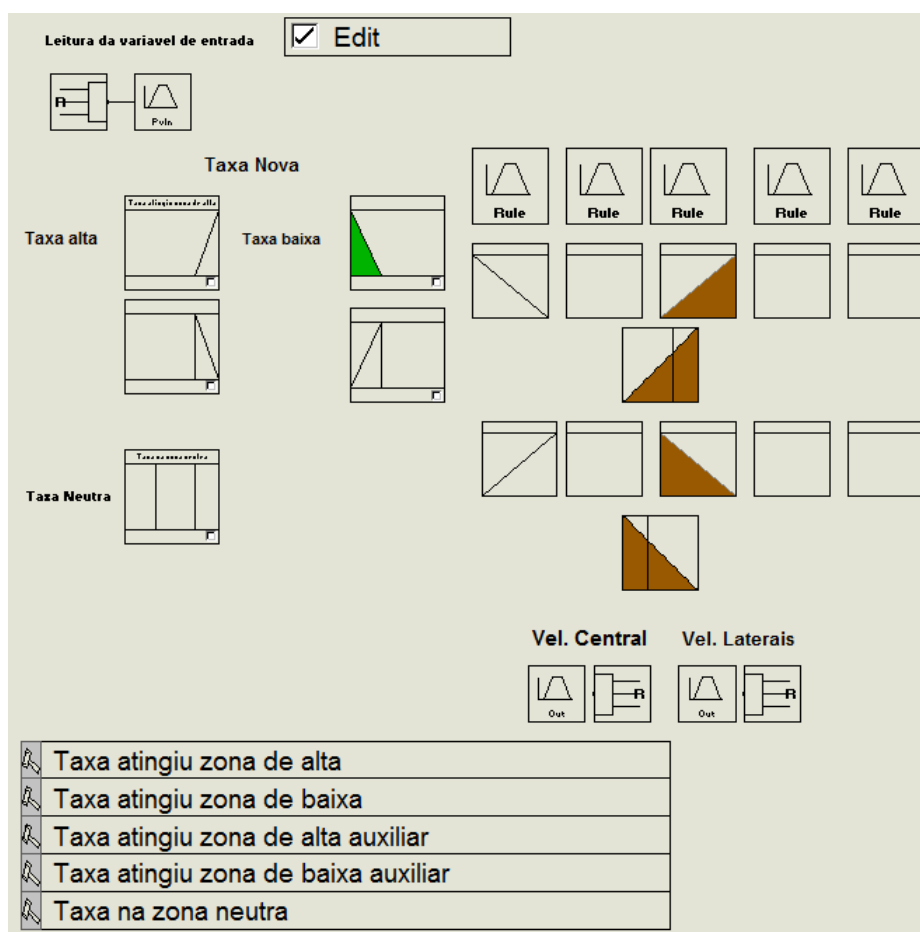


Figura 4.15: Diagrama de controle proposto.

5. Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados das simulações feitas para validar o comportamento do sistema de controle proposto. As simulações ocorreram no modelo digital desenvolvido no IDEAS, que se comunicava via OPC (Open platform communications) com os controladores implementados no *software* Simulink da MathWorks e no PLC ABB AC 800M.

5.1. Resultados da Aplicação da Proposta de Controle na Planta Simulada de Sossego

5.1.1. Controlador Regulatório Avançado

Os testes de aplicação do controlador cascata e controlador *feedforward*, apresentados nas seções 4.2.1 e 4.2.2, foram feitos no modelo digital da planta e duraram aproximadamente oito horas. A granulometria do minério de alimentação teve um comportamento como o apresentado na Figura 5.1. O distúrbio simulado reproduziu uma variação granulométrica similar a uma variação real na usina. No período de tempo considerado, o d80 do minério teve uma variação de ± 70 mm em torno de uma média de 110 mm.

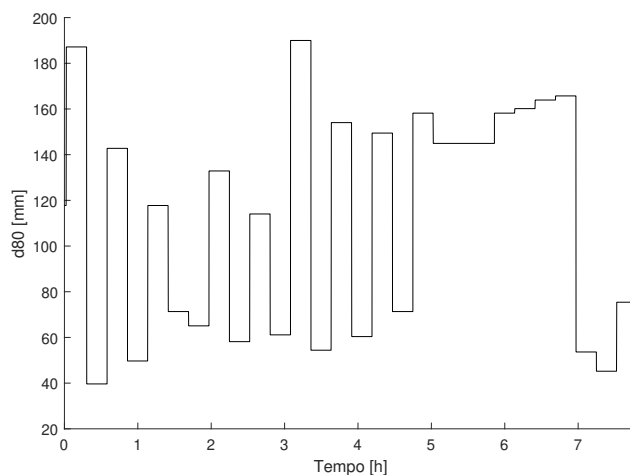


Figura 5.1: Granulometria do material novo nas simulações.

Foram simulados três casos para comparação: no caso 1, não havia nenhum sistema de controle atuante na planta; no caso 2, o sistema de controle cascata foi usado para controlar o peso do moinho; no caso 3, o controle cascata e o controle *feedforward* foram aplicados como sistema de controle. A Figura 5.2 mostra um comparativo do peso do moinho SAG ao longo das simulações e a taxa de minério retirada da pilha pulmão. O SP da variável de processo foi de 840 t.

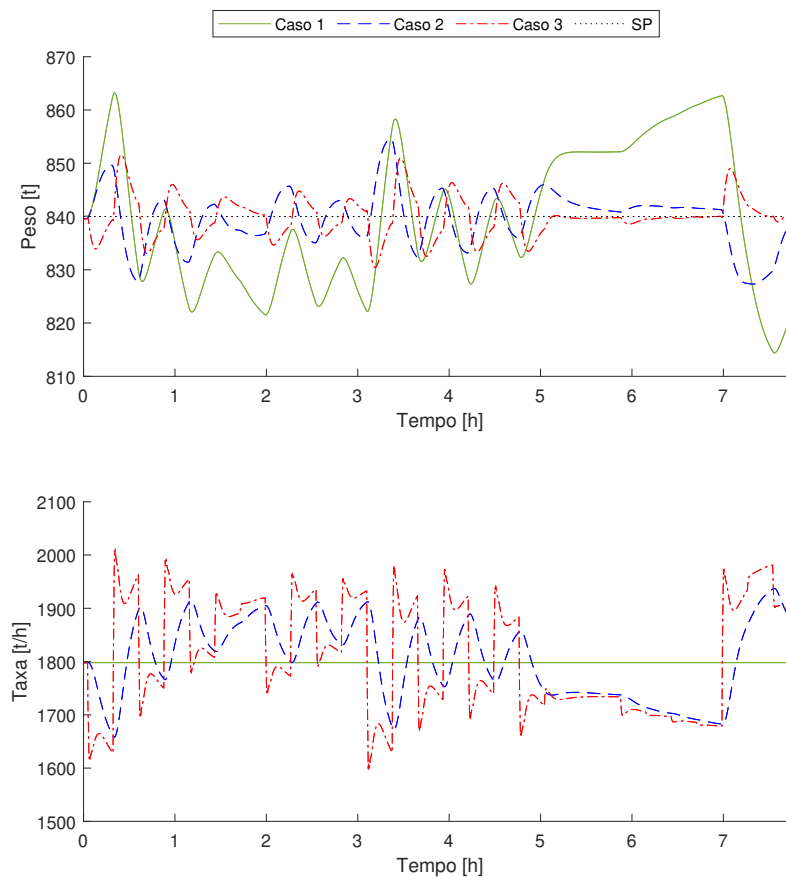


Figura 5.2: Comparação de peso do moinho SAG e taxa retirada da pilha com uso de estratégias de controle.

Caso 1: Sem controlador automático atuante; Caso 2: Controle em cascata; Caso 3: Controle em cascata e *feedforward*

O uso das estratégias de controle automáticas diminuíram a oscilação do peso do moinho SAG. No caso 1, o peso apresenta variações de amplitudes altas, chegando a estar mais de 20 t acima do SP. Como não há um controle de taxa neste caso, a variação no peso é devido principalmente à granulometria do minério. O operador precisa estar sempre atento e atuante no ajuste da taxa nova para evitar grandes variações no peso do SAG. No caso 2, o controlador cascata manipulou a taxa nova do circuito e foi capaz de reduzir a amplitude das variações, aproximando o peso do SP estabelecido ao longo da simulação. Com o acréscimo do controle *feedforward*, no caso 3, a variabilidade do peso foi ainda menor. A ação de controle para este caso é mais agressiva devido à condição de predição do controlador *feedforward* ao analisar a granulometria do material. Na Figura 5.2, também é possível notar que, em alguns instantes, a tendência do peso no caso 3 foi inversa em comparação aos casos 1 e 2. Por exemplo, próximo ao instante de 0,31 h, o peso do moinho reduz no caso 3, enquanto nos outros caso há uma tendência de aumento. Isso é devido a ação antecipatória do *feedforward*, que identifica a granulometria alta do minério neste instante e toma uma ação contrária à tendência de aumento

do peso.

O comportamento do peso do SAG ao longo de tempo para os três casos simulados é melhor observado pelo diagrama *boxplot* mostrado na Figura 5.3. Para o caso 3, a mediana dos dados de peso está mais próxima do *setpoint* estabelecido de 840 t. Além disso, as caixas do *boxplot* para o caso 3 são menores e mais simétricas. Isto indica uma menor variabilidade do peso e uma simetria dos dados, em outras palavras, não há tendência do peso em ficar mais tempo abaixo ou acima do SP definido.

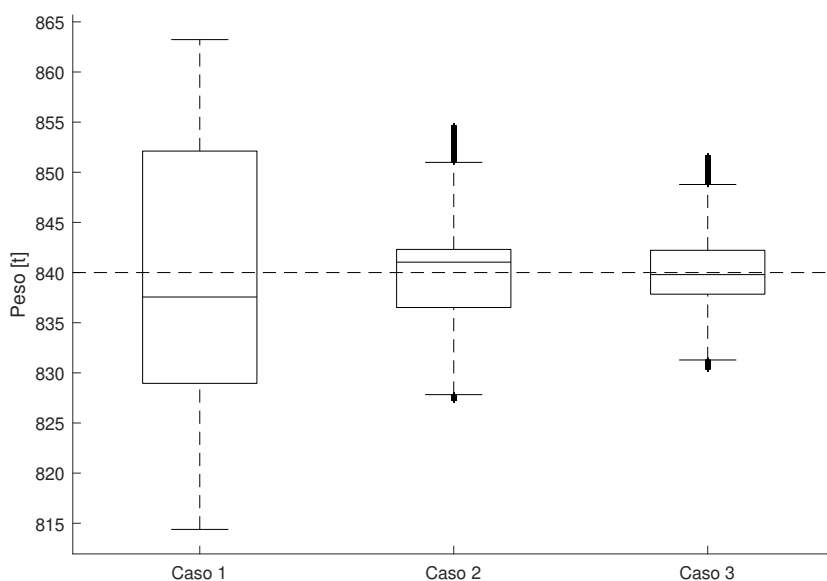


Figura 5.3: Comparação boxplot entre desempenho de estratégias.

5.1.2. Controlador *Fuzzy*

Os testes para avaliação do desempenho do controlador *fuzzy* foram feitos no modelo simulado do circuito de moagem SAG e rebitagem de Sossego e tiveram duração de 8 horas. Foram considerados dois casos para comparação: no caso 1, o circuito é controlado pelo sistema de controle cascata mostrado da Seção 4.2.1, com uma alteração. O sinal de controle foi ajustado para atuar da mesma forma aplicada na zona neutra do *fuzzy*, ou seja, o AL central retira a mesma quantidade que os ALs laterais combinados; no caso 2, o circuito é controlado pela proposta de controle *fuzzy*, apresentado na Seção 4.2.3.

Durante os testes, foi assumido que a granulometria do material, que compõe a pilha pulmão, varia com o tempo. As Figuras 5.4a e 5.4b mostram o comportamento ruidoso da granulometria do material extraído pelos alimentadores central e laterais, respectivamente. Manipulando o parâmetro k , apresentado na Equação 3.4, a eficiência do moinho foi ajustada ao longo da simulação. Na primeira metade do tempo, a eficiência foi reduzida, tendendo o peso a aumentar. Já na segunda metade do tempo, a eficiência foi aumentada, levando o peso a pa-

tameres baixos. Dessa forma, a taxa total definida pelo controlador cascata atingiria patamares de alta e baixa para controlar o peso, entrando nas zonas de atuação do controlador *fuzzy*.

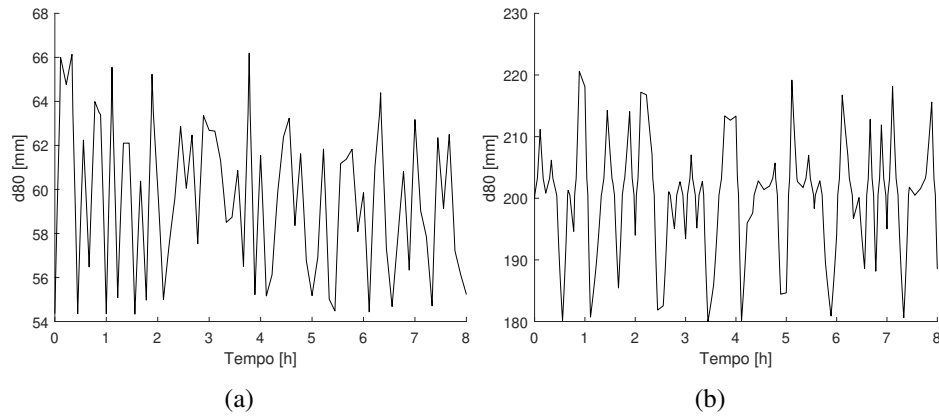


Figura 5.4: Granulometria do material extraído pelos ALs (a) central e (b) laterais.

A Figura 5.5 apresenta para ambos os casos testados as taxas de material retiradas da pilha pelo alimentador central e pelos dois alimentadores laterais combinados. Para o caso 1, conforme a configuração do controlador cascata, as taxas retiradas são idênticas em todos os instantes. No caso 2, nos instantes em que o *fuzzy* não atua, a taxa retirada pelo central é igual à soma das taxas retiradas pelos ALs laterais. Durante cerca de 5,21 horas, o controlador *fuzzy* ajustou a velocidade dos alimentadores de acordo com as regras da base de conhecimento. Nos intervalos de 0,68 a 4,29 h, a taxa total definida pelo controlador cascata atinge a zona baixa de atuação do controle *fuzzy*. Nesse momento, a velocidade do AL central aumenta ao passo que a velocidade dos ALs laterais reduz. E após a 5ª hora de simulação, foram quatro os intervalos de tempo em que diante de uma taxa total alta, a taxa de material retirada pelo AL central reduz e dos laterais aumenta.

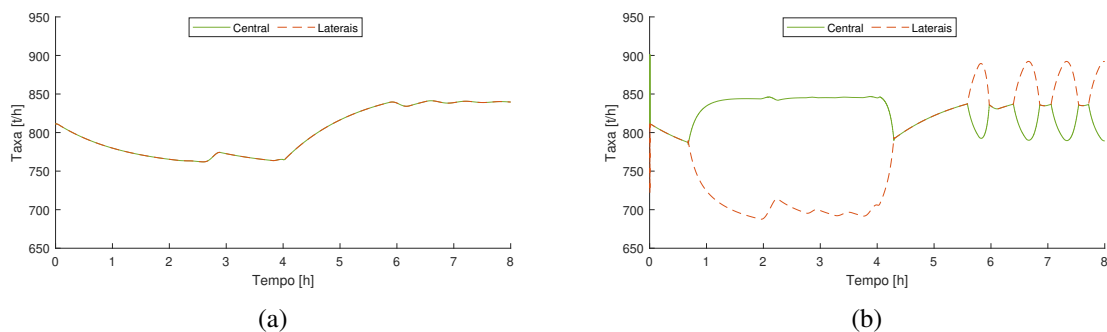


Figura 5.5: Taxa de material retirado pelos alimentadores no (a) caso 1 e (b) caso 2.

O diferente comportamento dos alimentadores mostrado na Figura 5.5 fez com que a granulometria da alimentação nova fosse diferente para os dois casos. Um comparativo desta granulometria é apresentada na Figura 5.6. Com o controlador *fuzzy* atuante, a distribuição

gramométrica do material é ajustada para facilitar o controle do peso. Por exemplo, o d80 do material novo no caso 2 foi menor durante o intervalo de 1 a 4 h, momento em que o peso estava acima do SP e havia a necessidade de reduzi-lo.

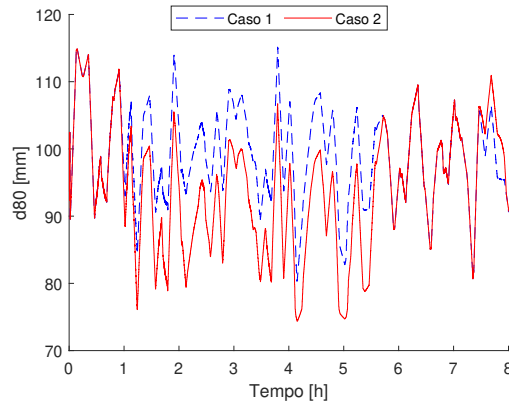


Figura 5.6: Granulometria da alimentação nova.

O *setpoint* de peso considerado nos testes foi de 820 t. A Figura 5.7 apresenta o peso do moinho e a taxa de retirada da pilha pulmão ao longo das simulações. O sistema de controle em ambos os casos é capaz de manter o peso do SAG no SP apesar das mudanças de eficiência do equipamento. Durante a 1ª e 4ª hora, intervalo em que o controle *fuzzy* atuou por mais tempo ininterruptamente, o peso do moinho SAG, no caso 2, alcançou o SP mais rápido e apresentou uma menor variabilidade. Durante a segunda metade da simulação, o comportamento do peso foi similar nos dois casos devido aos poucos instantes de atuação do *fuzzy*.

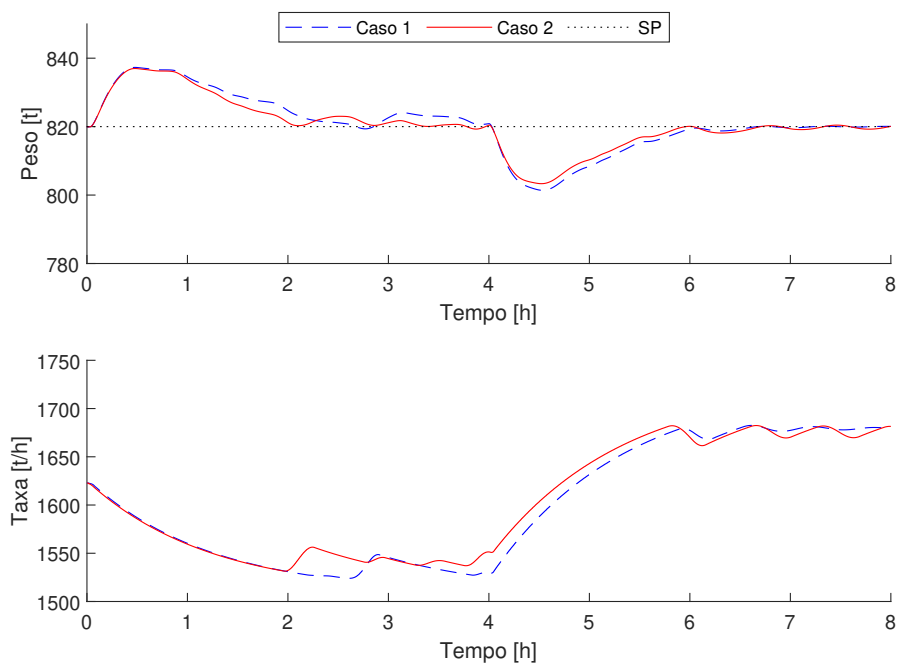


Figura 5.7: Comparação de peso do moinho SAG e taxa retirada da pilha com uso de estratégias de controle.

Caso 1: Controle em cascata; Caso 2: Controle em cascata e *fuzzy*

A Figura 5.8 apresenta a função de densidade de probabilidade do peso para os casos com e sem *fuzzy*. O desvio padrão do peso do moinho SAG com o controle *fuzzy* e sem o controle *fuzzy* foi, respectivamente, 7,55 t e 8,40 t, indicando uma redução de 10% no desvio padrão do peso do SAG quando o controle *fuzzy* estava atuante.

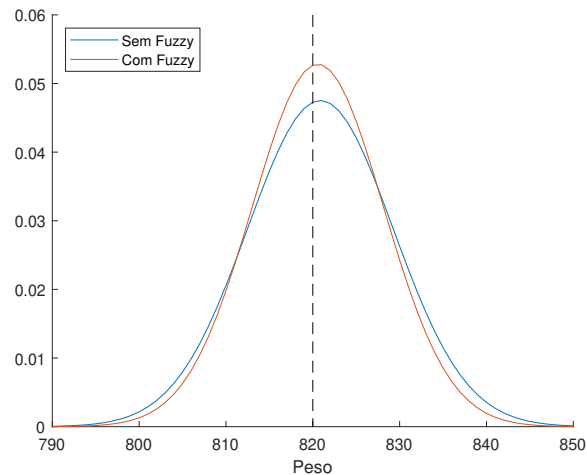


Figura 5.8: Função distribuição de probabilidade do peso - Com e sem uso de controlador *fuzzy*.

5.2. Resultados da Aplicação da Proposta de Controle na Planta Real de Sossego

Em junho de 2019, foi implantado o controlador cascata proposto no sistema de automação da ABB em Sossego. Inicialmente, ele foi mantido em malha aberta, isto é, lendo as variáveis pertinentes, calculando a ação de controle, mas sem aplicar a ação proposta no processo real. Durante três meses, o comportamento do controlador em malha aberta foi monitorado remotamente para avaliar possíveis ajustes.

Após os meses de monitoramento remoto, a malha do controlador foi fechada para testes. O controlador *feedforward* não foi ativado porque o analisador ótico que mede o d80 do material estava em manutenção. A sintonia dos controladores PID em cascata foi ajustada para se adequar às condições reais da planta. Foram introduzidas restrições na taxa total: mínimo de 2010 t/h e máximo de 2230 t/h, o que provoca uma restrição aproximada de 1650 t/h a 1870 t/h na taxa de retirada da pilha. Estes valores de restrição foram passados como a faixa de taxa que garante uma operação confortável ao operador.

Durante dois dias os parâmetros dos controles interno e externo foram ajustados. Devido às alterações do limite da ação do controlador e as condições operacionais da planta real, o ajuste tornou os controladores mais robustos, de forma que tomassem ações mais suaves evitando condições operacionais inadequadas. A Tabela 5.1 mostra o ajuste dos parâmetros dos controladores. Após o ajuste de sintonia, o controlador atuou por 4 horas seguidas na planta. Seu desempenho foi comparado por um período de tempo similar sob comando do operador

humano. A Figura 5.9 ilustra os grupos do ITV e de Sossego reunidos analisando e discutindo o comportamento do processo com base no histórico de dados.

Tabela 5.1: Ajuste de sintonia de controladores em teste na planta real.

Parâmetros	Controle interno		Controle externo	
	Kp	Ti	Kp	Ti
Simulador	0,0037	29,5	12,83	608,00
Planta real	0,0463	50	0,55	120

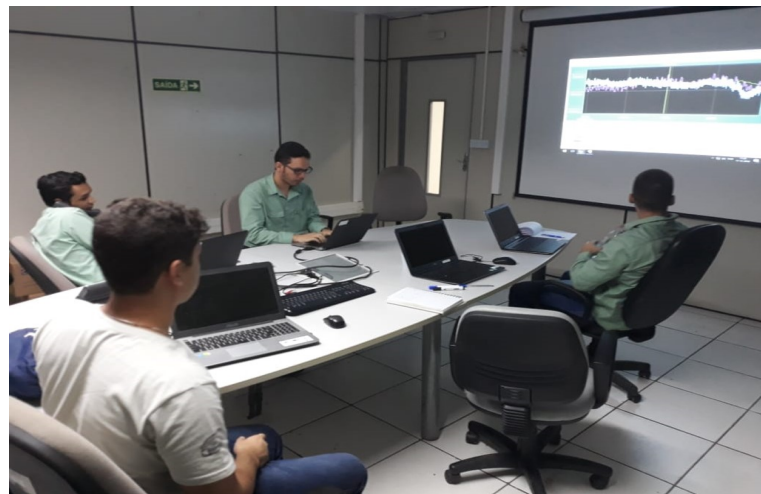


Figura 5.9: Equipe do ITV e de Sossego em reunião discutindo possíveis estratégias de controle a serem aplicadas ao SAG.

5.2.1. Ação do Controlador

O teste ilustrado nessa sessão iniciou às 09:38 e foi encerrado às 13:22 do dia 26/09/2019. Neste período, a malha do controlador cascata foi fechada e ele passou a controlar o peso do SAG automaticamente. O *setpoint* de peso estabelecido pela equipe de processos naquele dia foi de 930 t. A Figura 5.10 apresenta o peso do moinho SAG e a taxa de material retirado da pilha pulmão. A taxa nova oscila para cima e para baixo frequentemente, mas mantém sempre um patamar de taxa alta. Ao longo de todo o período, o peso do SAG esteve próximo ao *setpoint*.

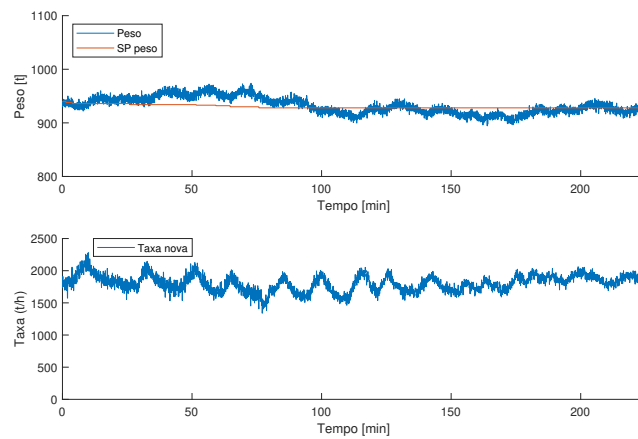


Figura 5.10: Peso do SAG e taxa de minério novo retirado da pilha - Resultado da ação do controlador.

As oscilações da taxa nova são devidas às variações de velocidade dos alimentadores com base no sinal de controle do controlador, como mostra a Figura 5.11. Mesmo com o controle cascata atuante, a decisão de quais alimentadores estavam ativos e qual a porcentagem de velocidade aplicada em cada um estava a cargo do operador na sala de controle. Buscando obter uma maior produção o operador empregou mais o alimentador central. A Figura 5.12 exibe o status de funcionamento de cada um dos alimentadores. Nos 80 primeiros minutos, todos os três alimentadores estavam ligados, e no mínimo dois deles estiveram ativos ao longo de todo o tempo. Quanto mais tempo os ALs laterais estiverem ligados, maior o desafio do teste. Isso acontece devido ao aumento da variabilidade do PSD do minério retirado da pilha.

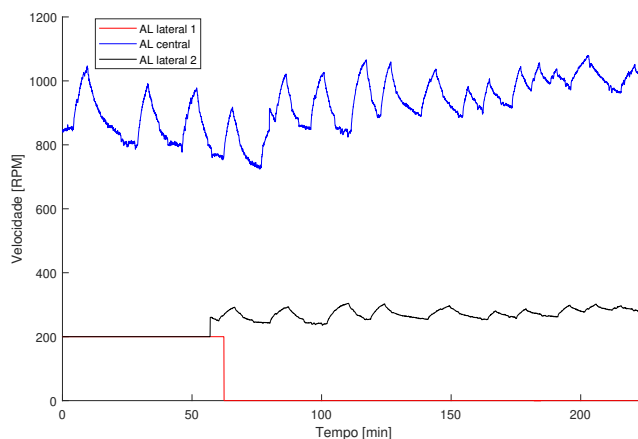


Figura 5.11: Velocidade dos Alimentadores.

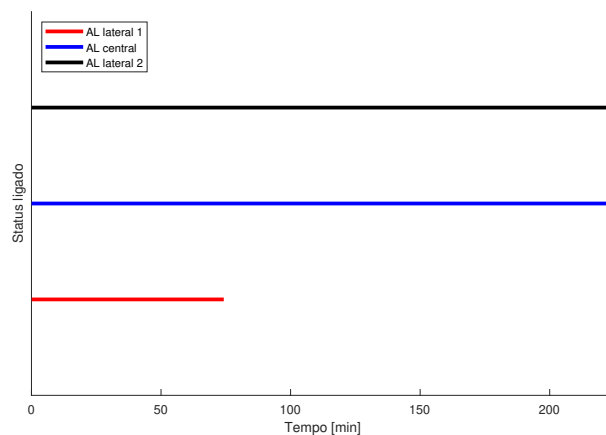


Figura 5.12: Status de funcionamento dos ALs ao longo do tempo.

5.2.2. Ação do Operador

Após o encerramento do período de teste apresentado na seção anterior, a malha do controlador cascata foi aberta e o controle do peso voltou à mão do operador. Ainda em 26/09/2019, das 13:30 às 16:47, foram analisados o peso e taxa nova do circuito, como mostra a Figura 5.13. Na primeira hora do período analisado, a taxa nova retirada da pilha pulmão foi mantida em um patamar alto e quase constante, e o peso se manteve próximo ao SP. Após esse tempo, no entanto, o peso começou a subir e se afastar do *setpoint*. O operador gradualmente reduziu a taxa de material novo na tentativa de retornar o valor do peso ao SP, até que próximo aos 150 min do período analisado, a taxa foi drasticamente reduzida.

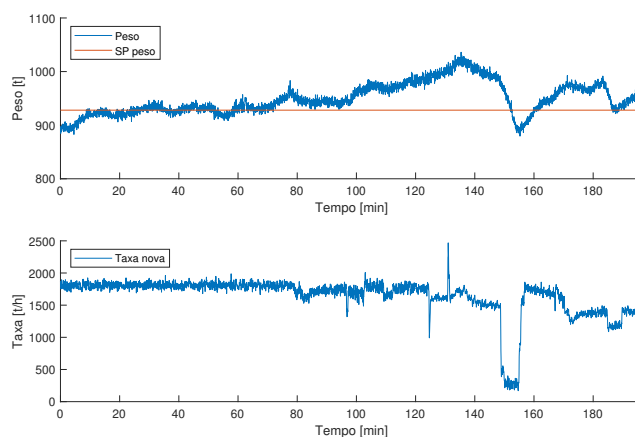


Figura 5.13: Peso do SAG e Taxa de minério novo retirado da pilha - Resultado da ação de Operadores.

As Figuras 5.14 e 5.15 ilustram como o operador manipulou os alimentadores para o controle do peso do SAG. O alimentador central foi novamente o mais acionado visando uma alta produção. Após cerca de 100 minutos, instante em que o peso começa a se afastar do SP,

a velocidade dos alimentadores começa a ser alterada de forma irregular. No instante em que houve a queda drástica de taxa nova, toda a taxa era proveniente do alimentador central. O operador desligou ambos os ALs laterais, alimentou o SAG só com finos na tentativa de abaixar o peso do moinho. Foram cerca de 30 minutos com o uso exclusivo do alimentador central durante todo o período analisado.

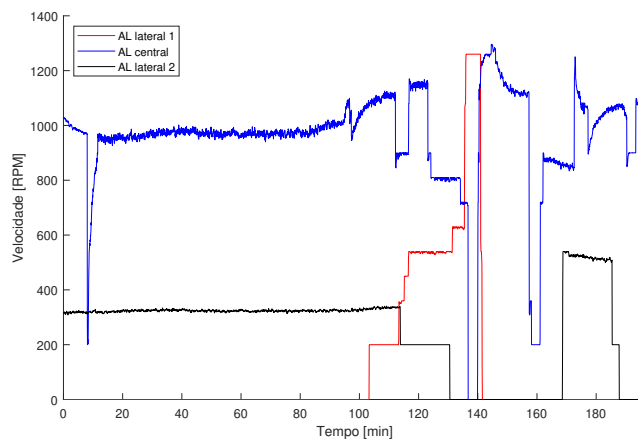


Figura 5.14: Velocidade dos Alimentadores.

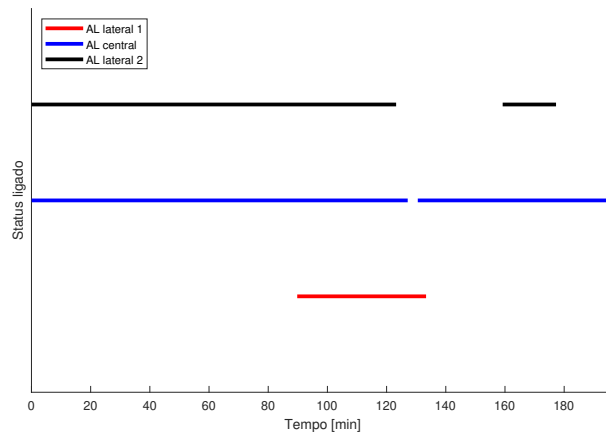


Figura 5.15: Status de funcionamento dos ALs ao longo do tempo.

5.2.3. Discussão de resultados

Os dois testes apresentados nas seções anteriores foram realizados no mesmo dia e em sequência. Em ambos os experimentos, o peso de 930 t foi considerado como referência. Com o controle proposto, o peso do SAG teve um desvio padrão de 15,36 t, e sob o comando do operador, 29,47 t. Isto indica uma redução de 47,88% do desvio padrão do peso no SAG quando utilizado o controlador proposto. Como pode ser visto na Figura 5.16, que mostra a função de densidade de probabilidade do peso para os dois testes, a média do peso para o teste com controlador está mais próxima do *setpoint* determinado.

A produção do circuito aumentou em 10,02% com o uso do controle automático proposto. A média de taxa de minério retirada da pilha pulmão foi de 1804,6 t/h sob o comando do controlador e de 1640,24 t/h sob o comando do operador. A função de densidade de probabilidade da taxa nova, ilustrada na Figura 5.17, ilustra também que a taxa nova teve menor dispersão ao longo do período analisado.

Além da melhora na produção, o uso do controlador proposto reduziu o consumo energético do moinho SAG em 2,07%. A potência média requerida pelo SAG foi de 15,12MW durante o período com o controlador proposto. Durante o período com o operador, a potência requerida foi de 15,44MW.

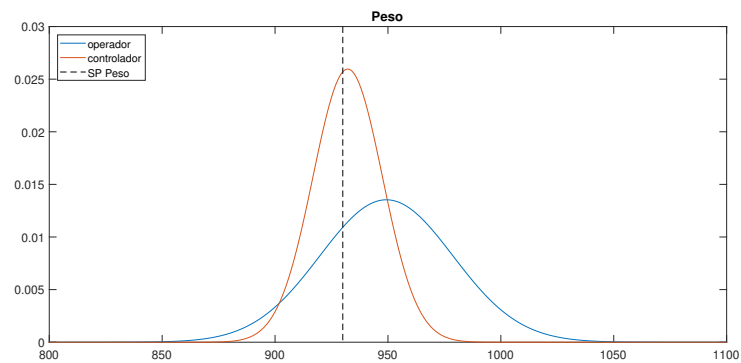


Figura 5.16: Função distribuição de probabilidade do peso - com uso do controlador e sob comando do operador.

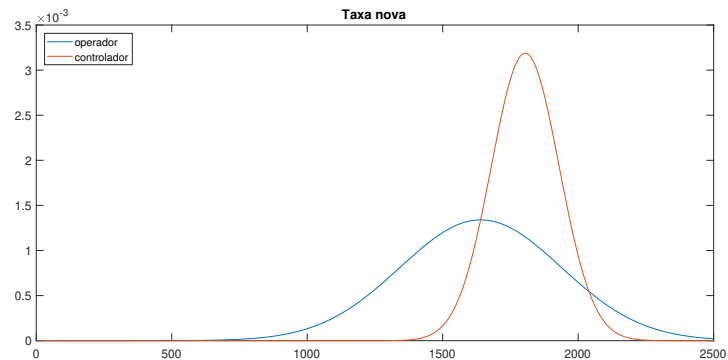


Figura 5.17: Função distribuição de probabilidade da taxa de minério - com uso do controlador e sob comando do operador.

6. Conclusão

Ao final deste trabalho é possível responder às questões levantadas na Seção 1.4.

1. É possível projetar um controlador simples e eficaz capaz de reduzir a variabilidade do peso de material no SAG?

R: Sim. Foi constatado por meio do uso da simulação do modelo digital do circuito de moagem SAG e rebritagem da planta de Sossego que as estratégias de controle desenvolvidas são capazes de reduzir a variabilidade do peso no SAG. As estratégias propostas neste trabalho não são triviais, porém são simples o suficiente para serem implementadas no equipamento da ABB disponível em Sossego. E como foi apresentado no Capítulo 5, foi obtida uma redução de 47,88% no desvio padrão do peso de material no SAG durante experimento com o controlador proposto.

2. O quanto a estabilidade no peso de material no SAG aumenta a produtividade do circuito?

R: A estabilidade do peso melhora a eficiência de quebra do moinho e garante um aumento de produção do circuito. De acordo com o Capítulo 5, a taxa de material retirada da pilha pulmão foi 10,02% maior com o controlador proposto ativo.

3. Qual o impacto do uso do controlador no consumo energético do SAG?

R: Além de aumentar a produção, uma maior estabilidade do peso no moinho reduz o consumo energético do equipamento. A operação do SAG com o controlador proposto obteve uma redução de 2,07% no consumo energético.

4. O controlador *fuzzy* melhorou a distribuição granulométrica de material retirado da pilha pulmão?

R: Sim. Como apresentado da Seção 5.1.2, o controlador *fuzzy* ajusta a velocidade dos alimentadores de acordo com a taxa total definida pelo controlador cascata. Dessa forma, a distribuição granulométrica na alimentação nova é ajustada para favorecer o controle do peso do moinho SAG.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de estratégias de controle avançadas para redução da variabilidade do peso de minério dentro do moinho SAG da usina de Sossego. A motivação para este projeto surgiu da necessidade de melhorar o desempenho do equipamento e aumentar a produtividade da usina. Testes em laboratório e em campo apresentaram resultados positivos no uso destas estratégias de controle. Com elas, será possível liberar o operador de uma das suas várias funções, deixando-o encarregado apenas de gerir eventuais exceções; tomar ações mais assertivas para controle de variáveis; e gerar ganhos ao circuito.

As pesquisas e atividades realizadas durante este trabalho levaram à publicação de uma patente, número BR1020200048546, depositada em 11/03/2020. Intitulada “SISTEMA E MÉTODO PARA CONTROLAR UM CIRCUITO DE COMINUIÇÃO INCLUINDO UM

MOINHO”, a patente apresenta um sistema automático para controle de peso de moinhos com base em um controlador cascata aliado a um controlador *feedforward*. Este sistema de controle atua na velocidade dos alimentadores para alimentar o SAG com a taxa de material definida pelo controlador cascata. Esta taxa de material é constantemente compensada pela ação do controlador *feedforward* com base na granulometria do minério. É incluído também um sistema de controle da velocidade de rotação do moinho com base na posição dos corpos moedores no interior do equipamento.

6.1. Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos em testes de laboratório e em campo foram promissores. No entanto, recomenda-se aplicar estas estratégias de controle na usina real por um período de tempo maior, cerca de um mês, para maior avaliação. Como etapa anterior à aplicação na usina, recomenda-se criar telas que exibam informações do controlador no sistema supervisório da sala de controle. Além de exibir informações, as telas também devem permitir que o operador atue sobre o processo, sobreescrevendo a ação do controlador, quando achar conveniente. Desta maneira, o operador deve se sentir mais confortável e seguro durante o período de transição do controle do circuito de manual para automático.

Como apontado por Wang *et al.* (2020), a operação de moinhos SAG com velocidade constante acarreta em um alto consumo energético, e uma menor eficiência de moagem. Recomenda-se aprimorar as estratégias de controle incluindo a rotação do moinho SAG como variável manipulada do controlador. Durante o desenvolvimento deste trabalho, o instrumento usado para alterar a velocidade de rotação do moinho SAG não estava disponível na planta. Atualmente, ele já se encontra operante.

Referências Bibliográficas

- APELT, T., ASPREY, S., THORNHILL, N. “Inferential measurement of SAG mill parameters”, *Minerals Engineering*, v. 14, n. 6, pp. 575–591, 2001.
- AUSTIN, L., BARAHONA, C., WEYMONT, N., et al.. “An improved simulation model for semi-autogenous grinding”, *Powder technology*, v. 47, n. 3, pp. 265–283, 1986.
- BERGERMAN, M. G. *Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2009.
- BOSCHERT, S., ROSEN, R. “Digital twin—the simulation aspect”. Em: *Mechatronic futures*, Springer, pp. 59–74, 2016.
- BOUFFARD, S. C. “Benefits of process control systems in mineral processing grinding circuits”, *Minerals Engineering*, v. 79, pp. 139–142, 2015.
- BRADFORD, S. “An expert system for control of A SAG/BALL Mill Circuit”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 25, n. 17, pp. 1–6, 1992.
- BRANN, D. B., THURMAN, D. A., MITCHELL, C. M. “Human interaction with lights-out automation: A field study”. Em: *Proceedings Third Annual Symposium on Human Interaction with Complex Systems. HICS’96*, pp. 276–283. IEEE, 1996.
- CARVALHO, R., TAVARES, L. “A mechanistic model of SAG mills”, *Proceedings of the IMPC*, 2014.
- CHAVES, A., PERES, A. “colaboradores, Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Vol. III, Britagem, Desaguamento e Moagem”, *Brasil–São Paulo*, 2003.
- DAI, X., LI, C.-K., RAD, A. B. “An approach to tune fuzzy controllers based on reinforcement learning for autonomous vehicle control”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 6, n. 3, pp. 285–293, 2005.
- DUARTE, R., JÚNIOR LOPES, E., PINTO, T., et al.. *Simulação dos Efeitos de Substituição dos Britadores CH660 por Britadores CH860 na Britagem Terciária de S11D*. Ouro Preto, 2019. Relatório Técnico PROD. TEC. ITV. MI- N0011/2019 ”Restrito”.

- DUARTE, R., , PINTO, T., et al.. *Simulação Dinâmica da Área 2012 de S11D*:. Suporte à Decisão na Alteração da Lógica de Controle e Repotenciamento do Cabeça Móvel. Ouro Preto, 2020. Relatório Técnico PROD. TEC. ITV. MI- N0015/2020 "Restrito".
- EUZÉBIO, T., PINTO, T., OLIVEIRA, G. O. D., et al.. "Resultado parcial da aplicação do controle automático do peso de material no moinho SAG em Sossego", 2019. Relatório Técnico PROD. TEC. ITV. MI- N0007/2019 "Restrito". DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2019.7.Euzebio.
- FLINTOFF, B., PLITT, L., TURAK, A. "Cyclone modeling—a review of present technology", *CIM[Canadian Institute of Mining and Metallurgy] Bulletin*, v. 80, n. 905, pp. 39–50, 1987.
- FORSMAN, K. "Implementation of advanced control in the process industry without the use of MPC", *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 7, pp. 514–519, 2016.
- GALÁN, O., BARTON, G., ROMAGNOLI, J. "Robust control of a SAG mill", *Powder Technology*, v. 124, n. 3, pp. 264–271, 2002.
- GARRIDO, C. Q., SBARBARO, D. H. "Multivariable Model Predictive Control of a Simulated SAG plant", *IFAC Proceedings Volumes*, v. 42, n. 23, pp. 37–42, 2009.
- GOMEZ-RAMIREZ, E., CHÁVEZ-PLACENCIA, A. "How to tune fuzzy controllers". Em: *2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No. 04CH37542)*, v. 3, pp. 1287–1292. IEEE, 2004.
- GUERRERO, F., BOUCHARD, J., POULIN, É., et al.. "Real-time simulation and control of a SAG mill", *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 20, pp. 61–66, 2016.
- GUPTA, A., YAN, D. S. *Mineral processing design and operations: an introduction*. Elsevier, 2016.
- GUZMÁN, J. L., HÄGGLUND, T. "Simple tuning rules for feedforward compensators", *Journal of Process Control*, v. 21, n. 1, pp. 92–102, 2011.
- HERBST, J., PATE, W., OBLAD, A. "Model-based control of mineral processing operations", *Powder Technology*, v. 69, n. 1, pp. 21–32, 1992.
- JENTZEN, J. "Foundations of fuzzy control: a practical approach". 2013.
- JÚNIOR, Ê. L., FERREIRA, A. E., MOREIRA, V. S., et al.. "PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY MULTIVARIÁVEL PARA UMA PLANTA DE DESAGUAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO", *XXII Congresso Brasileiro de Automática*, 2018.

- KIME, M. “Using discrete element method to investigate ball milling power draw, load behaviour and impact energy profile under various milling conditions”, 2016.
- KING, R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2001.
- LATCHIREDDI, S. R. “Modelling the performance of grates and pulp lifters in autogenous and semi-autogenous mills”, 2002.
- LOPES JÚNIOR, Ê. “Estratégias de controle regulatório avançado para uma planta de desaguamento de minério de ferro.” 2019.
- MAGALHAES, S., EUZÉBIO, T. “Supervisory fuzzy controller for thickener underflow solids concentration on a simulated platform”. Em: *6th International Congress on Automation in Mining. GECAMIN*, 2018.
- MARITZ, M., LE ROUX, J., CRAIG, I. “Feed Size Distribution Feedforward Control for a Grinding Mill Circuit”, *IFAC-PapersOnLine*, v. 52, n. 14, pp. 7–12, 2019.
- MORRELL, S. “The Effect of Aspect Ratio on the Grinding Efficiency of Open and Closed Circuit AG/SAG Mills”. 01 2007.
- MORRELL, S. “A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation”, *Minerals Engineering*, v. 17, n. 3, pp. 437–445, 2004.
- MORRELL, S. “Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits”, *Minerals Engineering*, v. 22, n. 6, pp. 544–549, 2009.
- MORRELL, S., VALERY, W. “Influence of feed size on AG/SAG mill performance”, *SAG2001, Vancouver, BC, Canada*, 2001.
- NAPIER-MUNN, T. J., MORRELL, S., MORRISON, R. D., et al.. “Mineral comminution circuits: their operation and optimisation”, 1996.
- NGUYEN, H. T., WALKER, C. L., WALKER, E. A. *A first course in fuzzy logic*. CRC press, 2018.
- PINTO, T. V. B., EUZÉBIO, T. A. M. “Sistemas de Controle no Processo de Flotação: Teoria e Considerações”, In: *19º Simpósio de Mineração*, v. 19, pp. 168–177, 2018.
- RIVERA, D. E. “Internal model control: a comprehensive view”, *Arizona State University*, 1999.
- RUEL, M. “Fuzzy Logic Control On a SAG Mill”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 46, n. 16, pp. 282–287, 2013.

- SALAZAR, J., MAGNE, L., ACUNA, G., et al.. “Dynamic modelling and simulation of semi-autogenous mills”, *Minerals Engineering*, v. 22, n. 1, pp. 70–77, 2009.
- SALAZAR, J.-L., VALDÉS-GONZÁLEZ, H., VYHMESITER, E., et al.. “Model predictive control of semiautogenous mills (sag)”, *Minerals Engineering*, v. 64, pp. 92–96, 2014.
- SANTOS, M. S., PINTO, T. V. B., JÚNIOR, Ê. L., et al.. “Aplicação de *Simheuristic* para Operação Eficiente de um Circuito de Britagem”, In: *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, v. 1, pp. 108436, 2019.
- SANTOS, M. S., PINTO, T. V. B., 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.
- SBARBARO, D., BARRIGA, J., VALENZUELA, H., et al.. “A multi-input-single-output smith predictor for feeders control in SAG grinding plants”, *IEEE transactions on control systems technology*, v. 13, n. 6, pp. 1069–1075, 2005.
- SEBORG, D. E., MELLICHAMP, D. A., EDGAR, T. F., et al.. *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2010.
- SILVA, M., CASALI, A. “Modelling SAG milling power and specific energy consumption including the feed percentage of intermediate size particles”, *Minerals Engineering*, v. 70, pp. 156–161, 2015.
- SIVANANDAM, S., SUMATHI, S., DEEPA, S., et al.. *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*, v. 1. Springer, 2007.
- TAN, H. “A brief history and technical review of the expert system research”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 242, p. 012111. IOP Publishing, 2017.
- TAO, F., CHENG, J., QI, Q., et al.. “Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 9-12, pp. 3563–3576, 2018.
- TEIXEIRA, E. H. C. G., OTHERS. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher, 2010.
- THORNTON, A., PETHYBRIDGE, T., RIVETT, T., et al.. “SAG mill control at Northparkes Mines (not so hard after all)”, *MIPAC report*, 2005.
- TORGA, D. S. “Método de sintonia ótimo PID em sistema cascata: aplicação em controle de densidade de um processo simulado de remoagem.” 2018.

- VAN NIEROP, M., MOYS, M. “Measurement of load behaviour in an industrial grinding mill”, *Control Engineering Practice*, v. 5, n. 2, pp. 257–262, 1997.
- VAN NIEROP, M., MOYS, M. “Exploration of mill power modelled as function of load behaviour”, *Minerals Engineering*, v. 14, n. 10, pp. 1267–1276, 2001.
- VAN ZYL, F., PAQUOT, F., FOUCHE, F., et al.. “Implementation of a SAG Grinding Expert System at Kansanshi Mine-Zambia”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 46, n. 16, pp. 176–181, 2013.
- WADE, H. L. *Basic and advanced regulatory control: system design and application*. ISA, 2004.
- WANG, X., YI, J., ZHOU, Z., et al.. “Optimal Speed Control for a Semi-Autogenous Mill Based on Discrete Element Method”, *Processes*, v. 8, n. 2, pp. 233, 2020.
- WEI, D., CRAIG, I. K. “Grinding mill circuits—a survey of control and economic concerns”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 90, n. 1-4, pp. 56–66, 2009.
- WILLS, B. A., FINCH, J. *Wills’ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- YIN, Z., PENG, Y., ZHU, Z., et al.. “Impact load behavior between different charge and lifter in a laboratory-scale mill”, *Materials*, v. 10, n. 8, pp. 882, 2017.
- YUTRONIC, I., TORO, R., OTHERS. “Design and implementation of advanced automatic control strategy based on dynamic models for high capacity SAG mill”. Em: *42nd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, pp. 461–472, 2010.

A. Matriz de quebra do britador simulado

	mm	230,2	152,4	76,2	63,5	50,8	38,1	25,4	19,05	12,7	9,525	6,35	3,175	2,36	1,7	1,18	0,85	0,6	0,425	0,3	0,212	0,15	0,106	0,074	0,052	0,037
	230,2	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	152,4	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	76,2	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	63,5	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	50,8	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	38,1	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	25,4	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	19,05	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12,7	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9,525	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6,35	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3,175	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2,36	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1,7	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1,18	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0,85	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0,6	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	0	
	0,425	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	0	
	0,3	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	0	
	0,212	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	0	
	0,15	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	0	
	0,106	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	
	0,074	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	0	0	
	0,052	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,008	0,01	0,021	0,046	0,081	0,132	0,088	0,088	0,078	0,114	0,156	0,156	0,075	
	0,037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,032	0,113	0,245	0,333	0,421	0,519	0,613	0,769	0,925	1