



**INSTITUTO
TECNOLÓGICO
VALE**

**Programa de Mestrado 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

**SOLUCIONANDO INSTABILIDADES NOS PROCESSOS DE PENEIRAMENTO E
BRITAGEM NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO POR MEIO DE ESTRATÉGIA DE
CONTROLE OVERRIDE**

Kaike Silva Albuquerque

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2023**

Kaike Silva Albuquerque

**SOLUCIONANDO INSTABILIDADES NOS PROCESSOS DE PENEIRAMENTO E
BRITAGEM NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO POR MEIO DE ESTRATÉGIA DE
CONTROLE OVERRIDE**

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: Thiago Antonio Melo Euzébio, D.Sc.

Ouro Preto
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A345s Albuquerque, Kaike Silva.

Solucionando instabilidades nos processos de peneiramento e britagem na indústria da mineração por meio de estratégia de controle override. [manuscrito] / Kaike Silva Albuquerque. - 2023.
71 f.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Automação - Minas e mineração. 2. Beneficiamento de minério - Britagem. 3. Otimização e controle de processos. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.73

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kaike Silva Albuquerque

Solucionando instabilidades nos processos de peneiramento e britagem na indústria da mineração por meio de estratégia de controle override

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

Aprovada em 20 de outubro de 2023

Membros da banca

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Helmholtz-Zentrum Dresden
Rossendorf

Doutora - Tatianna Aparecida Pereira Beneteli - Instituto Tecnológico Vale

Doutor - Ernandes Sávio de Souza - Vale

Doutor - Andrei Giordano Holanda Battistel - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Doutor - Moisés Tavares da Silva - Universidade Federal de Pernambuco

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho**,
COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST.
CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO, em
15/01/2024, às 11:46, 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?](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)
[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) , informando o código
verificador **0650736** e o código CRC **55F46FCB**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº
23109.000147/2024-72

SEI nº
0650736

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

*Dedico este trabalho á minha mãe
por todo o seu esforço em me
prover educação de qualidade e
condições de buscar realizar todos
meus sonhos*

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram ao longo desta jornada, com um agradecimento especial a Deus, a quem devo a minha vida. À minha família, e especialmente aos meus pais, que sempre me apoiaram nos estudos e nas escolhas que fiz, proporcionando-me uma formação adequada para o meu crescimento pessoal e profissional. Quero também expressar de forma especial minha gratidão à minha esposa, Marina Brandão, por seu constante incentivo e por caminhar ao meu lado nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Thiago Euzébio, que me acompanha ao longo de vários anos, incentivando minha trajetória acadêmica e profissional. Aos meus colegas de trabalho, Alexandre Fonseca, Robson Duarte e Thomas Vargas, bem como a toda a equipe de processo da Vale, agradeço pela parceria e pela disposição em me auxiliar em diversos trabalhos e discussões.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão ao Instituto Tecnológico Vale, à Vale e aos meus gestores na Vale, João Gomes, Hemaguch Troseski e Tiago Leite, pela oportunidade de retomar os estudos e por compreenderem a importância desse período para o meu desenvolvimento. Todos vocês desempenharam um papel fundamental em minha jornada, e sou imensamente grato por isso.

*“Somente se aproxima da
perfeição quem a procura com
constância, sabedoria e, sobretudo
humildade.”
(Jigoro Cano)*

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.)

SOLUCIONANDO INSTABILIDADES NOS PROCESSOS DE PENEIRAMENTO E BRITAGEM NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO POR MEIO DE ESTRATÉGIA DE CONTROLE OVERRIDE

Kaike Silva Albuquerque

Outubro/2023

Orientador: Thiago Antonio Melo Euzébio

O processamento de minério de ferro à umidade natural representa um desafio substancial na indústria de mineração. Melhorar a produtividade dos circuitos, otimizar o desempenho e prolongar a vida útil dos equipamentos são prioridades cruciais. Nesse contexto, a disciplina de otimização e controle desempenha um papel vital na automatização dos processos, com o propósito de maximizar a eficiência e promover a sustentabilidade das operações de mineração. O desafio consiste em integrar de forma inovadora e eficaz as disciplinas de automação com o tratamento de minério, a fim de mitigar as instabilidades no processo. Essas instabilidades resultam em frequentes interrupções no processo de curta duração, porém numerosas, transformando, em diversos momentos, um processo contínuo em batelada. Essas breves interrupções impactam negativamente a eficiência das operações. Assim, este trabalho apresenta soluções desenvolvidas em estratégia de controle override em duas operações unitárias distintas: peneiramento e britagem. As melhorias implementadas na etapa de peneiramento, são baseadas em uma análise de correlação identificada entre a corrente de acionamento da peneira e as características do minério que resultou em redução de 67% das paradas por sobrecargas e 71% das paradas por intertravamentos de processo. Também será apresentada uma nova estratégia de controle realizada para etapa de britagem que reduziu em 83% as microparadas operacionais através de um controle override do nível dos silos, sem comprometer o controle de nível da câmara do britador. Todas essas soluções resultaram em estabilidade dos processos, refletindo em um aumento da eficiência, produtividade e segurança dos ativos envolvidos.

Palavras-chave: Peneiramento a umidade natural, Otimização e controle, Controle Override, Britagem.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Instrumentação , Controle e Automação em Processos de Mineração; **Tema:** Análises e Sistemas de Controle Avançado; **Área Relacionada da Vale:** Unidade Operacional Serra Sul.

Abstract

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

SOLVING INSTABILITIES IN SCREENING AND CRUSHING PROCESSES IN THE MINING INDUSTRY THROUGH OVERRIDE CONTROL STRATEGY

Kaike Silva Albuquerque

October/2023

Advisor: Thiago Antonio Melo Euzébio

The processing of iron ore with natural moisture content represents a substantial challenge in the mining industry. Enhancing circuit productivity, optimizing performance, and extending equipment lifespan are crucial priorities. In this context, the discipline of optimization and control plays a vital role in automating processes with the aim of maximizing efficiency and promoting the sustainability of mining operations. The challenge lies in innovatively and effectively integrating automation disciplines with ore treatment to mitigate process instabilities. These instabilities lead to frequent, albeit brief, interruptions in the process, at various times, transforming a continuous process into a batch process. These brief interruptions have a negative impact on operational efficiency. Thus, this work presents solutions developed through an override control strategy in two distinct unit operations: screening and crushing. The improvements implemented in the screening stage are based on an identified correlation analysis between the sieve drive current and ore characteristics, resulting in a 67% reduction in stoppages due to overloads and a 71% reduction in process interlock stoppages. Additionally, a new control strategy will be presented for the crushing stage, which reduced operational micro-stoppages by 83% through silo level override control, without compromising the crusher chamber level control. All of these solutions have led to process stability, resulting in increased efficiency, productivity, and safety of the assets involved.

Keywords: Natural moisture screening, Optimization and control, Override control, Crushing.

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Instrumentation, Control, and Automation in Mining Processes; **Theme:** Advanced Analysis and Control Systems; **Related Area of Vale:** Serra Sul Operational Unit.

Lista de Figuras

Figura 2.1	Carta de Controle da corrente elétrica do Motor da Peneira	20
Figura 2.2	Fluxograma Usina Beneficiamento S11D	21
Figura 2.3	Peneira Vibratória - Modelo Peneiramento Primário de S11D	22
Figura 2.4	Carta Controle Índice de Minério Hidratado	24
Figura 2.5	Teste Peneirabilidade	26
Figura 2.6	Histograma de H2O	27
Figura 2.7	Histograma de IMH	28
Figura 2.8	Histograma de PPC	28
Figura 2.9	Análise de Regressão Múltipla 01 PN's	29
Figura 2.10	Análise de Regressão Múltipla 02 PN's	30
Figura 2.11	Sistema de Controle Peneiramento Primário	31
Figura 2.12	Novo Diagrama de Controle Peneiramento Primário	33
Figura 2.13	Tempo de Operação em modo Manual	34
Figura 2.14	Contagem de Intertravamentos	35
Figura 3.1	Princípio Fator de Peneiramento = K - Teoria Básica.	37
Figura 3.2	Fluxograma Análises Condições Peneiramento	38
Figura 3.3	Eficiência de Peneiramento Primário S11D	38
Figura 3.4	Algoritmo Controle de Rotação	40
Figura 3.5	Teste Comissionamento Projeto Controlador de Rotação	41
Figura 3.6	Resultados Projeto Controlador de Rotação Peneiras	42
Figura 3.7	Paradas por nível baixo	44
Figura 3.8	Paradas por nível alto	44
Figura 3.9	Diagrama Controle de nível de silo	45
Figura 3.10	Disposição Genérica Elementos Controlador Fuzzy.	46
Figura 3.11	Resultados Balanceamento Nível Silos	48
Figura 3.12	Resultados Frequência de Paradas Alimentadores	49
Figura 4.1	Britagem Terciária em Serra Sul.	53
Figura 4.2	Fluxograma do peneiramento secundário e da britagem terciária de Serra Sul.	54
Figura 4.3	Estrutura do controlador <i>override</i> proposto.	56
Figura 4.4	Frequência de microparadas.	58

Figura 4.5	Histograma de microparadas pelo tempo	59
Figura 4.6	Nível de câmara dos britadores.	60
Figura 4.7	Recuperações de nível de câmara dos britadores.	60
Figura A.1	Comprovante Submissão Artigo 01	69
Figura A.2	Certificado SBAI Artigo Peneiramento	70
Figura A.3	Comprovante Submissão Artigo 02	70
Figura A.4	Certificado SBAI Artigo Britagem	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Análise química por litologia.	24
Tabela 2.2	Composição mineralógica.	25
Tabela 3.1	Variáveis <i>Fuzzy</i>	46
Tabela 3.2	Valores Linguísticos	47
Tabela 3.3	Parâmetros Controlador <i>Override</i> Nível Baixo de silos	47
Tabela 4.1	Parâmetros para o controle <i>override</i> BR's.	57

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABB Empresa: Asea Brown Boveri

AL's Alimentadores

BR's Britadores

CE Canga Estrutural

CO Controller Output

CPT Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale

HF Hematita Friável

HGO Hematita Goethítica

IMH Índice de Minério Hidratado

LSC Limite Superior de Controle

MV Variável manipulável

OP Controller Input

PI Controlador Proporcional Integrativo

PN's Peneiras

PPC Perda por Calcinação

PV Variável de Processo

ROM Run of Mine

S11D Unidade Operacional Serra Sul Vale em Canaã dos Carajas/PA

SBAI (2023) XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente

SP Setpoint

TCLD Transportador de Correia de Longa Distância

Sumário

1	Apresentação	15
1.1	Produtos Gerados	15
1.2	Perguntas chaves	16
2	Parte A-1: Controlador de Corrente em Peneiramento Primário Serra Sul	17
2.1	Introdução	17
2.1.1	Motivação	19
2.1.2	Hipótese	19
2.1.3	Objetivos	20
2.1.4	Delimitação do tema	20
2.2	Equipamentos e Fluxograma	21
2.3	Circuito de Peneiramento Primário de Serra Sul	21
2.4	Litologia do minério	23
2.5	Metodologia	23
2.5.1	Estudo de peneiramento em laboratório	23
2.5.2	Análise de Correlação dos dados industriais	27
2.6	Sistema de Controle original do Peneiramento Primário	29
2.7	Controle <i>Override</i> Proposto	32
2.7.1	Novo Controle do Peneiramento Primário	32
2.8	Resultados da Aplicação Prática em Serra Sul	32
2.9	Conclusão	33
3	Parte A-2: Controle de Rotação de peneira e Controle de nível de Silo	36
3.1	Projeto para controle de Rotação Peneiras	36
3.1.1	Introdução	36
3.1.2	Objetivo	39
3.1.3	Metodologia	39
3.1.4	Resultados	41
3.2	Projeto para controlar o nível de silo	42
3.2.1	Introdução	43
3.2.2	Objetivos	45

3.2.3	Metodologia Controlador <i>Fuzzy</i>	45
3.2.4	Metodologia Controlador <i>Override</i> Nível Baixo de Silo	47
3.2.5	Resultados	48
4	Parte B: Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador <i>override</i>	50
4.1	Introdução	50
4.1.1	Motivação	51
4.1.2	Hipótese	51
4.1.3	Objetivos	52
4.1.4	Delimitação do tema	52
4.2	O processo de britagem terciária em Serra Sul	52
4.3	Controlador <i>Override</i> Proposto	55
4.4	Resultados	57
4.5	Conclusão	59
5	Conclusão	62
6	Trabalhos futuros	64
	Referências Bibliográficas	65
	Anexos	66
A	Anexos	67
A.1	Anexo A: Produtos gerados	67
A.1.1	Artigo: Controle <i>Override</i> De Corrente elétrica para aumento de eficiência de peneiramento no Processo Mineral	67
A.1.2	Artigo: Aumento da continuidade operacional de um circuito por meio de um controle <i>override</i>	67
A.2	Anexo B: Pedido de Patente	67
A.2.1	Resumo	67
A.2.2	Campo Técnico	68
A.2.3	Problema a ser resolvido	68
A.2.4	Solução Proposta	68

1. Apresentação

Este documento consiste em uma coletânea de trabalhos baseados em melhorias de controle e otimização para processo de mineração em duas importantes etapas de processo: peneiramento e britagem. Na parte A-1 e A-2 serão apresentadas melhorias realizadas em uma etapa de peneiramento que proporcionou um artigo e um depósito de uma patente em andamento, e fundamenta-se em um estudo de correlação entre características físicas do minério com a corrente de acionamento da peneira. Está mesma correlação encontrada propicio diversas melhorias para esta etapa de peneiramento e quando aplicado em escala industrial apresentaram ganhos em estabilidade operacional. Na parte B, será abordado uma melhoria realizada na etapa de britagem, que visa aumentar a continuidade operacional, por meio de um novo controlador *override* de nível de silo que alimenta o circuito.

1.1. Produtos Gerados

Em síntese, o estudo apresentado conduziu a uma metodologia aplicada no processo de peneiramento e à implementação de novas estratégias de controle, todas desenvolvidas e comissionadas para a unidade operacional de Serra Sul, trazendo ganhos expressivos para o processo produtivo.

Resumidamente, segue abaixo os principais resultados encontrados:

- Para o Circuito de peneiramento primário:
 - 1- Aumento de 5,1% no tempo de operação em modo automático;
 - 2- Redução de 67% nas paradas por sobrecargas,
 - 3- Redução de 87% do tempo de operação em alta rotação das peneiras, elevando vida útil do equipamento,
 - 4- Redução de 71,4% das paradas por nível baixo e alto das linhas de peneiramento e
 - 5- Redução de 34,6% do desvio entre os níveis de silos.
- Para o Circuito de britagem terciária:
 - 1- Redução de 83% nas pequenas paradas operacionais por nível baixo, sem comprometer o controle de nível de câmara do britador e eficiência de britagem;

Segue abaixo resumo das melhorias implementadas e entregues neste trabalho:

- 1-Correlação encontrada entre Corrente de acionamento da peneira com características do minério;
- 2- Controlador *Override* de Corrente das Peneiras;
- 3- Controlador de rotação das Peneiras;

- 4- Controlador *Fuzzy* de balanceamento de níveis de silos;
- 5- Controlador *Override* de nível baixo de silos dp o peneiramento;
- 6- Controlador *Override* de nível baixo de silos do britador;

Segue abaixo artigos publicados:

- 1- Controle *Override* de Corrente elétrica para aumento de eficiência do Peneiramento no Processo Mineral;
- 2- Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador *override*;

Os dois artigos gerados foram apresentados no XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI (2023), que ocorrerá entre os dias 15 e 19 de outubro de 2023, em Manaus/AM.

1.2. Perguntas chaves

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

- É possível caracterizar o minério que alimenta uma etapa de peneiramento por um método simples que possa melhorar o processo?
- É possível otimizar a taxa de alimentação de uma peneira para melhor aproveitar a capacidade nominal?
- É possível projetar um sistema de controle que aumente o desempenho de um circuito de britagem ao passo que otimiza a vida útil dos ativos?

2. Parte A-1: Controlador de Corrente em Peneiramento Primário Serra Sul

2.1. Introdução

De acordo com Luz e Lins (2018), o processo de tratamento de minério consiste no desenvolvimento de operações em bens minerais com o objetivo de modificar sua granulometria e a concentração das espécies minerais, porém, sem alterar sua identidade química ou física. De maneira geral, o tratamento é realizado por meio de operações unitárias, sendo as mais comuns: classificação, manuseio, cominuição e concentração. A indústria de minério de ferro processa o minério com partículas de diferentes tamanhos. Logo, a classificação por tamanho é uma etapa importante e necessária para o controle granulométrico das partículas na alimentação das operações unitárias, pois contribui para garantir maior eficiência nas etapas subsequentes do processo.

A definição de peneiramento pode ser encontrada em Chaves e Peres (2003) como sendo a operação de separação de uma população de partículas em duas frações diferentes, mediante sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. O termo eficiência de peneiramento é definido por Andery (1980) como a relação entre a quantidade de partículas mais finas que a abertura da tela de peneiramento e que passam por ela, e a quantidade delas presente na alimentação. Ainda de acordo com Chaves e Peres (2003), industrialmente, uma boa eficiência de peneiramento situa-se entre 80% e 90%.

As peneiras são equipamentos muito utilizados em circuitos de britagem, desempenhando um papel significativo na eficiência do processo através da boa separação de partículas, entregando para os britadores a fração do material que realmente precisa ser cominuída. Em outras variações do processo, atuam recirculando o material fora da especificação de tamanho (*oversize*), para ser britado e classificado novamente, formando um circuito fechado. O peneiramento é dito a seco quando é feito com o material em sua umidade natural, devido a essa conotação é conhecido como peneiramento a umidade natural, e dito a úmido ou via úmida, quando o material é alimentado na forma de uma polpa ou recebe água adicional através de *sprays* convenientemente dispostos sobre os *decks* do peneiramento (CHAVES e PERES, 2003). Delfim (2015) aponta que nos últimos anos, a mineração vem adotando a classificação com umidade natural em substituição à classificação a úmido para o processamento de minério de ferro de alto teor, com o objetivo de redução de custos e impactos ambientais.

Em um estudo para melhoria de eficiência de peneiramento a umidade natural, Fonseca (2022) descreve que durante o processo de peneiramento, alguns parâmetros operacionais podem afetar seu desempenho, podendo ser divididos em parâmetros de máquina, relacionadas ao equipamento; e em características de fluxo, relacionadas ao minério alimentado. Parâmetros de máquina podem ser exemplificados como dimensões de tela, material do *deck*, frequência de vibração, amplitude, aceleração e dependem da unidade instalada e da estratégia operacional

selecionada. As características do fluxo incluem propriedades do material, como distribuição do tamanho e forma das partículas, densidade e taxa de fluxo de material, conforme citado por Asbjörnsson *et al.* (2016). Outro aspecto importante ligado ao fluxo do material e que interfere no desempenho e capacidade de peneiramento é a umidade, ou seja, a porcentagem de água presente na amostra, pois a água livre da superfície tende a fazer com que as partículas se agreguem, reduzindo a eficiência de peneiramento, impactando diretamente na capacidade de peneiramento (KING, 2001). Outro efeito que pode acontecer com aumento da umidade é o cegamento das telas de peneiramento, impedindo a passagem do minério. Nestes cenários, deve-se reduzir a taxa de alimentação da peneira, o que resulta em uma redução da altura do leito de material, para ajustar o processo à sua capacidade real do momento.

Conforme comentado por De São José *et al.* (2017), existe a necessidade de adaptação nos circuitos de peneiramento para atender às constantes variações mineralógicas e de qualidade, que afetam diretamente a eficiência dos processos. No entanto, nas rotinas operacionais das plantas, a eficiência de peneiramento ainda é realizada de forma visual, ou seja, um processo sensível a depender do conhecimento do técnico de área, ou através de amostragens e análises de laboratório, sendo realizadas de maneira pontual e sem capacidade de resposta em tempo real. Zhang *et al.* (2020) mencionam que industrialmente existem muitos cenários operacionais que não são gerenciados por lógicas de controle e que podem levar a eventos indesejados, causando paradas operacionais. A grande dificuldade é como identificar alterações nas variáveis de processo para gerenciar automaticamente. Buscando uma adaptação dinâmica às variações do processo, Matos *et al.* (2021) propõem um método para avaliar o grau de fragmentação do minério na correia transportadora proveniente do *oversize* do peneiramento com o uso de um laser *scanner* bidimensional. Dessa forma, estimando a eficiência desta etapa do processo, porém, sendo necessária aquisição e manutenção do instrumento.

O estudo realizado por Gonçalves (2021) utiliza a corrente elétrica do motor de acionamento de um transportador de correia para correlacionar a umidade do minério com eventos indesejados de acúmulo e desprendimento de material em chutes, sendo este um bom exemplo de correlação entre a corrente elétrica de motores e as características do fluxo de material. Medição de corrente dos motores de acionamento de peneiras são comumente disponíveis em aplicações industriais. No entanto, quando utilizadas, em geral, são apenas para lógicas de intertravamento a fim de evitar danos ao equipamento que possam causar paradas de produção mais longas.

Neste trabalho, um controlador *override* foi projetado para aprimorar a eficiência de peneiramento primário da usina de beneficiamento de minério de ferro S11D. A solução atua variando a velocidade dos alimentadores, regulando o fluxo de alimentação para que um determinado limite de corrente da peneira não seja violado. Assim, reduz-se as paradas por corrente alta nas peneiras, aumentando o grau de proteção do equipamento e reduzindo quebras prematuras por alta corrente, propiciando um processo com maior área de peneiramento. Outro ganho é a capacidade de otimizar a taxa em cenários de dificuldade de peneiramento, trazendo ganhos

de produtividade e redução de paradas operacionais. Por consequência, obtém-se um processo de peneiramento mais eficiente e estável.

2.1.1. Motivação

Industrialmente, não é comum o uso de instrumentos capazes de avaliar a performance das peneiras de usinas de tratamento de minério. O mais utilizado é a inspeção visual das peneiras e, por meio do conhecimento tácito, a avaliação da eficiência do peneiramento. No entanto, essa avaliação depende do conhecimento do inspetor e do momento em que ele está avaliando o processo, atrelada à disponibilidade da equipe. Sendo assim, o grande desafio para a otimização da eficiência de peneiramento é encontrar formas de substituir técnicas sensíveis por estratégias de controles automáticas que se adaptem às mudanças do processo dinamicamente, gerando estabilidade e maximizando a produção sem ultrapassar os limites de proteção dos equipamentos.

Serra Sul é uma usina de beneficiamento de minério de ferro da Vale localizada na cidade de Canaã dos Carajás, PA, conhecida como Projeto S11D, e é o objeto de estudo desse trabalho. Analisando o comportamento da corrente elétrica do motor de acionamento de uma peneira da etapa de peneiramento primário dessa usina, conforme a carta de controle da Figura 2.1, observam-se variações no comportamento da corrente elétrica da peneira, tendo momentos de médias elevadas, como no início de janeiro/22, e momentos com picos de alta corrente, com valores acima do LSC. Associações foram realizadas através de relatos das equipes operacionais para inferir que o comportamento da corrente é influenciado pelas características do material processado, como litologia e umidade, o que causa redução na eficiência do peneiramento. Porém essa associação relatada era baseada apenas no sentimento das equipes operacionais, sem fundamentos técnicos. Desta forma, a motivação do estudo é comprovar se existia de fato uma correlação entre a corrente das peneiras com características do minério, através de métodos estatísticos, e a depender dos resultados obtidos, propor novos controles automáticos para o circuito.

2.1.2. Hipótese

Para o desenvolvimento deste projeto foram, três hipóteses foram formuladas:

- Existe relação entre a corrente do acionamento da peneira com características físicas e litológicas do minério de alimentação das peneiras;
- Variações das características do minério podem provocar instabilidades no processo de peneiramento;
- É possível controlar a corrente de acionamento da peneira através da taxa alimentada na peneira;

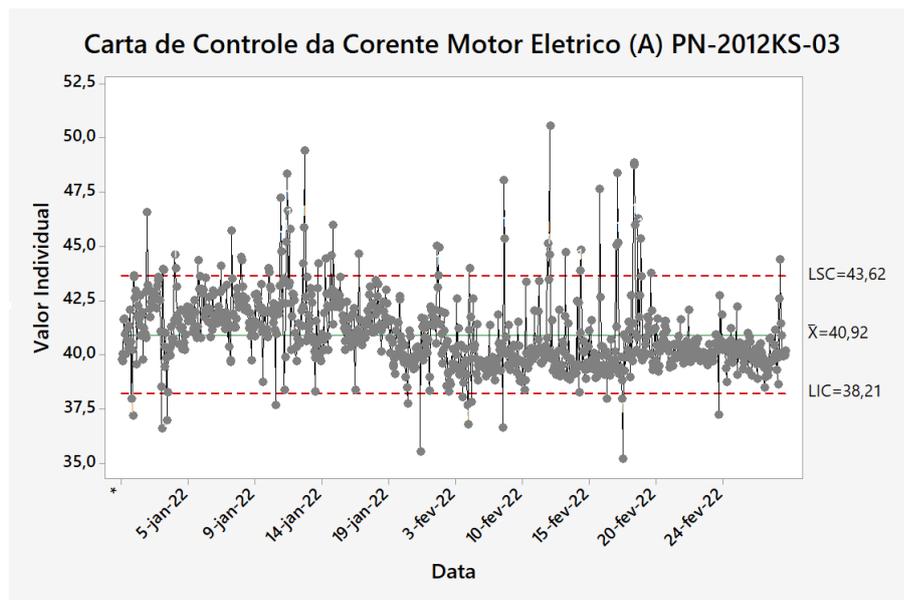


Figura 2.1: Carta de Controle da corrente elétrica do Motor da Peneira
Fonte: O autor.

2.1.3. Objetivos

Para o desenvolvimento deste projeto foram, foram definidos três principais objetivos para etapa de peneiramento primário de Serra Sul:

- Reduzir instabilidade no processo que resultam em paradas operacionais e expõe equipamentos a sobrecargas;
- Desenvolver modelo, que correlacione variáveis do processo de peneiramento com corrente de acionamento das peneiras.
- Melhorar eficiência da etapa de peneiramento primário através da implementação de novos controladores que sejam capaz de identificar perturbações no processo e atuar de forma otimizada e automatizada;

2.1.4. Delimitação do tema

O projeto é baseada em equipamentos do complexo minerário S11D, e as análises são restritas unicamente ao circuito de peneiramento primário, ou seja, os demais equipamentos da planta de processamento mineral serão desprezados. Para a etapa de peneiramento primário, é definido que se busca o aumento da eficiência desses equipamentos especificamente por meio da variação da velocidade dos alimentadores que interfere diretamente na produtividade do circuito.

2.2. Equipamentos e Fluxograma

O fluxograma de beneficiamento do *sinter feed* em Serra Sul é simplificado devido ao alto teor de ferro da jazida, cerca de 66%. O tratamento do minério envolve etapas de cominuição (redução das partículas) e classificação (separação por tamanho) por peneiramento em circuitos abertos e fechados. Essa rota inclui armazenamentos intermediários e pilhas de produto final conectadas por correias transportadoras.

O processo tem início nas pilhas pulmões 01 e 02, que marcam a transição entre a mina e a usina. O minério é alimentado a partir das pilhas para o TCLD, que o dispõe o material até a etapa de peneiramento primário e britagem secundária (Figura 2.2). Nessa etapa, existem seis linhas paralelas, cada uma com um silo, um alimentador, uma peneira e um britador, que realizam o processamento da seguinte forma: o minério do silo é alimentado à peneira, com o material mais grosso retido da peneira, sendo direcionado para britador que posteriormente se junta com material fino, passante da peneira, seguindo para etapas posteriores. Em seguida, o minério processado é direcionado ao pátio de regularização ou para o peneiramento secundário e britagem terciária, de acordo com a estratégia operacional adotada.

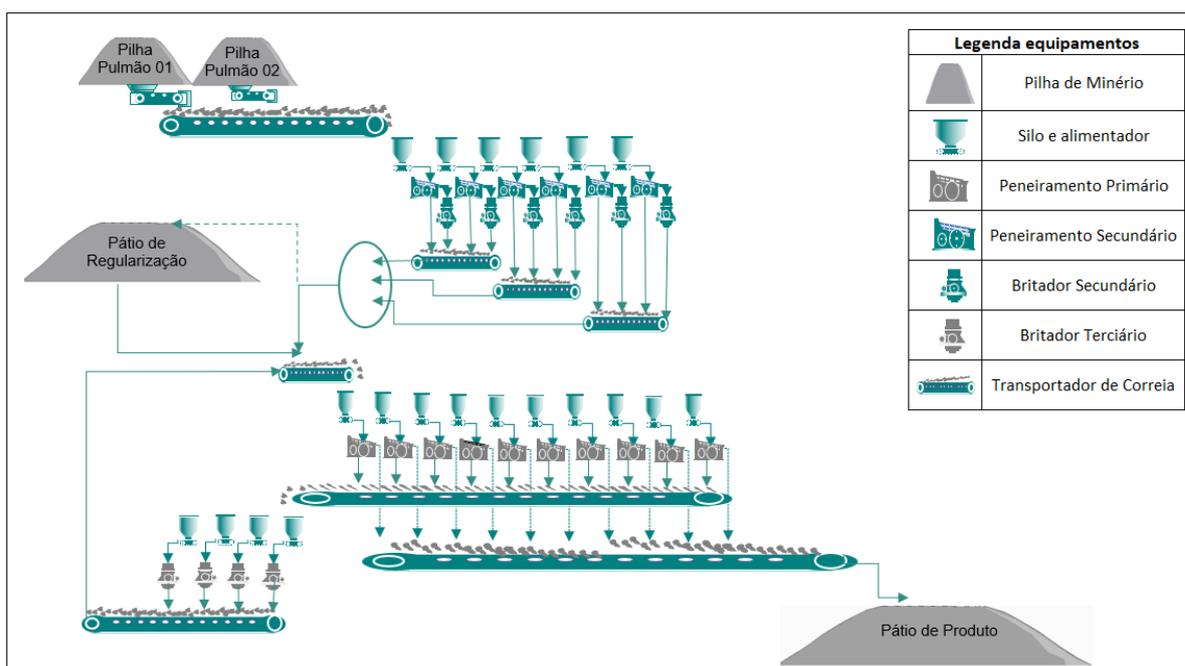


Figura 2.2: Fluxograma Usina Beneficiamento S11D

Fonte: O autor.

2.3. Circuito de Peneiramento Primário de Serra Sul

O peneiramento primário é realizado por peneiras vibratórias do tipo banana com movimentos lineares, fornecidas pelo fornecedor Haver, conforme ilustrado na Figura 2.3. O modelo

utilizado é o RB-ME, com dimensões de 3.660 x 8.540 mm (12' x 28'), apresentando área de peneiramento total de 31,25 m² em um único *deck*, com telas de 90 x 90 mm e uma taxa de peneiramento de aproximadamente 116,5 t/h/m², resultando em uma taxa nominal da peneira de 3.640 t/h. Cada peneira é acionada por um motor de 45 kW, operando através de um inversor de frequência, com rotação nominal de 795 RPM e aceleração próxima a 4,5 G, e utiliza um sistema de amortecimento por molas. A Figura 2.3 apresenta os principais componentes da peneira estudada.

Peneiras do tipo banana possuem uma certa curvatura e inclinação, resultando em alta velocidade de arraste e objetivando atingir altas taxas de processamento de minério, mesmo com uma grande concentração de finos, sem perder a eficiência de peneiramento. As peneiras em questão possuem três seções com diferentes ângulos de inclinação, sendo que a diferença entre as seções é de 5°. O ângulo inicial elevado impõe alta velocidade ao minério, diminuindo a espessura da camada de minério e reduzindo, assim, a quantidade de finos. Nas seções seguintes, a velocidade do minério diminui e o tempo de residência aumenta, resultando na remoção do restante dos finos. Uma baixa eficiência de peneiramento tende a reter muito minério na última parte da peneira, onde a velocidade de arraste é menor, o que pode gerar sobrecarga sobre o equipamento e aumento do esforço para o motor de acionamento, sendo essa a associação encontrada para corrente da peneira. Um técnico experiente consegue identificar esse problema e ajustar a taxa de alimentação da peneira, minimizando, assim, esse efeito negativo no processo.

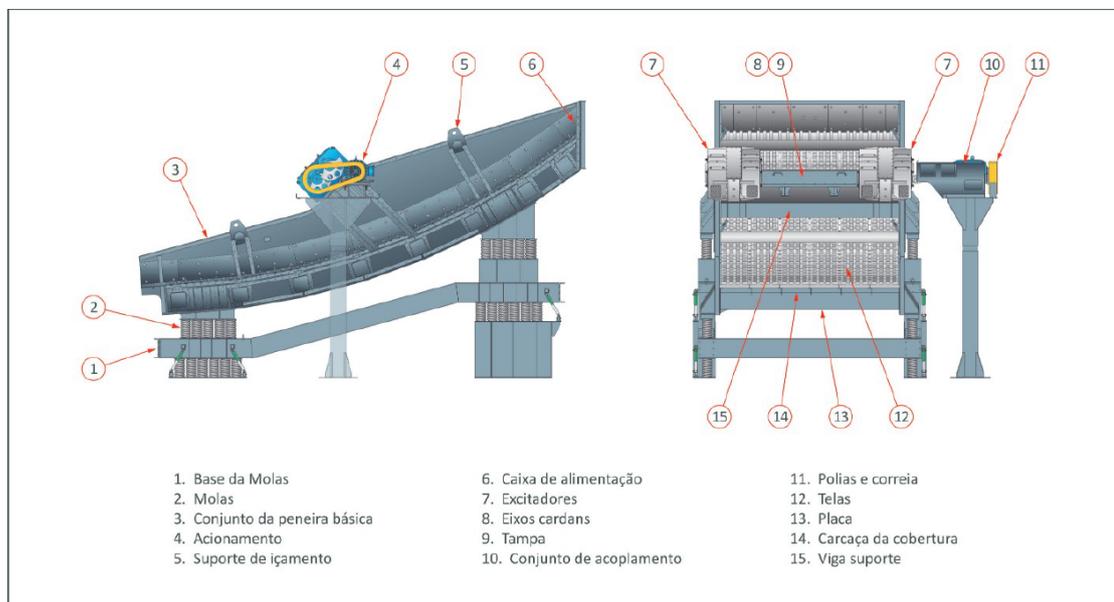


Figura 2.3: Peneira Vibratória - Modelo Peneiramento Primário de S11D
Fonte: Manual Processo S11D.

2.4. Litologia do minério

O conceito de litologia no contexto do minério de ferro refere-se à caracterização das rochas e dos minerais presentes em depósitos de minério de ferro. Isso inclui a identificação e análise das diferentes camadas geológicas, bem como a composição mineralógica, textura, estrutura e granulometria das formações rochosas que abrigam o minério. A litologia é essencial para compreender a origem e a evolução dos depósitos de minério de ferro, bem como para determinar as melhores práticas de mineração e processamento. Além disso, a litologia desempenha um papel crucial na estimativa de reservas minerais e na avaliação da qualidade do minério, influenciando diretamente as decisões operacionais e estratégicas na indústria de mineração de minério de ferro de acordo com Lu (2015).

Com o objetivo de fornecer conhecimento sobre este tópico, será apresentado um resumo das principais litologias encontradas no corpo ferrífero da região de lavra de Serra Sul, as quais estão divididas em: hematitas (friável, compacta, goethita e manganésifera), cangas (química e estrutural), jaspelitos (carbonático, silicoso e clorítico) e máficas (decomposta e sã). No cotidiano operacional, as equipes de planejamento de mina consideram como estéril todos os jaspelitos, máficas e cangas químicas. Os minérios de ROM destinados à alimentação das usinas consistem em todas as hematitas e cangas estruturais, dependendo das condições físicas do material, como a umidade. Também é necessário controlar os chamados minérios hidratados, compostos pelas cangas e hematita goethita, que apresentam dificuldades de manuseio devido à baixa escoabilidade do minério (alta abrasividade, alta coesividade e baixo ângulo de acomodação). Conforme ilustrado na Figura 2.4, há uma alta variabilidade no IMH (Índice de minério hidratado) de hora em hora, o que pode dificultar o controle do processo na usina de beneficiamento.

2.5. Metodologia

Com o objetivo de avaliar a correlação entre as variáveis relacionadas ao minério e a capacidade e eficiência de peneiramento, foram realizados testes em laboratório, seguidos de análises estatísticas com dados reais da planta, como serão apresentados nos tópicos a seguir.

2.5.1. Estudo de peneiramento em laboratório

Com o intuito de compreender os efeitos das litologias e da umidade, foram coletadas amostras de minério na alimentação da etapa de peneiramento na usina de beneficiamento do S11D e enviadas para o CPT, em Nova Lima/MG, para realização de testes de peneiramento em laboratório, utilizando as principais litologias do S11D: HF; HGO e CE;

Como primeiro passo, foram realizadas análises químicas das amostras com o objetivo de validar se as amostras coletadas continham características de cada litologia. A tabela 2.1

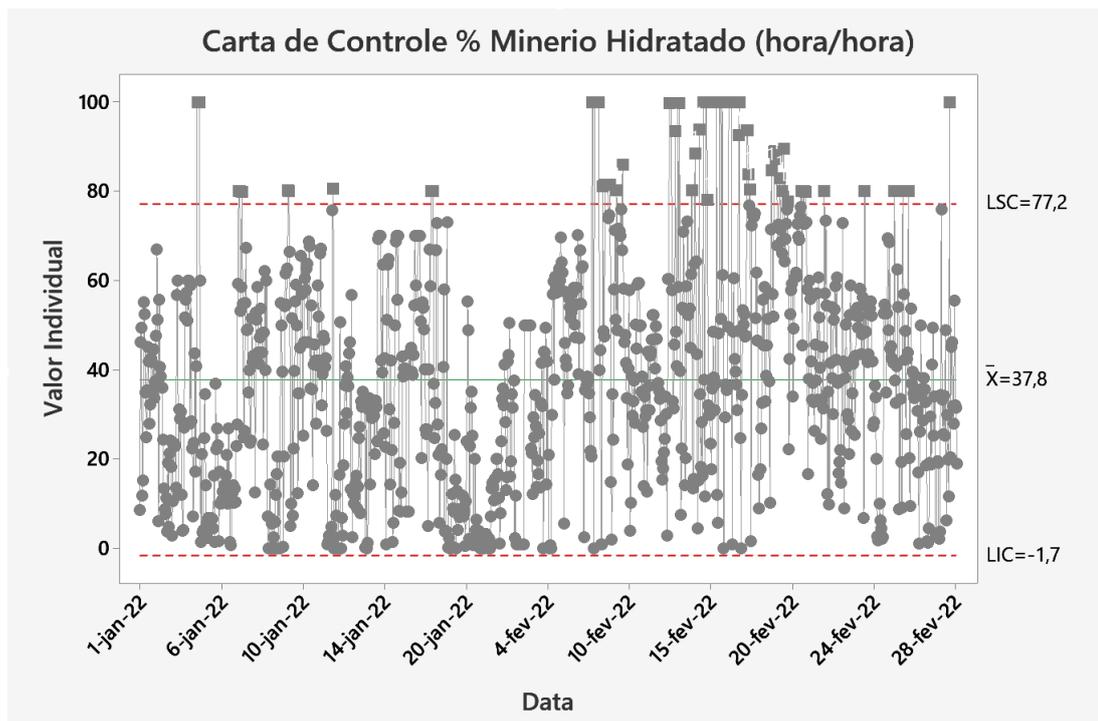


Figura 2.4: Carta Controle Índice de Minerio Hidratado

Fonte: O autor.

apresenta os resultados da análise química das amostras.

Amostra	Fe	SiO ₂	P	AL ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	PPC
HF	68,04	0,86	0,015	0,14	0,249	0,010	1,30
HGO	63,23	0,80	0,091	0,76	0,103	0,039	6,58
CE	60,22	0,39	0,582	2,39	0,016	0,495	8,51

Tabela 2.1: Análise química por litologia.

Fonte: O autor.

Pelos resultados das análises químicas da Tabela 2.1, é possível comparar as principais diferenças entre as litologias:

- Comparando *HF* x *HGO*, percebe-se que principais discrepâncias estão no teor de *Fe*, mais elevado no *HF*, e no PPC (perda por calcinação) mais elevado no *HGO*;
- Comparando *HF* x *CE*, percebe-se que principais discrepâncias estão no teor de *Fe*, mais elevado no *HF*, e no PPC e *Al₂O₃* mais elevado no *CE*;
- Comparando *HGO* x *CE* percebe-se que principais discrepâncias são o teor de *Fe*, mais elevado no *HGO*, e o *P* e *Al₂O₃* mais elevado no *CE*.

Observa-se na Tabela 2.2 a composição mineralógica das amostras, em que a amostra *HF* apresenta predominância de hematita em sua composição mineralógica, com menores proporções de goethita, magnetita, e minerais contaminantes como quartzo e óxidos de Mn.

Amostra	HF	HGO	CE
Hematita Sinuosa	63,98	4,28	14,91
Hematita Compacta	65,82	4,53	15,16
Hematita Martítica	20,48	24,26	2,30
Outras Hematitas	1,84	0,25	0,24
Magnétita	7,04	0,00	0,05
Ghoetita Maciça	0,00	3,12	0,00
Ghoetita Compacta	2,76	0,56	2,07
Outras Ghoetitas	5,55	71,81	82,24
Outros Minerais	1,11	1,59	7,22

Tabela 2.2: Composição mineralógica.

Fonte: O autor.

Já as amostras HGO e CE apresentam predominância de goethita, o que está coerente com os valores de PPC obtidos na análise química, devido à liberação de água presente na estrutura das partículas.

Considerando as principais características químicas e mineralógicas de cada litologia, foram conduzidos testes em uma peneira circular que permite simular um processo de peneiramento contínuo, obtido pela circulação constante do minério alimentado ao longo da peneira. Nesses testes, foram variadas as litologias (através de blends com as amostras geradas) e a umidade do material (via de adição de água nas amostras). A peneira de movimento linear sem fim foi utilizada com o propósito de calcular o fator de capacidade em t/h/m² para diversas aplicações, correspondendo à taxa unitária de peneiramento em escala industrial. Essa abordagem permite determinar a umidade crítica para o peneiramento e realizar simulações para avaliar a influência de fatores como aceleração, altura de camada, tipo de tela e barreiras durante o peneiramento com umidade natural. Para o teste foram criados diversos *blends* com as amostras de *HF*, *HGO* e *CE*, resultando então em 8 principais amostras, consideradas para os testes, conforme lista abaixo:

- Amostra 1: 100% *HF*;
- Amostra 2: 100% *HGO*;
- Amostra 3: 100% *CE*;
- Blend 2: 60% *HF*, 20% *HGO* e 20% *CE*;
- Blend 3: 60% *HF*, 10% *HGO* e 30% *CE*;
- Blend 4: 60% *HF*, 40% *HGO*;
- Blend 5: 60% *HF*, 40% *CE*;
- Blend 6: 30% *HF*, 20% *HGO* e 50% *CE*;

Os demais blends gerados não serão apresentados, devido inviabilidades nos testes gerados em laboratório;

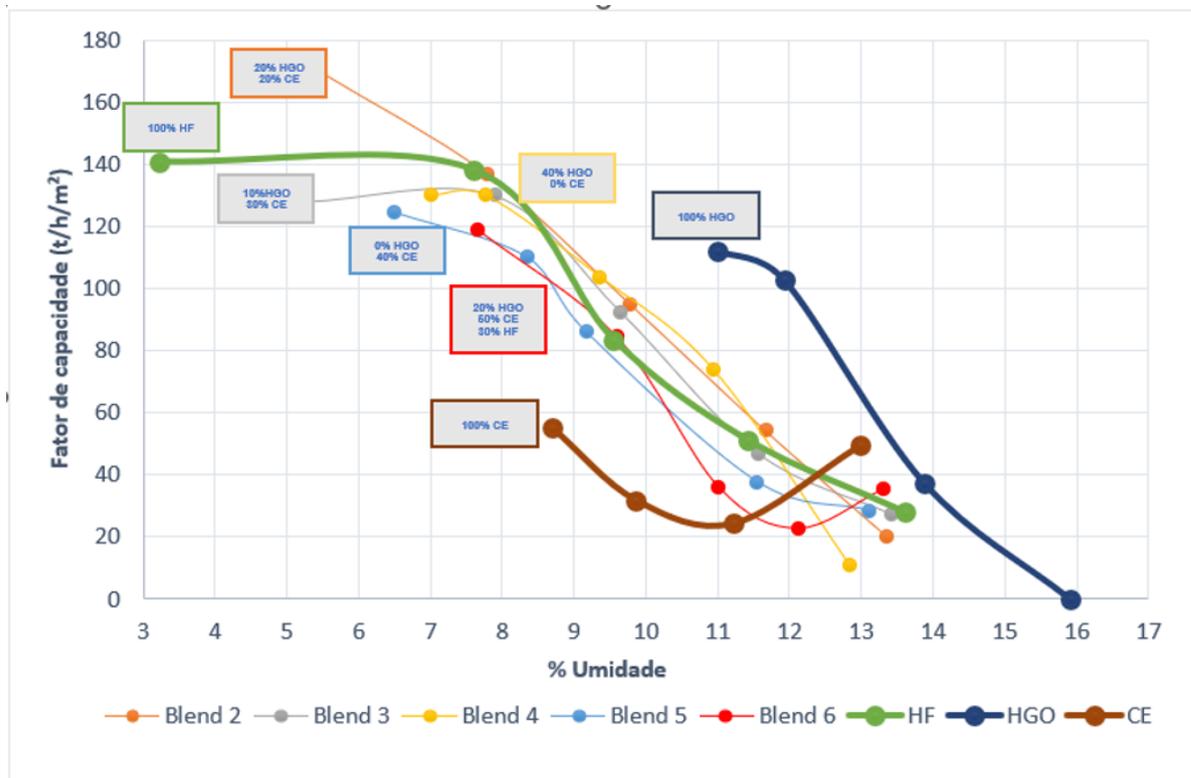


Figura 2.5: Teste Peneirabilidade

Fonte: O autor.

Os resultados do teste de peneiramento contínuo estão ilustrados na Figura 2.5, A figura apresenta a curva do fator de peneiramento (capacidade em t/h/m²) em relação à umidade. Esses resultados permitem chegar às seguintes conclusões:

- Umidade acima de 8% influencia negativamente a capacidade de peneiramento de todas as amostras, ou seja quanto maior a umidade menor a capacidade de peneiramento;
- Apenas a amostra de HGO conseguiu peneirar o material com umidade acima de 12%, demais amostras entraram em faixa de saturação das amostras o que inviabiliza peneiramento à umidade natural;
- Redução no %HF nos blends geraram uma redução na capacidade de peneiramento;
- Aumento de CE e HGO, associados a aumento de umidade, gera redução na capacidade;
- A amostra com 100% CE apresentou o pior comportamento no peneiramento, porém gerou um resultado inconsistente com essa amostra com umidade acima de 13% quando comparada com as demais amostras.

2.5.2. Análise de Correlação dos dados industriais

Para descrever a relação existente entre variáveis em um contexto de processos industriais, frequentemente se utiliza o termo: análise de correlação de processos. Isso se refere à identificação e compreensão das relações existentes entre as diferentes variáveis que afetam ou estão envolvidas em um determinado processo industrial. Essa análise é crucial para entender como as variáveis se influenciam mutuamente e como mudanças em uma variável podem afetar outras dentro do processo, o que é essencial para otimização, controle e melhoria contínua dos processos industriais. Para as análises, estão sendo considerados dados reais da usina de beneficiamento da Vale em Canaã dos Carajás, Serra Sul, referentes ao processamento de minério de ferro na etapa de peneiramento primário do circuito. Para este estudo, serão consideradas apenas as linhas centrais 3 e 4, que apresentam maior utilização em relação às linhas de extremidade, devido ao layout de processo favorável, tornando-as mais representativas para análises. Foram coletados dados de jan/22 até dez/22 minuto a minuto e compactados em médias diárias, dos momentos operando com carga, excluindo os dias com baixo rendimento operacional e baixa produção do circuito, considerados como dias atípicos de operação. Como resultado, dos 365 dias, restaram 200 dias após a exclusão de dados considerados *outliers*, totalizando 3.473 horas de operação com carga efetiva no circuito. As Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 representam o comportamento estatístico em histograma de algumas variáveis do processo nesse período avaliado.

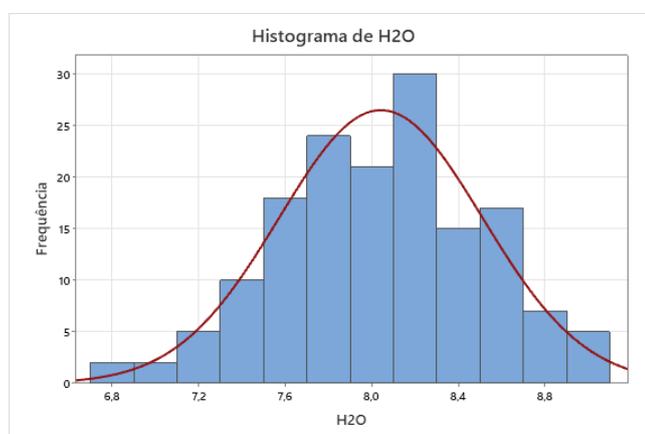


Figura 2.6: Histograma de H2O

Fonte: O autor.

Com os dados coletados e após a seleção adequada, foi utilizado o software *Minitab* versão 2018 para análises estatísticas. As Figuras 2.9 e 2.10 foram geradas através do assistente de análise de regressão múltipla do *Minitab*. Para os testes estatísticos, foi empregado um modelo de correlação múltipla com as seguintes variáveis: taxa de alimentação das peneiras, PPC (perda por calcinação), H2O (umidade do minério), IMH (índice de minério hidratado) e HGO. A variável resposta foi a corrente do motor de acionamento da peneira. Os resultados dos testes revelaram uma correlação com um coeficiente de determinação (R-quadrado) de 43,05%.

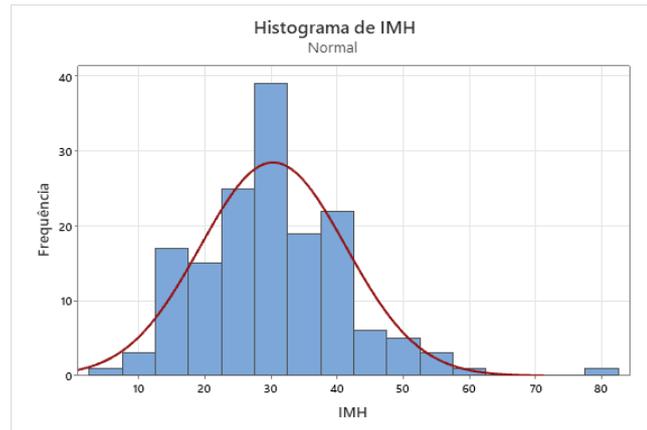


Figura 2.7: Histograma de IMH
Fonte: O autor.

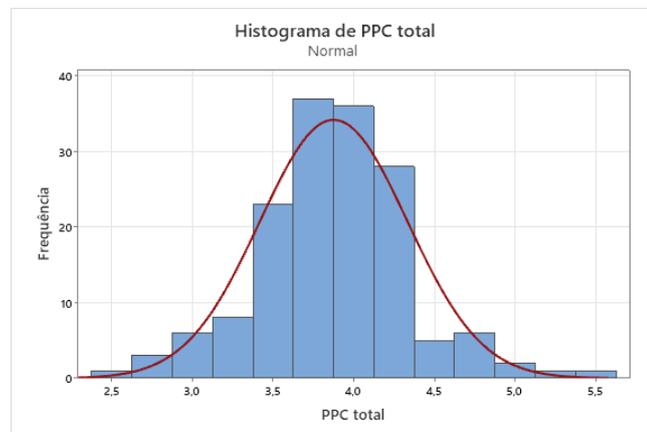


Figura 2.8: Histograma de PPC
Fonte: O autor.

Essa correlação é considerada significativa, especialmente considerando que os dados foram obtidos ao longo de um ano de operação industrial. Portanto, é válido afirmar que há um modelo que estabelece uma correlação entre a corrente do motor da peneira, para com as características do minério alimentado e a taxa de alimentação das peneiras.

Através da análise gerada na 2.10 podemos extrair O modelo da equação:

$$\text{Corrente PN's} = 23.10 + 0.00185X_1 - 1.014X_2 + 1.140X_3 + 0.0362X_4 - 0.0057X_5 + 0.001650X_3^3$$

Sendo:

- X1 a Taxa de alimentação das Peneiras;
- X2 o PPC;
- X3 o H2O;

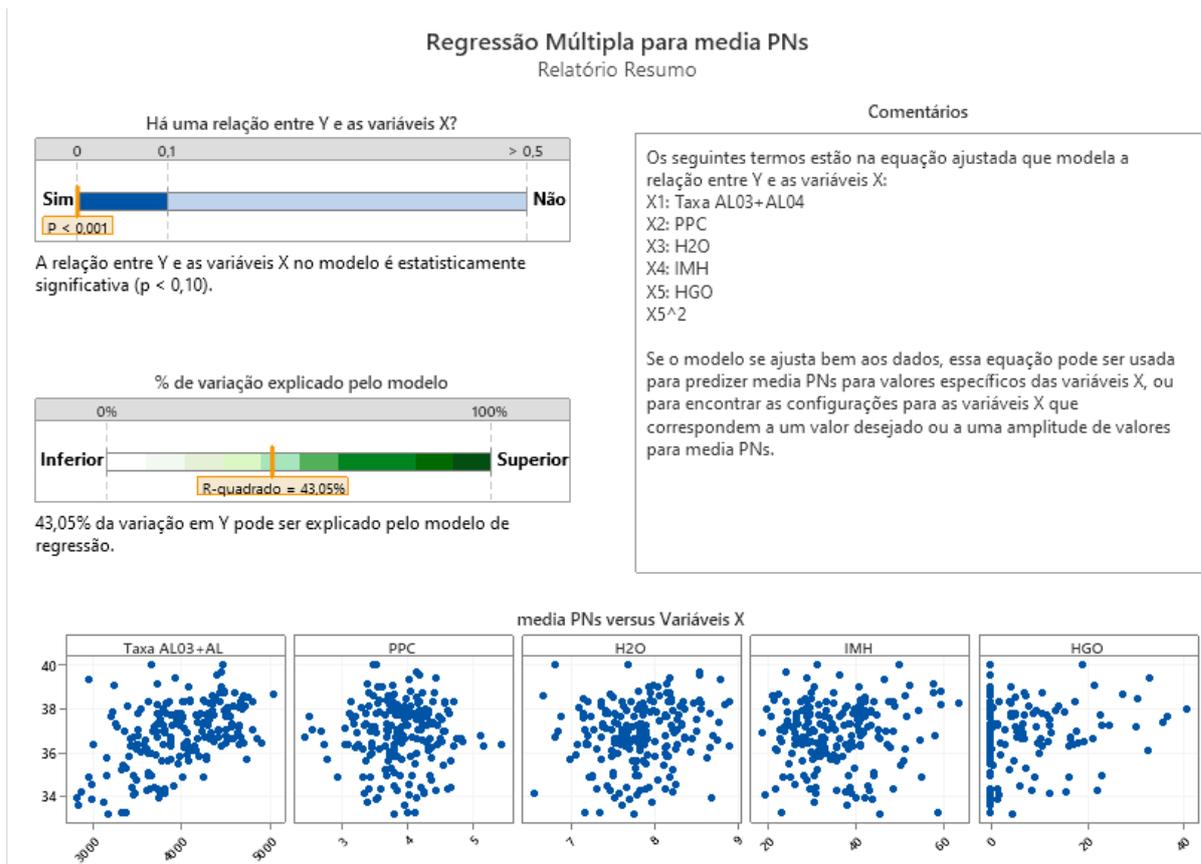


Figura 2.9: Análise de Regressão Múltipla 01 PN's
Fonte: O autor.

- X4 o IMH;
- X5 o HGO;

Com o modelo obtido, podemos concluir:

- X1, X3 e X4 apresentam uma correlação positiva, ou seja, um aumento nessas variáveis tende a elevar a corrente das peneiras;
- X2 apresentou uma correlação negativa, tendo a um aumento desta variável reduzir a corrente das peneiras.

2.6. Sistema de Controle original do Peneiramento Primário

O sistema de controle atual desta fase do processo é construído com base em uma estrutura de controle *override*, que é capaz de identificar automaticamente as principais restrições do processo e ajustar dinamicamente o *setpoint* de produto ou intervir diretamente na velocidade

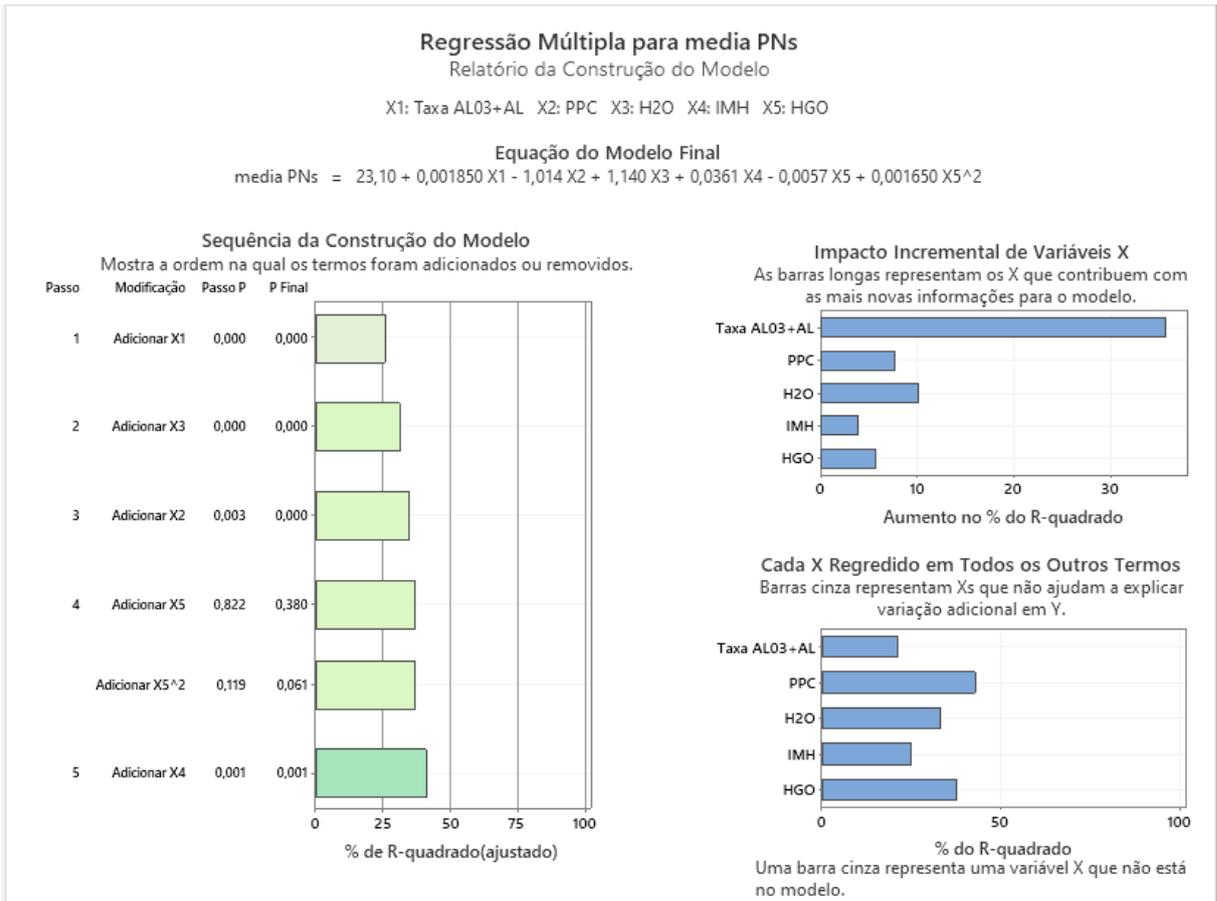


Figura 2.10: Análise de Regressão Múltipla 02 PN's

Fonte: O autor.

dos alimentadores. Além disso, permite intervenções manuais para limitar a velocidade dos alimentadores com base na avaliação das condições de peneiramento no campo pelos operadores. Os principais objetivos da estratégia de controle atual são:

- Oferecer condições seguras de operações, reduzindo o risco de sobrecarga nos equipamentos de transporte;
- Promover uma operação contínua e otimizada, sempre buscando a utilização da capacidade de processamento disponível, que varia de acordo com as condições de processo;
- Regular a taxa de produto na saída do Peneiramento Primário, sujeito à restrição por nível baixo nos silos do Peneiramento (restrição de processo) e pela capacidade nominal e de processo da etapa posterior (peneiramento secundário);

Com a estratégia de controle, conforme mostrado na Figura 2.11, na ausência de alguma restrição do processo, o valor do SP do Controlador de Taxa do Produto das peneiras assume o valor determinado pelo operador, que é estabelecido nessa arquitetura de controle como o

máximo SP admitido para o circuito. Em caso de ativação de alguma restrição, ou seja, se alguma variável do processo ultrapassar os limites estabelecidos, o controlador em questão ajustará o SP no esforço de regular o processo e permitir sua continuidade operacional na taxa de produção máxima possível, sem exceder os limites de segurança e intertravamento.

Esse chaveamento entre as seleções disponíveis ocorre dentro do conceito da estrutura *override* e cascata, em que o controlador selecionado é aquele que apresenta o menor valor na Saída do Controlador *CO*. Essa tarefa é executada por um bloco lógico do tipo seletor de mínimo, que tem como entradas a *OP* de cada controlador e o valor máximo definido pelo operador. Sua saída é simplesmente o menor valor entre as entradas. Os controladores usados neste arranjo são os conhecidos e amplamente empregados controladores PI (proporcional e integral).

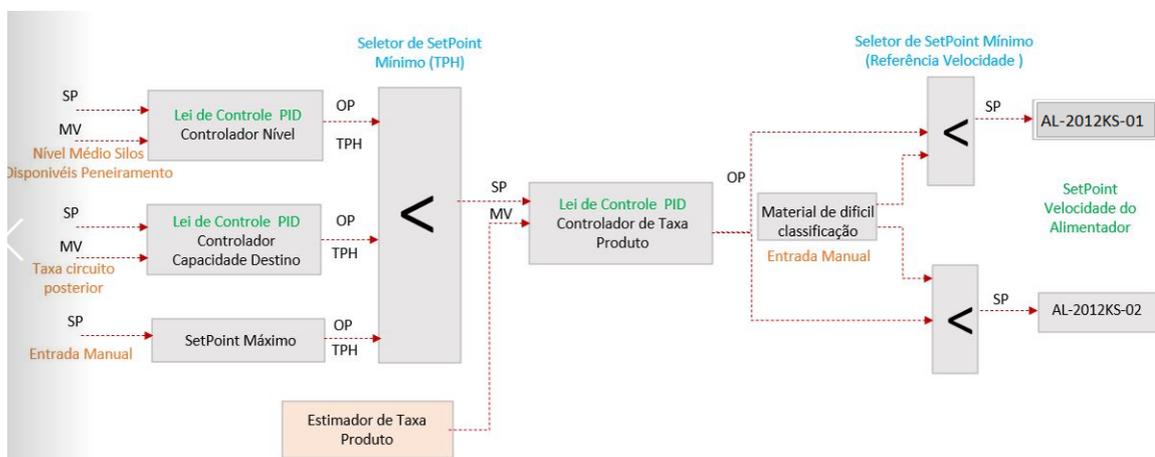


Figura 2.11: Sistema de Controle Peneiramento Primário

Fonte: O autor.

Em seguida, o controlador de taxa de produto do peneiramento, também um PI, é responsável pela camada regulatória, conforme SP definido pela estrutura *override*. Esse controlador tem como principal particularidade trabalhar com uma PV (Variável de Processo) estimada, em vez do valor propriamente lido do instrumento de medição de taxa. Esse estimador, identificado como *MV* na Figura 2.11, é alimentado por uma balança integradora posicionada a jusante no circuito. O estimador é utilizado com o objetivo de eliminar o tempo morto do processo, originado pela distância entre os alimentadores e a balança, permitindo uma resposta mais rápida a alterações no SP.

Prosseguindo na estratégia, a saída do controlador de taxa de produto é conectada a outro bloco seletor de mínimo, sendo responsável pela definição da velocidade dos alimentadores, formando assim outra estrutura *override*. Essa estrutura tem como entradas a *CO* do controlador mencionado e uma entrada manual utilizada para restringir a velocidade dos alimentadores quando é verificada no campo a presença de um material de difícil classificação.

Sob condições normais de operação, ou seja, sem ativar restrições, os alimentadores ope-

ram a uma velocidade determinada pela saída do controlador de taxa de produto. Em situações de necessidade, relacionadas à eficiência de peneiramento observada no campo, o operador pode estabelecer um limite para a velocidade do alimentador. Esse limite restringe a ação do controlador de taxa. Nesse modo de operação manual, a função de otimização da taxa do circuito é desativada. Se ocorrer uma mudança no tipo de minério alimentado na peneira que resulte em aumento na eficiência de peneiramento e o operador não identificar essa mudança e realizar um ajuste, o sistema ficará limitado, resultando em perdas no processo. Ou seja, neste modo de operação, o operador de campo precisa ser preciso ao limitar o sistema, caso contrário, pode ocorrer um intertravamento por corrente elevada. Além disso, deve ser preciso ao remover a restrição para evitar a limitação da produção.

2.7. Controle *Override* Proposto

2.7.1. Novo Controle do Peneiramento Primário

A nova estrutura de controle implementada inclui o bloco destacado em vermelho na Figura 2.12, que expande a estrutura *override* de definição da velocidade do alimentador. Essa estrutura, por sua vez, agora inclui também um controlador de corrente alta da peneira, que assumirá o controle da velocidade do alimentador caso o limite de corrente seja excedido. O objetivo é regular o processo, reduzindo e ajustando a taxa de alimentação da peneira para atender à capacidade ideal do momento. Com esse esquema de controle, é possível dinamicamente evitar operações com sobrecarga e baixa eficiência de peneiramento, ajustando a taxa máxima suportada para cada situação e respondendo em tempo real às variações na litologia do material. Para esse novo controlador de corrente, implementado como um controlador PI, os parâmetros foram definidos e ajustados por meio de testes industriais.

2.8. Resultados da Aplicação Prática em Serra Sul

Com o objetivo de apurar os resultados, foi realizado um teste industrial, no qual o controlador *override* proposto foi implementado na planta de beneficiamento de S11D, no peneiramento primário, e testado durante aproximadamente 12 meses. Para o desenvolvimento da solução, foi utilizado o sistema de automação 800xA[®], fornecido pela ABB, que já é amplamente utilizado no local. A solução proposta foi implementada em maio de 2022 e a análise foi concluída em abril de 2023. Para efeito de comparação entre antes e depois, os seguintes indicadores foram selecionados para acompanhamento:

- Porcentagem do tempo de operação em modo manual dos alimentadores - Representado pela Figura 2.13;

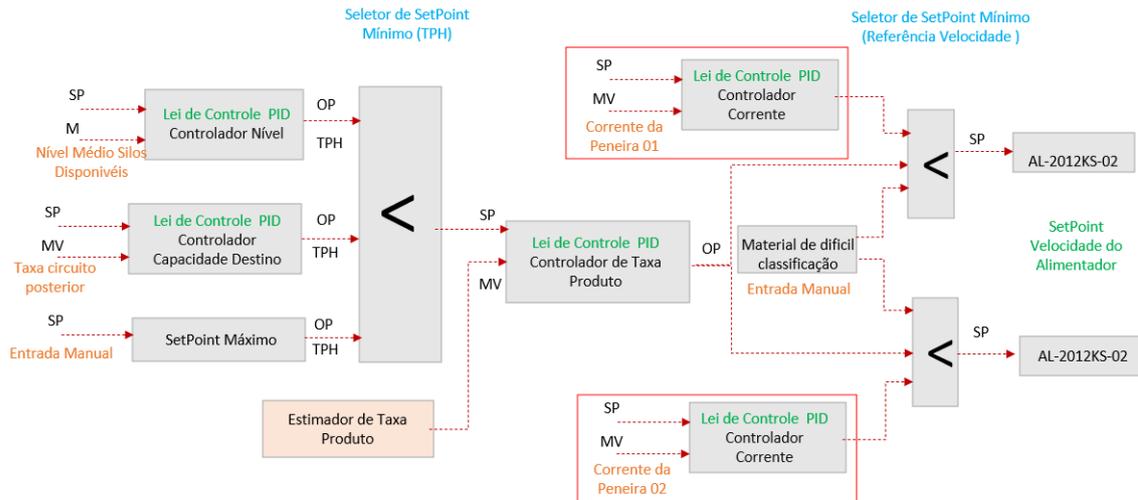


Figura 2.12: Novo Diagrama de Controle Peneiramento Primário
Fonte: O autor.

- Número de paradas mensal do circuito por intertravamentos por sobrecarga de corrente elétrica elevada das peneiras. Representado pela Figura 2.14.

O gráfico apresentado na Figura 2.13 mostra o tempo de operação em modo manual, representando a entrada manual da velocidade dos alimentadores. Antes da implementação do controlador, aproximadamente 6,6% do tempo de operação do circuito era operado manualmente. Após a melhoria, apenas 1,5% do tempo passou a ser operado manualmente, resultando em uma redução absoluta de 5,1% no tempo operado manualmente. Com isso, pode-se concluir que após a implementação da melhoria, 98,5% do tempo de operação do circuito é realizado de forma automática.

O gráfico da Figura 2.14 representa o acompanhamento do número de ocorrências de intertravamentos por sobrecargas. Antes da melhoria, havia uma média mensal de 11 eventos desse tipo. Após a implementação do controle *override*, esse número reduziu para 3,64 eventos por mês, representando uma diminuição de 67% das ocorrências de sobrecargas. Essa redução contribui para uma operação mais segura e estável do circuito, possibilitando a manutenção do circuito em modo automático. Importante ressaltar que cada parada operacional deste tipo demora em média 15 minutos para realizar partida do circuito, pois depende de uma verificação em campo das condições operacionais.

2.9. Conclusão

Neste capítulo, foi apresentada uma correlação encontrada entre a corrente do acionamento das peneiras e as características do minério. Além disso, foi proposta e desenvolvida uma nova lógica para a implementação de um controlador *override* na estratégia de controle do

Carta de Controle % Tempo de Operação em Manual

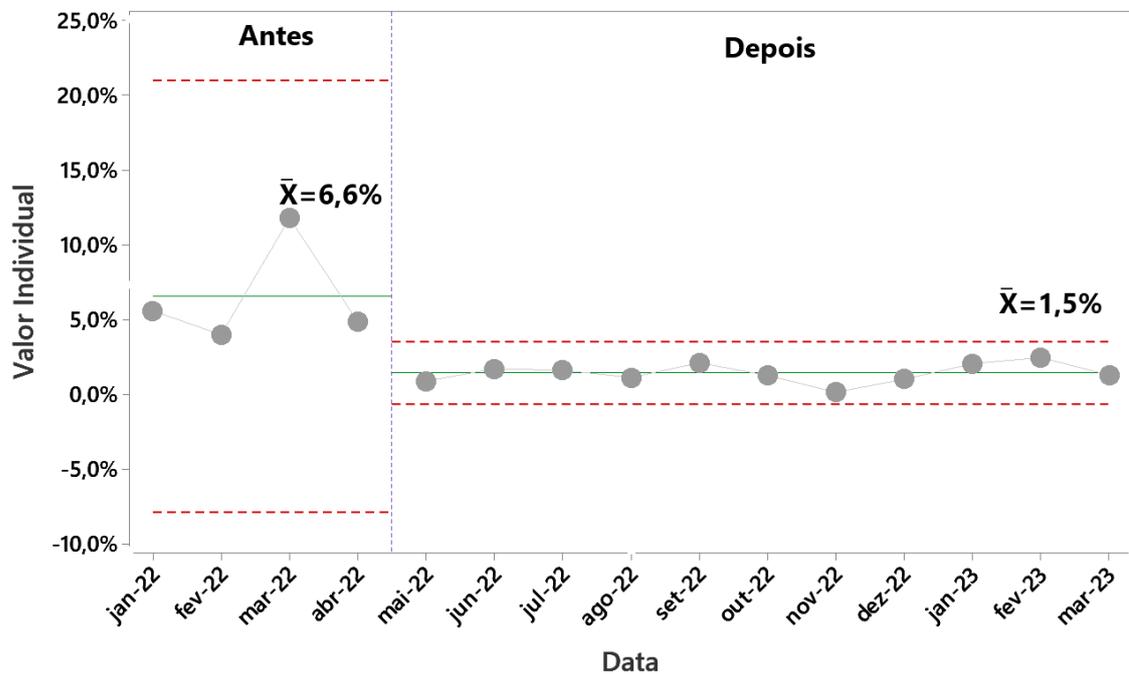


Figura 2.13: Tempo de Operação em modo Manual

Fonte: O autor.

peneiramento primário S11D. Esse controle tem o objetivo de definir dinamicamente a capacidade nominal de alimentação das peneiras em função das mudanças do minério alimentado, associadas à litologia e umidade. Isso é realizado por meio da manipulação da velocidade dos alimentadores, buscando melhorias no processo de peneiramento.

Essas melhorias foram comprovadas pela redução do tempo de operação em modo manual dos alimentadores em 5,1% e pela redução das paradas por sobrecargas devido à corrente elevada das peneiras em 67%. Dessa forma, há uma menor exposição do processo a situações de baixa eficiência de classificação causadas por sobrecapacidade real, resultando em maior estabilidade no processo.

Outro aspecto importante é a facilidade de replicação dessa melhoria de controle em circuitos de peneiramento. Nossa abordagem propõe a utilização apenas da corrente elétrica do motor de acionamento, uma variável bastante comum em processos industriais. Isso torna este trabalho inovador ao correlacionar essa variável com o comportamento do processo e eficaz na forma de controlar.

Carta de Controle Contagem Intertravamentos por Corrente Elevada

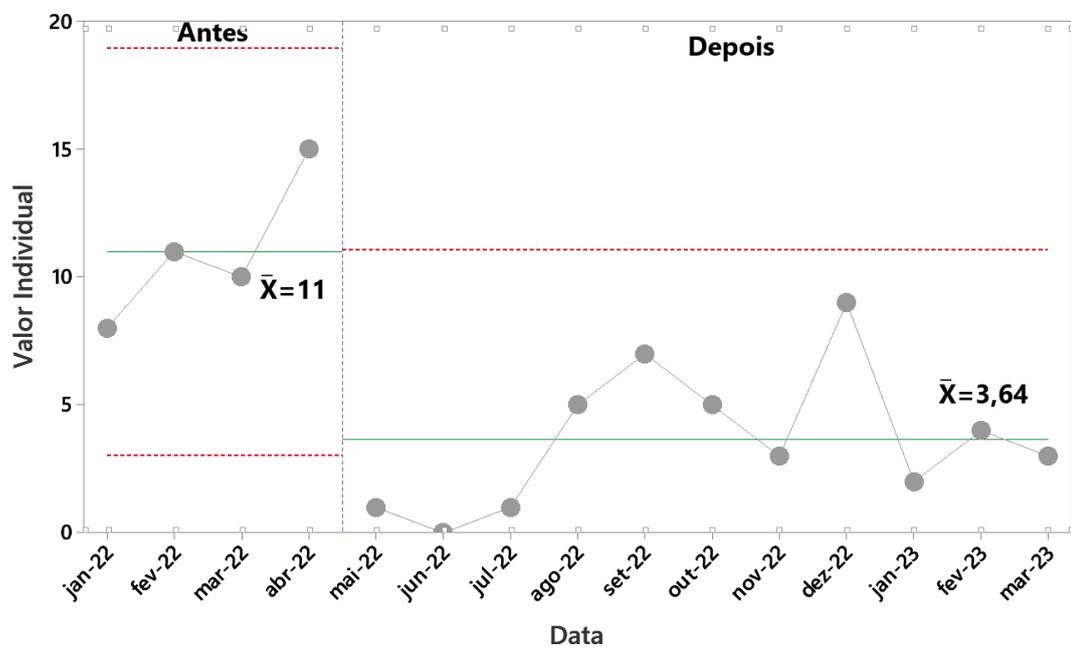


Figura 2.14: Contagem de Intertravamentos

Fonte: O autor.

3. Parte A-2: Controle de Rotação de peneira e Controle de nível de Silo

Partindo do conhecimento adquirido no capítulo 2 sobre o processo e a estratégia de controle do peneiramento primário de S11D, neste capítulo serão apresentados 2 projetos de melhorias realizados também na etapa de peneiramento primário de Serra Sul.

3.1. Projeto para controle de Rotação Peneiras

O projeto de controle de rotação das peneiras tomou como base a correlação encontrada entre a corrente de acionamento das peneiras com as variáveis de processo que interferem diretamente a eficiência do peneiramento.

3.1.1. Introdução

De acordo com estudos conduzidos por King (2001), a velocidade de rotação afeta diretamente a trajetória das partículas durante o processo de peneiramento. Uma rotação adequada é essencial para garantir que as partículas sejam transportadas de maneira eficiente pela superfície da tela, permitindo que as partículas mais finas passem pelas aberturas, enquanto as maiores são retidas. No entanto, uma rotação excessivamente alta pode resultar em agitação excessiva do material e desgaste prematuro das telas da peneira, e redução da vida útil de componentes mecânicos da peneira.

Da mesma forma, a aceleração aplicada às peneiras também é um fator crítico. Conforme discutido por Chaves e Peres (2003), a aceleração influencia o movimento das partículas na superfície da tela. Uma aceleração apropriada é fundamental para prevenir o obstruções da tela e manter o fluxo contínuo de partículas, melhorando, assim, a capacidade de processamento da peneira. Entretanto, um nível excessivo de aceleração pode causar tensões mecânicas nas telas e na estrutura da peneira, acelerando seu desgaste e reduzindo sua vida útil.

Delfim (2015) destaca o potencial da peneira excêntrica circular como uma ferramenta eficaz na classificação de minério de ferro com umidade natural, enfatizando a relevância do fator de peneiramento como um indicador-chave para avaliar seu desempenho e eficiência. Na Figura 3.1, Delfim (2015) apresenta um modelo que correlaciona o fator de peneiramento, denominado como aceleração da peneira, com a rotação da peneira. Portanto, qualquer alteração feita na rotação da peneira afeta diretamente a aceleração da peneira e, conseqüentemente, a eficiência de peneiramento.

A vida útil dos rolamentos, de acordo com a norma iso (2007), é um conceito fundamental na indústria de manufatura e engenharia mecânica. Essa norma estabelece critérios e

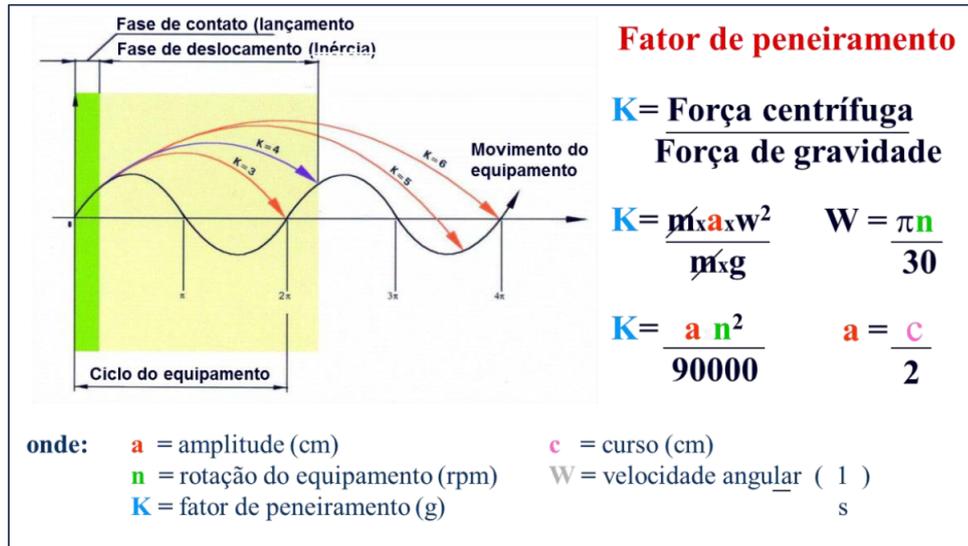


Figura 3.1: Princípio Fator de Peneiramento = K - Teoria Básica.
Fonte: (?)

métodos de cálculo para estimar a vida útil dos rolamentos, levando em consideração fatores como carga, velocidade de rotação, lubrificação e qualidade do material. A norma iso (2007) define a vida útil nominal dos rolamentos como o número de rotações ou horas de operação que um grupo de rolamentos pode ser esperado para atingir antes que 90% deles apresentem sinais de fadiga superficial.

A redução da vida útil das peneiras devido ao aumento da rotação ou aceleração é uma questão crítica, especialmente na indústria de processamento mineral. Essa prática, embora possa melhorar a eficiência do peneiramento, também pode acelerar o desgaste e a degradação das peneiras. Para mitigar esses efeitos negativos, estratégias como monitoramento da condição, seleção adequada de velocidade, uso de telas resistentes ao desgaste e projetos estruturais robustos são fundamentais. É importante equilibrar os benefícios da otimização com a necessidade de manter a integridade das peneiras ao implementar essas práticas operacionais. Encontrar uma forma de otimizar da rotação e aceleração das peneiras é essencial para garantir a eficiência do peneiramento a umidade natural e prolongar a vida útil da peneira.

Podemos concluir, então, que para melhorar a eficiência de peneiramento, há a possibilidade de aumentar a aceleração por meio da rotação das peneiras. No entanto, é importante observar que isso pode resultar na redução da vida útil dos rolamentos. Utilizando a correlação encontrada no capítulo 2, na qual o aumento da corrente indica uma redução na eficiência, neste projeto será proposta uma forma automática de otimizar a rotação das peneiras de acordo com as condições de processo. Um fluxograma de tomada de decisão para a etapa de peneiramento, partindo da variável de processo, que é a corrente de acionamento das PN's, até a ação de controle, está apresentado na Figura 3.2.

Desta forma, no capítulo 2 foi proposta realizar um ajuste dinâmico na taxa de alimentação

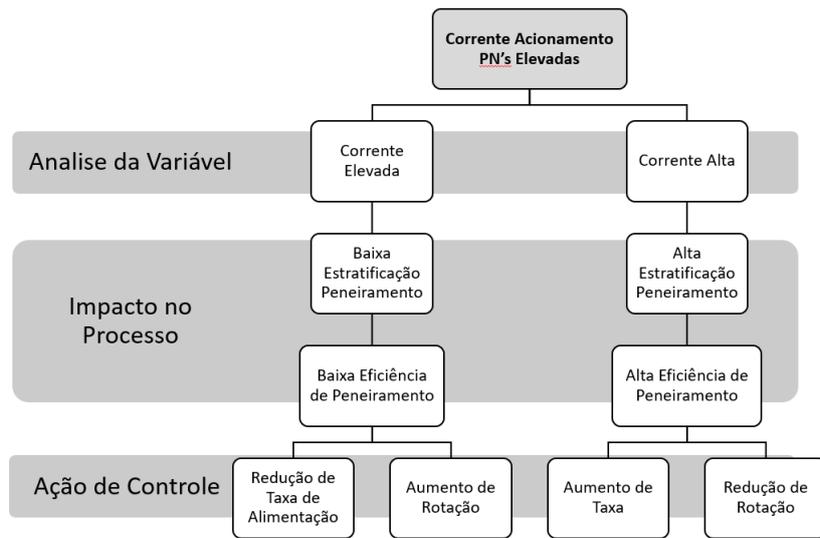


Figura 3.2: Fluxograma Analises Condições Peneiramento

Fonte: O autor.

das peneiras para controle da corrente das PN's, e neste projeto será proposto um novo controle na rotação das peneiras, de forma antecipatória a redução de taxa, evitando assim limitar capacidade de processamento do circuito. A figura 3.3 ilustra dois momentos reais da operação de uma linha de peneiramento primário de S11D comparando uma imagem do ultimo trecho da peneira com alta eficiência de peneiramento ,apenas material grosso *undersize*, e outra com baixa eficiência araste de material fino no *undersize*.



Figura 3.3: Eficiência de Peneiramento Primário S11D

Fonte: O autor.

3.1.2. Objetivo

O objetivo geral deste projeto é propor uma forma de equilibrar a eficiência de peneiramento e vida útil dos equipamentos, com o intuito de tornar as operações de processamento mineral mais eficientes e sustentáveis. Para alcançar esse objetivo, propomos a implementação de uma nova estratégia de controle automático na área do Peneiramento Primário. Essa estratégia automatizada será capaz de identificar, por meio da corrente da peneira, situações de dificuldade de peneiramento, que estão associadas à litologia e à umidade do material. Em resposta a essas condições, a estratégia fará ajustes automáticos nas rotações das peneiras, otimizando a eficiência de peneiramento de maneira automática e, ao mesmo tempo, prolongando a vida útil dos equipamentos.

3.1.3. Metodologia

De forma simplificada, para realização deste projeto foram definidas ações de curto e médio prazo, com equipes multidisciplinares de S11D, onde as principais ações estão listadas abaixo de forma cronológica.

- Realização de Gestão de Mudança: De acordo com procedimentos internos da Vale, toda alteração no processo, seja definitiva ou para teste, deve ser avaliada os impactos positivos e negativos antes da realização com time multidisciplinares, e se todos estiverem de acordo que a proposta de melhoria não gera impactos negativos para o processo, defini-se então todas ações de controle.
- Definição de lógica de controles/parâmetros: Esta ação parte do time de processo com o entendimento da disciplina de tratamento de minério, onde gera-se uma proposta de melhoria que atenda as condições ideais para otimizar o equipamento. Segue na 3.4 detalhes sobre o novo controlador.

Na Figura 3.4, é possível observar que foram definidas apenas duas configurações de rotação: alta e baixa. Quando a corrente da peneira estiver dentro do valor considerado normal pela equipe de processamento, a peneira funcionará em uma rotação baixa, contribuindo para uma vida útil prolongada do equipamento. Por outro lado, quando a corrente estiver elevada, a rotação da peneira será aumentada com o objetivo de melhorar a eficiência de peneiramento. É importante ressaltar que, antes da implementação dessa melhoria, a peneira operava continuamente em alta rotação.

- Desenvolvimento da lógica: Esta ação é realizada pelo time de automação e controle e tem a função de definir a modelam e estratégia de controle que será aplicada para atender a demanda do time de processo e operação, que não gera conflito com demais estratégias de controle da planta. A nova lógica foi implementada conforme Figura 3.4.

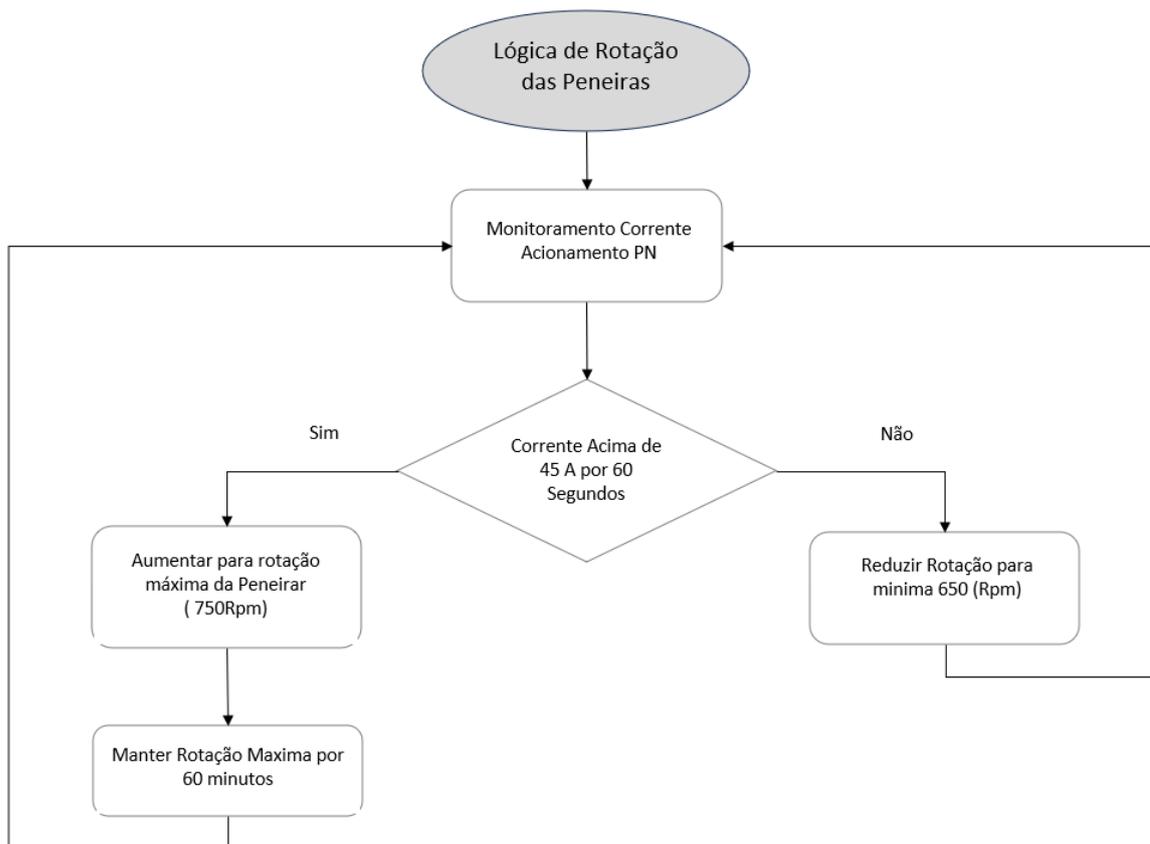


Figura 3.4: Algoritmo Controle de Rotação
 Fonte: O autor.

- Teste de comissionamento e validação da lógica: Nesta fase, inicia-se o teste industrial para validar a eficiência da melhoria proposta e, se necessário, realizar correções e implementar novas estratégias. Na Figura 3.5, podemos acompanhar um período de teste. A linha amarela representa a corrente instantânea do acionamento da peneira, em vermelho está o limite de corrente estabelecido em 45 amperes, e em verde, a rotação da peneira, exibida em porcentagem, variando de 0 a 100. É perceptível que sempre que há um aumento na corrente, ocorre também um aumento na rotação da peneira, e quando houve uma redução da corrente ocorre também a redução da rotação, o que comprova que a melhoria atendeu às expectativas.

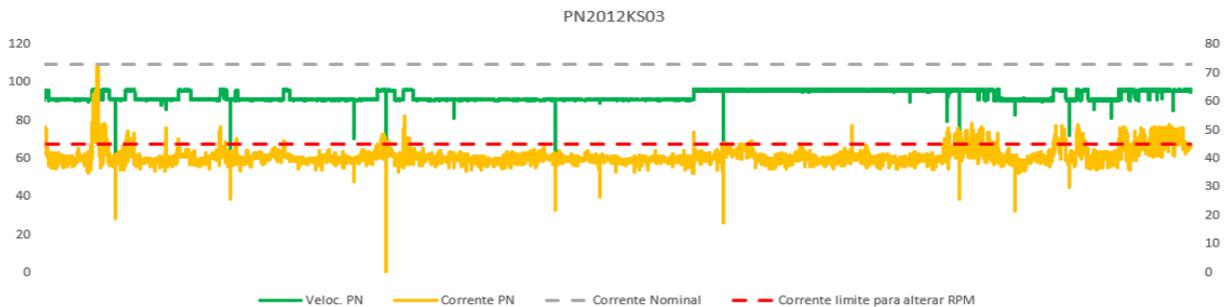


Figura 3.5: Teste Comissionamento Projeto Controlador de Rotação
Fonte: O autor.

- Definição de rotação mínima e máxima por peneira: Após testes e validações, foi necessário determinar, em colaboração com o fornecedor, as melhores velocidades de rotações para o equipamento. Isso visava garantir um desempenho máximo durante os momentos em que é necessário aumentar a eficiência de peneiramento, utilizando rotações mais altas, e uma velocidade de rotação mais baixa durante os momentos em que as características do minério já proporcionam uma alta eficiência.
- Replicação para todas as linhas de peneiramento: como última ação, após a comprovação dos ganhos, a melhoria foi replicada para todas as peneiras do circuito de peneiramento primário S11D

3.1.4. Resultados

Com o objetivo de compreender os resultados após a implementação das melhorias e realizar os ajustes necessários, monitoramos a operação da linha de peneiramento (linha 03) do circuito proposto durante aproximadamente 30 dias. Na Figura 3.6 apresenta um resumo do teste, onde é possível observar que houve um total de 419 horas de operação com carga, sendo apenas 15 horas com corrente acima de 45A (o limite para alterar a rotação), enquanto as 365

horas restantes foram operadas com rotação baixa (3.5 G), representando 87% do tempo. Além disso, registramos 54 horas de operação com carga e rotação alta (aproximadamente 4.5 G).

Conseqüentemente, podemos concluir que, após a implementação das melhorias, apenas 13% do tempo de operação da peneira ocorre em alta rotação, em contraste com o período anterior à implementação, quando a peneira operava continuamente em alta rotação. O principal benefício dessa redução na rotação está relacionado ao aumento da vida útil da peneira, resultante da diminuição do esforço operacional, tanto mecânico quanto elétrico, sem comprometer a eficiência de peneiramento.

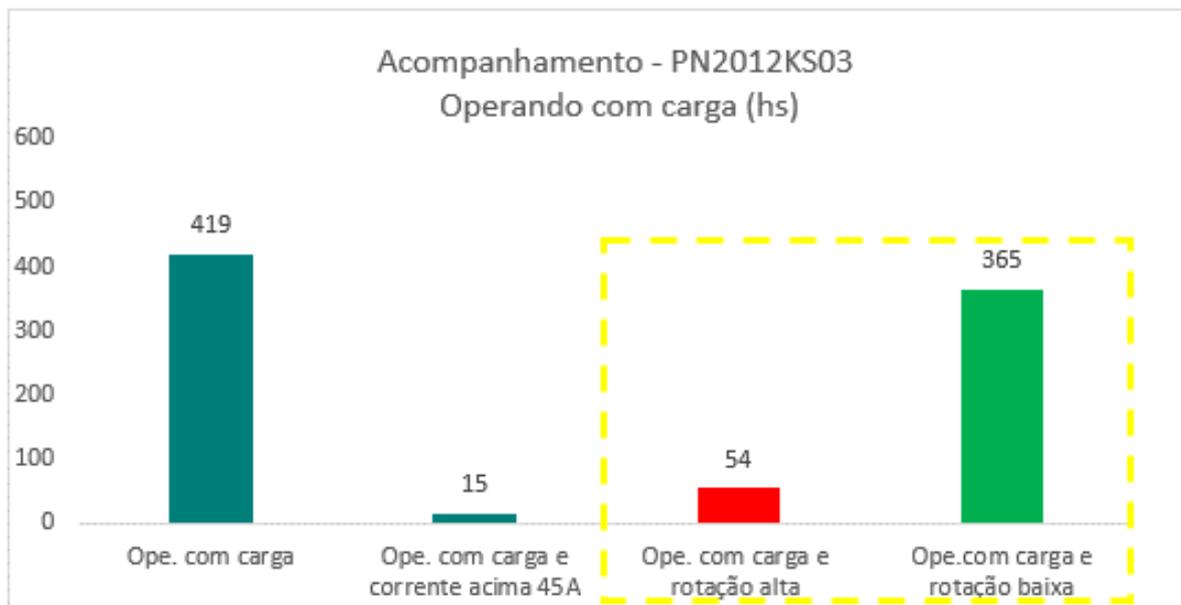


Figura 3.6: Resultados Projeto Controlador de Rotação Peneiras
Fonte: O autor

3.2. Projeto para controlar o nível de silo

Para o projeto de controlar o nível de silo, foram implementadas duas estratégias de controle diferentes: um controlador fuzzy para o balanceamento do nível de silo e um controlador override para manter o nível de silo baixo. A ideia por trás dessas implementações é que ambas as melhorias se complementam para alcançar o resultado desejado de aumentar a estabilidade do circuito.

3.2.1. Introdução

No cenário do processamento mineral, a otimização da eficiência é de suma importância para garantir a qualidade e a produtividade das operações de peneiramento. Fonseca (2022) explora uma abordagem inovadora baseada em sistemas de controle fuzzy para melhorar a eficiência desse processo de peneiramento. Neste estudo, Fonseca (2022) propõe e implementa um controlador fuzzy que ajusta automaticamente os parâmetros controle de taxa de peneiramento, levando em consideração variáveis complexas e interdependentes, como nível dos silos, posição do transportador que alimenta os silos e tempo estimado para enchimento do silo. O controlador fuzzy é projetado para adaptar-se a diferentes condições de minério alimentado e manter a eficiência do processo, na busca de balancear os níveis de todos os silos de usina de beneficiamento de minério de ferro, evitando assim paradas operacionais por falta ou excesso de material nos silos.

Com base neste estudo anterior, foi avaliada a oportunidade de replicar essa melhoria na etapa de peneiramento primário de S11D, com o objetivo de aumentar a estabilidade do circuito, através de um maior balanceamento dos níveis dos silos e, conseqüentemente, reduzir as paradas operacionais. A eficiência do processo de peneiramento primário e britagem secundária, que compreende seis linhas paralelas, depende de diversos variáveis. Podemos destacar a capacidade de manter os silos continuamente abastecidos e com níveis balanceados o que reflete em uma taxa de alimentação das peneiras mais constante. Antes do projeto, a função de balanceamento dos níveis era realizada apenas cabeça móvel, transportador responsável por despejar o minério nos silos, porém, com baixa eficácia. É importante ressaltar que a tarefa de balanceamento de níveis, quando executada com baixa efetividade, desencadeia paradas nas linhas devido a níveis insuficientes nos silos, bem como paradas no circuito a montante devido a níveis excessivos nos silos. Esse cenário pode levar à interrupção de todo o circuito a jusante do peneiramento primário, representando um potencial risco para a operação de toda a mina.

Devido à dificuldade do cabeça móvel em desempenhar essa função de maneira eficaz, a mesma estratégia defendida por Fonseca (2022) foi proposta para ser implementada no peneiramento primário de S11D. Nessa abordagem, a responsabilidade de equilibrar os níveis foi transferida para cada par de alimentadores, demonstrando um melhor desempenho.

Outro ponto importante a ser destacado nesta etapa do processo é que, em caso de qualquer parada em uma linha, o sistema de controle tende a compensar a taxa nas demais linhas, o que pode sobrecarregar o outro par de peneira. Isso pode resultar em conflitos com o controlador de sobrecarga de corrente ou rotação das peneiras.

Para facilitar a compreensão do problema, foram criados dois cenários explicativos de paradas operacionais devido à ineficiência no balanceamento de níveis. No primeiro cenário, conforme demonstrado na Figura 3.7, podemos observar que o cabeça móvel está posicionado no silo 01, e ocorre uma parada devido a nível baixo na linha 05, representado em vermelho na simulação do nível. Destaca-se a diferença entre os níveis dos silos, resultante da ineficiência

no balanceamento dos níveis dos silos.

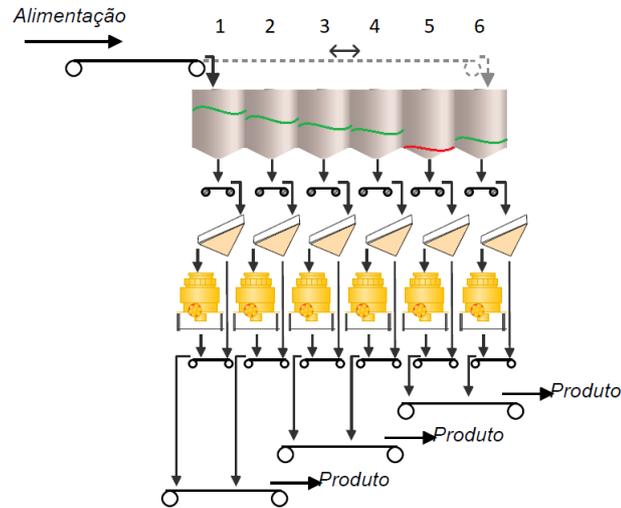


Figura 3.7: Paradas por nível baixo
Fonte: O autor.

No segundo cenário, conforme demonstrado na Figura 3.8, podemos observar que o cabeça móvel está posicionado no silo 01 e ocorre uma parada devido a um nível elevado na linha 05, como podemos verificar em destaque em vermelho na simulação do nível.

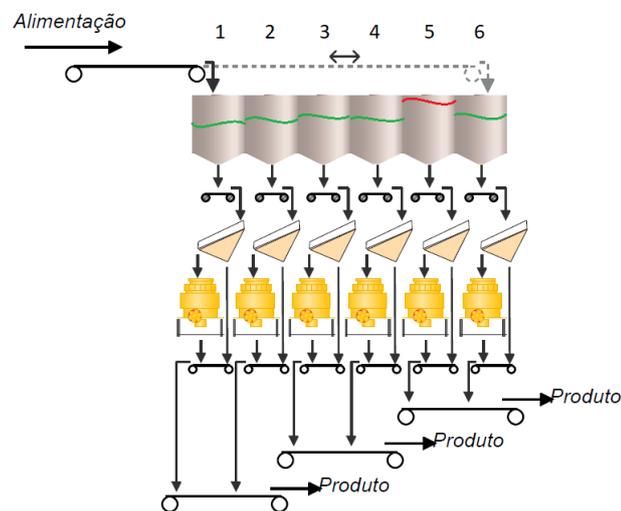


Figura 3.8: Paradas por nível alto
Fonte: O autor.

Em resumo, para aprimorar o controle de nível dos silos no Peneiramento Primário, foi elaborada a Figura 3.10, que demonstra como cada controlador proposto atuará no processo com o objetivo de melhorar as instabilidades relacionadas ao nível de silo do peneiramento, as quais resultam em paradas devido a intertravamentos.

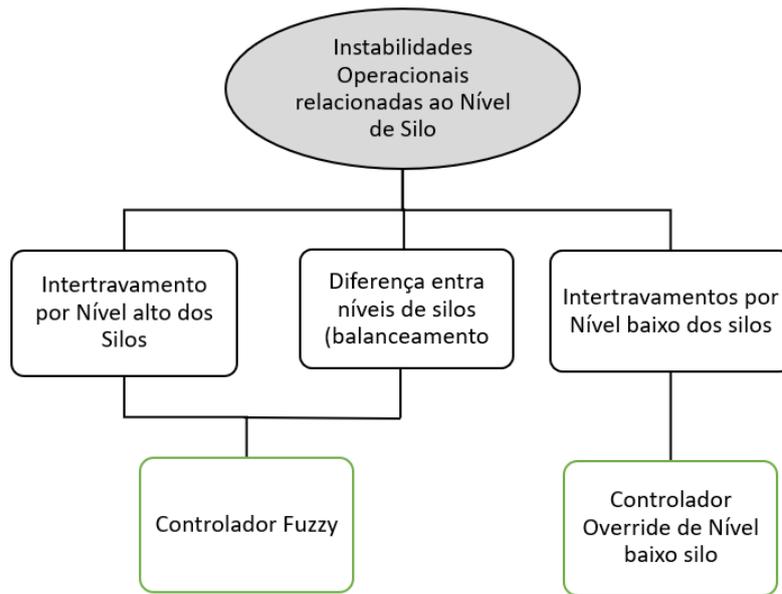


Figura 3.9: Diagrama Controle de nível de silo
Fonte: O autor.

3.2.2. Objetivos

Para esse projeto, foi definido que os objetivos da implementação desses dois novos controladores serão:

- Redução na frequência de paradas dos alimentadores (nível alto e nível baixo do silo). Esse indicador é uma referencia do número de paradas na alimentação das peneiras pelas horas operadas, sendo quanto maior esse número menor a estabilidade do processo;
- Reduzir a diferença entre os níveis dos silos no peneiramento primário, buscando uma equalização nos níveis;

3.2.3. Metodologia Controlador *Fuzzy*

Para o desenvolvimento do controlador *Fuzzy* para o peneiramento primário foi utilizado a biblioteca já existente *Fuzzy* do SDCD utilizado em S11D, 800XA dentro da ferramenta de engenharia Control Builder do fornecedor ABB. Esta biblioteca já contempla blocos funcionais para realizar as principais funções para o desenvolvimento.

- Entrada Reais
- Funções de pertinências
- Definição das premissas das condições do *Fuzzy* entradas, saídas e agrupamentos;

- Definição das premissas das condições do *Fuzzy*
- Defuzzification;
- Saídas reais;

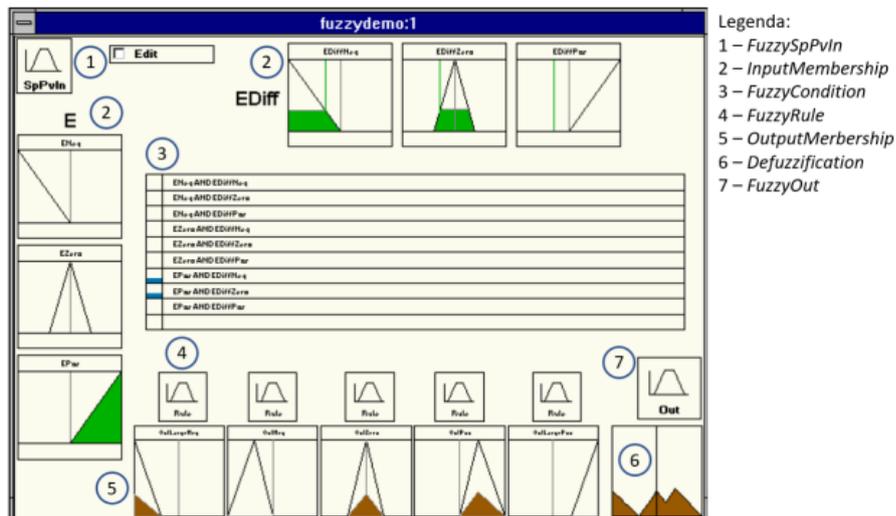


Figura 3.10: Disposição Genérica Elementos Controlador Fuzzy.
Fonte: O autor.

Para o desenvolvimento do controlador fuzzy foi criado 6 lógicas fuzzy iguais, sendo uma para cada linha do peneiramento primário. Para as entradas e saídas do fuzzy foram definidas conforme tabela 3.1:

Tabela 3.1: Variáveis *Fuzzy*.

Entradas Fuzzy	Saída Fuzzy
Nível do Silo	Indicador Aceleração
Distancia do Cabeça Móvel	Indicador de desaceleração
Taxa de alimentação Silo	

As funções de pertinências de entradas e saídas foram definidas através do conhecimento empírico do time de processo e através de testes, desta forma os valores linguísticos foram definidos para entradas e saídas conforme 3.2

Tabela 3.2: Valores Linguísticos

Entradas Fuzzy	Saída Fuzzy	Valores Linguísticos
Nível do Silo	x	Baixo / Norma / Alto
Distancia do Cabeça Móvel	x	Perto / Longe
Taxa de alimentação Silo	x	Baixo/ Nula / Alto
x	Indicador Aceleração	Aumenta Pouco /Aumenta Muito
x	Indicador de desaceleração	Reduz Pouco / Reduz Muito

3.2.4. Metodologia Controlador *Override* Nível Baixo de Silo

Para a estratégia de controle *override* de nível de silo é basicamente um controle regulatório do tipo proporcional-integral (PI), em que a variável de processo é o nível do silo da linha de peneiramento e a variável manipulável é a velocidade o alimentador. O SP deste controlador foi definido através de testes onde a principal função era evitar que aconteça o intertravamento por nível baixo, através de uma redução da velocidade do alimentador, aumentando assim o tempo de operação até que o cabeça móvel consiga chegar neste silo novamente. Foi implementado também uma estrutura de *tracking*, para que em momentos que o nível de silo estiver elevado ou que o cabeça móvel já esteja em cima deste silo, esse controlador entra então em modo hibernado, sem interferir diretamente no controle de taxa do alimentador. A definição dos parâmetros do controlador PI e SP estão apresentados na tabela 3.3. Não foi utilizado nenhum modelo para definição desses parâmetros, apenas testes de sintonias e acompanhamento do processo.

Tabela 3.3: Parâmetros Controlador *Override* Nível Baixo de silos

Parâmetros	Nível de Silo
SP	40%
K_p	2.0
K_i	30

A principal dificuldade na implementação deste novo controlador *override* na estratégia de controle de taxa do peneiramento primário foi programar de forma que comutação estável entre os demais controladores já desenvolvidos no mesmo circuito ,como por exemplo: Controle de corrente da peneira, controle de taxa e controlador fuzzy, onde todas essas lógicas utilizam

como base a mesma variável manipulável para tomada de decisão: velocidade do alimentador.

3.2.5. Resultados

Com o objetivo de avaliar os resultados para a redução dos desvios entre os níveis dos silos, foram conduzidos testes comparativos entre os pares da linhas 01 (composto pela linha de peneiramento 01 e 02) e os pares da linha 03 (abrangendo a linha de peneiramento 05 e 06) após a implementação do controlador *fuzzy*. Isso nos permitiu comparar linhas similares dentro do circuito, que recebem o mesmo tipo de material e operam sobre as mesmas condições de processo. Para a análise foram coletados dados de 5 em 5 segundos durante o período entre fev/23 até abril/23, aproximadamente 45 dias, e excluído os momentos de operação sem carga do circuito, gerando assim aproximadamente 1152 horas de operação com carga para análises. Com os dados gerados foram cálculos a diferença entre os silos das linhas e a partir dos dados apresentados na Figura 3.11, podemos observar que a linha 01 apresentou um desvio de 11,92% entre os níveis dos silos, enquanto a linha 03 demonstrou um desvio de 8,79%. Nessa análise, valores mais próximos de zero indicam um equilíbrio mais eficaz nos níveis dos silos. Portanto, a linha 03, na qual o controlador *fuzzy* foi implementado, registrou uma notável redução de 34,60% na diferença entre os níveis, quando comparada à linha 01.

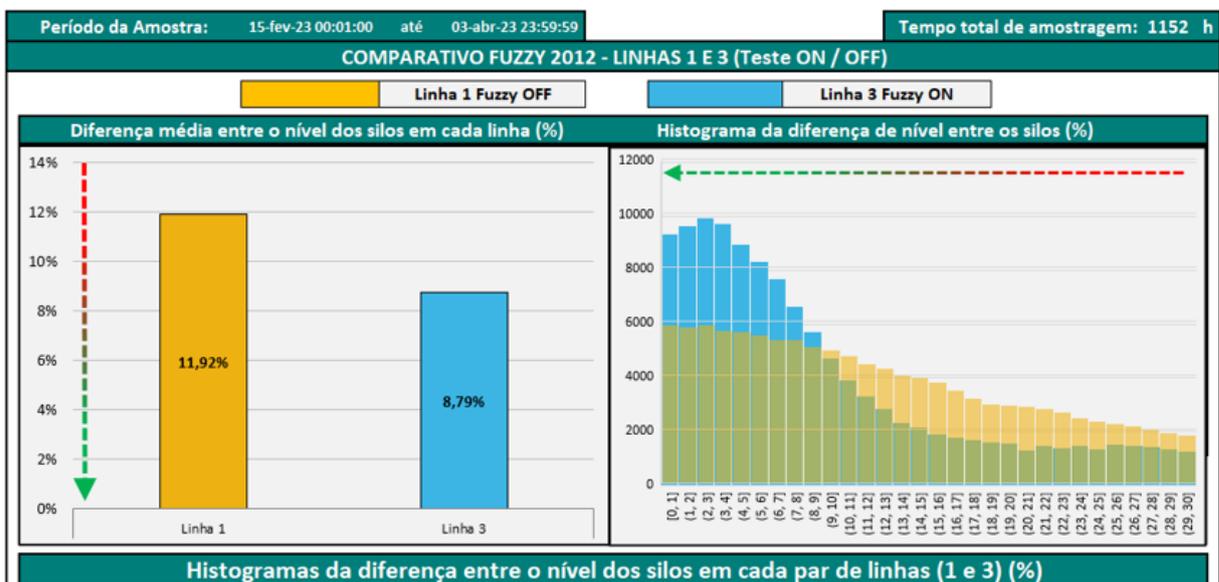


Figura 3.11: Resultados Balanceamento Nível Silos

Fonte: O autor.

Após a implementação do controlador override de nível baixo, sendo integrando na estrutura do controlador fuzzy de balanceamento dos níveis dos silos, foram realizados análises quantitativas das paradas operacionais devido a níveis baixos ou altos, através de teste comparativo, coletando dados de 30 dias antes da implementação das melhorias e 30 dias após

a implementação das mesmas, de 5 em 5 segundos. Os dados apresentados na Figura 3.12 indicam que todas as linhas de alimentadores (AL's) registraram reduções significativas na frequência de paradas após as implementações das melhorias. Ao comparar a média de todas as linhas, observamos uma redução de aproximadamente 71,3% (de 1,67 paradas por hora para 0,47 paradas por hora) nesse período.

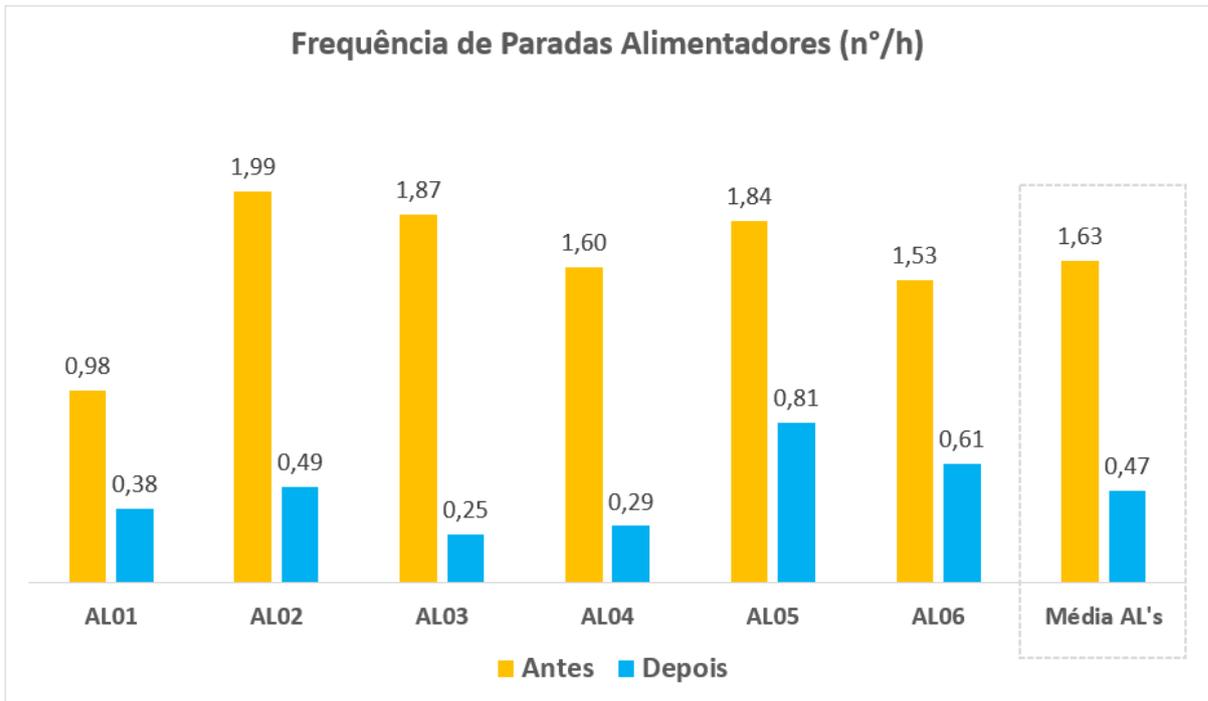


Figura 3.12: Resultados Frequência de Paradas Alimentadores
Fonte: O autor.

Podemos concluir que a integração do controlador "fuzzy" com o controlador "override" de nível baixo desempenharam um papel crucial no funcionamento eficiente do circuito, contribuindo de forma substancial para estabilizar problemas operacionais relacionados ao controle de nível de silo. Essa contribuição se reflete em uma notável redução de 71,4% nas paradas operacionais e em uma redução de 34,60% na diferença entre os níveis dos silos no circuito de peneiramento primário de S11D.

4. Parte B: Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador *override*

4.1. Introdução

A indústria mineral frequentemente utiliza conjuntos de silos para armazenar minério durante o processo de beneficiamento em uma planta de processamento. Esses silos desempenham o papel de *buffers*, atenuando perturbações devido a variações na taxa de produção ou pequenas interrupções entre as etapas do processo. Isso garante um fluxo contínuo de material e maior estabilidade para as etapas subsequentes. Para assegurar a eficácia dos silos, é crucial manter o nível de material dentro de uma faixa operacional adequada. Caso contrário, intertravamentos podem ser acionados para evitar transbordamentos ou esgotamento, ambos representando riscos para a operação. A ocorrência desses intertravamentos pode resultar em paradas indesejadas, levando a instabilidade no processo e perdas de produção momentâneas.

Uma abordagem comum para a distribuição de material é por meio de um sistema de cabeça móvel retrátil, que se move de um silo para outro, despejando material sob o silo abaixo dele. Alguns estudos propuseram estratégias de controle para o nível destes silos por meio da manipulação do cabeça móvel. Caldas e Martins (2018) apresentou um algoritmo de otimização linear inteira mista para controle de posicionamento do cabeça móvel. O objetivo era reduzir a variabilidade do nível dos silos apesar das variações das condições operacionais do processo. Albuquerque *et al.* (2019) implementou um controlador baseado em regras para melhoria da distribuição de material em silos por meio do controle da velocidade de movimentação do cabeça móvel e regras para definição do número de linhas adequadas ao cenário. O controlador monitora o nível instantâneo de todos os silos e atua sob a velocidade do cabeça móvel de modo que o nível médio se mantenha próximo à uma referência previamente estabelecida.

Uma outra abordagem para o controle de nível nos silos é por meio da manipulação da velocidade dos alimentadores. Como em Fonseca (2022), em que um controlador *fuzzy* foi proposto para atuar sob a velocidade dos alimentadores de um circuito de peneiramento de modo a melhorar a distribuição do material entre os silos, e conseqüentemente, aumentar a eficiência do processo. As variáveis monitoradas pelo *fuzzy* são os níveis dos silos e a distância do cabeça móvel. As funções de pertinência e regras foram criadas de tal modo que a taxa de retirada de material fosse reduzida nos silos com menor nível (evitando intertravamento) e maior distância, e fosse maior nos silos com nível mais elevado e menor distância. Resultados da aplicação prática desse controlador apontaram melhorias na distribuição do material além de aumento de produtividade.

O tema e ganhos proposto neste trabalho está ligado a aplicação do *Health Aware Control* que emerge como uma estratégia inovadora na operação de sistemas de britagem, integrando

informações de saúde do equipamento em tempo real Smith e Johnson (2021). Essa abordagem permite ajustes automáticos dos parâmetros do britador com base nos dados de saúde, como a adaptação da taxa de alimentação em resposta a vibrações anormais Li *et al.* (2020). Além de otimizar a eficiência energética e a vida útil dos componentes, essa integração reduz paralisações não programadas e contribui para a segurança dos trabalhadores, ao evitar operações inadequadas. A aplicação do *Health Aware Control* demonstra promissoras melhorias em setores como mineração e processamento mineral, transformando a operação e manutenção de sistemas de britagem Li *et al.* (2020); Smith e Johnson (2021).

Neste trabalho, um controlador *override* foi projetado com o objetivo de reduzir a quantidade de microparasadas dos alimentadores que abastecem os britadores terciários da usina de Serra Sul. Definimos microparasadas como parasadas com duração menor que 300 segundos, o que apesar de curtas, geram descontinuidade operacional, e conseqüentemente, uma perda considerável de eficiência de britagem e produção no longo prazo. Resultados práticos de aplicação do novo controle são apresentados e comparados com a estratégia de controle aplicada anteriormente.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: Na Seção 2 é apresentado o circuito de britagem terciária de Serra Sul. O controlador *override* proposto é mostrado na Seção 3. Na Seção 4, são discutidos os resultados da aplicação prática, e finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

4.1.1. Motivação

Etapa de britagem terciária da planta de Serra Sul opera em circuito fechado com o peneiramento secundário onde é gerado o produto final da unidade operacional. Desta forma qualquer ineficiência no processo de britagem pode gerar perdas momentâneas de produção que não poderiam ser recuperadas devido toda complexidade dos circuitos a montante. Sendo assim a grande motivação deste trabalho é propor de forma inovadora uma forma de melhorar a estabilidade do circuito através de controle da taxa que está armazenado no silo a montante do britador sem gerar redução na eficiência de britagem.

4.1.2. Hipótese

Para o desenvolvimento deste artigo foram, duas hipóteses foram formuladas:

- Redução momentâneas na taxa de alimentação dos britadores não afeta no nível médio de câmaras dos britadores no acumulado da operação ;
- É possível reduzir parasadas operacionais sem comprometer eficiência de britagem;

4.1.3. Objetivos

Para o desenvolvimento deste projeto foram, foram definidos três principais objetivos para etapa de britagem terciária de Serra Sul: O principal objetivo deste projeto foi propor de forma inovadora uma forma de reduzir as pequenas operacionais e aumentar a eficiência de britagem

- Reduzir instabilidade no processo que resultam em paradas operacionais e expõe equipamentos excesso de partidas ;
- propor método automático de reduzir microparadas através de redução na taxa de alimentação do britador sem comprometer a eficiência de britagem;

4.1.4. Delimitação do tema

A projeto é baseado em equipamentos do complexo minerário S11D da Vale, no Pará, e as análises são restritas unicamente ao circuito de britagem terciária, ou seja, os demais equipamentos da planta de processamento mineral são desprezados. Para a etapa de britagem terciária, é definido que se busca o aumento de estabilidade desses equipamentos especificamente por meio da variação da velocidade dos alimentadores que interfere diretamente na produtividade e rendimento operacional do circuito.

4.2. O processo de britagem terciária em Serra Sul

A Figura 4.1 mostra o circuito de britagem terciária de Serra Sul, local de estudo e de aplicação da estratégia de controle proposta. Esta etapa do circuito é composto por um transportador tipo *cabeça móvel* que despeja o minério nas quatro linhas de produção, cada uma possuindo um silo, um alimentador e um britador hidrocônico. A distribuição de material neste circuito é feita por meio de um cabeça móvel que se locomove segundo a estratégia de controle apresentada em Albuquerque *et al.* (2019). O alimentador, de velocidade variável, é responsável por retirar material do silo e transportá-lo ao britador e manter o nível de câmara do britador conforme *setpoint* solicitado. Desta forma a velocidade do alimentador é controlada de maneira que o nível da câmara do britador se mantenha sempre cheia.

A etapa de britagem terciária é conectada, em circuito fechado, ao peneiramento secundário da planta, conforme mostrado na Figura 4.2. O *overflow* do peneiramento secundário -i.e., material retido nas peneiras por não apresentar o tamanho adequado ao processo alimenta a britagem terciária britagem. Por sua vez, o produto da britagem terciária é recirculado para alimentar novamente o processo de peneiramento secundário e o *underflow* do peneiramento é o produto final de processo.

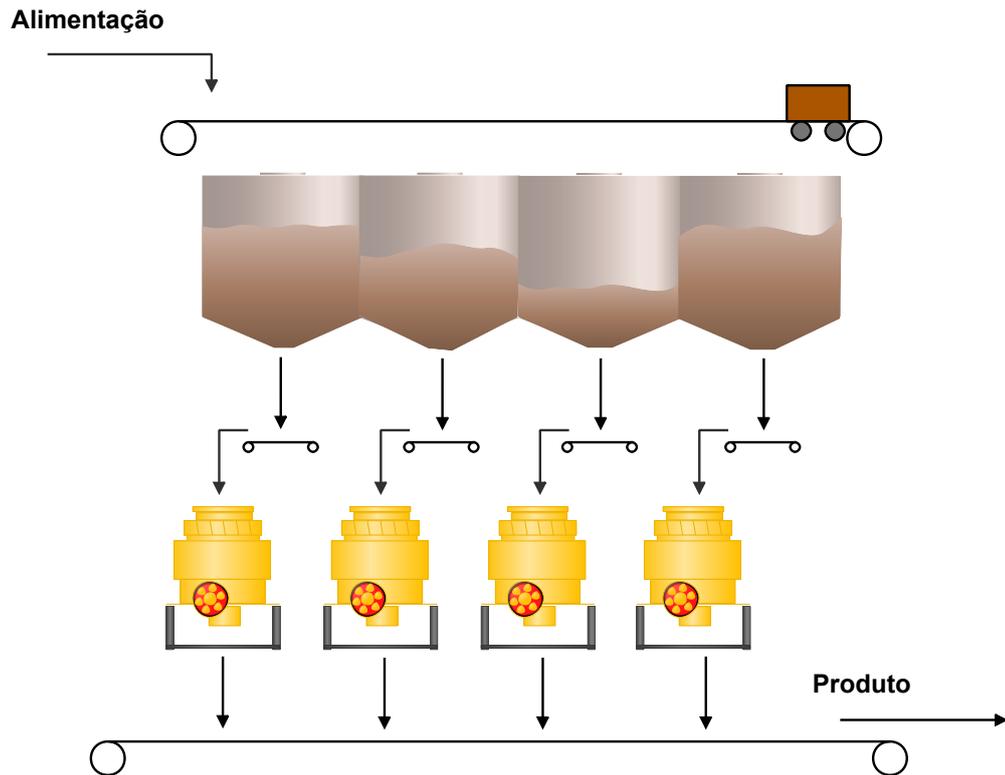


Figura 4.1: Britagem Terciária em Serra Sul.
Fonte: O autor.

Devido ao acoplamento entre os processos, reduções de taxa ou paradas de produção em uma das etapas afetam diretamente a outra. Por exemplo, caso o nível de algum silo da britagem terciária atinja um valor baixo e o intertravamento seja acionado, o alimentador correspondente é parado. Conseqüentemente, apenas o material presente na câmara do britador está disponível para britagem e peneiramento secundário. Isso resulta na redução da produção da britagem terciária e perturbações no circuito, especialmente prejudiciais, pois o peneiramento secundário é o último processo de beneficiamento e sua produção constitui o produto final da usina.

Apesar do controle automático da movimentação e seleção de silos pelo cabeçote móvel para distribuição do material, ainda ocorrem muitas microparasas devido à variação na taxa de alimentação e outras condições operacionais. Os intertravamentos por nível baixo são acionados quando o nível do silo atinge ou cai abaixo do limite de 10%. Nesse momento, o alimentador abaixo do silo é interrompido para evitar seu esvaziamento total, mitigando riscos operacionais relacionados ao trabalho a vazio dos alimentadores. O período de parada do alimentador é o tempo necessário para o cabeçote móvel alcançar o silo intertravado e preenchê-lo até atingir 25% de seu nível. Quando essa duração é inferior a 300 segundos, é denominada microparada

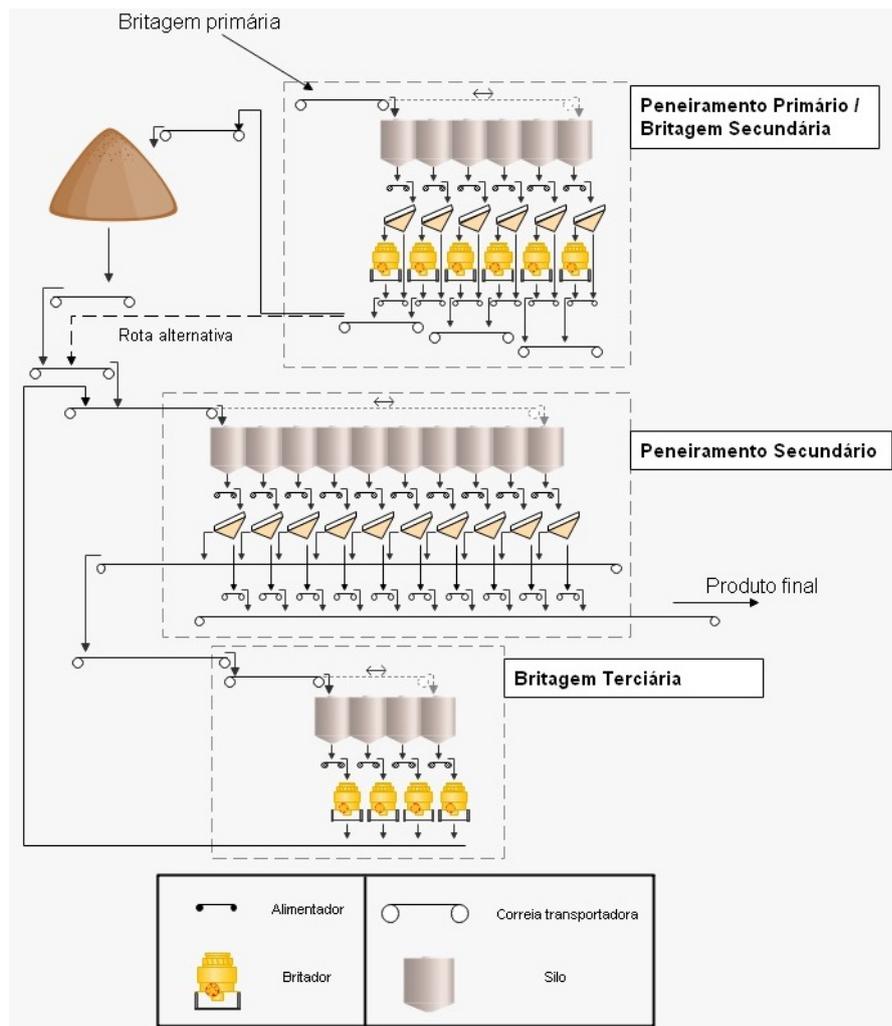


Figura 4.2: Fluxograma do peneiramento secundário e da britagem terciária de Serra Sul.
 Fonte: (?)

4.3. Controlador *Override* Proposto

A estratégia de controle utilizada na britagem terciária de Serra Sul é essencialmente um controle regulatório proporcional-integral (PI), em que a variável de processo é o nível da câmara do britador e a variável manipulada é a velocidade do alimentador. Isso ocorre porque, em um britador hidrocônico, a eficiência neste processo está diretamente ligada ao nível de material na câmara (SANTOS *et al.*, 2020). É importante destacarmos que para os britadores hidrocônicos existem principalmente dois processos de quebra das partículas sendo: a britagem por compressão e a britagem autógena. Essas técnicas desempenham um papel crucial na redução do tamanho das partículas de minério e rocha, preparando o material para as etapas subsequentes de processamento. A britagem por compressão é um método que envolve a redução do tamanho das partículas por meio da aplicação de forças de compressão mecânica. Já a britagem autógena é um processo onde o próprio material é usado para realizar a cominuição, através do atrito e cisalhamento entre as partículas.

Nessa situação, o nível da câmara está diretamente relacionado à eficiência da britagem autógena. Um nível baixo compromete consideravelmente o desempenho dessa etapa, uma vez que interrompe o contato entre as partículas, resultando em um produto granulado que não atende aos padrões estabelecidos. Isso acarreta um aumento na carga circulante e acelera o desgaste dos componentes do britador. Por outro lado, um nível elevado na câmara prolonga o tempo de permanência do material dentro do britador e promove o contato entre as partículas, melhorando, assim, sua eficiência no processo. Isso significa que um nível mais alto da câmara é benéfico para otimizar a britagem autógena, resultando em um produto final de melhor qualidade e maior conformidade com as especificações desejadas. Portanto, manter um nível adequado na câmara é crucial para garantir um processo de britagem autógena eficiente e eficaz.

Essa estratégia de controle, entretanto, não considerava o nível do silo do alimentador, concentrando-se exclusivamente no nível da câmara do britador. Consequentemente, mesmo quando o nível do silo está baixo, a velocidade do alimentador não é ajustada para reduzir a taxa de retirada de material do silo e prevenir um intertravamento por baixo nível. Esse cenário frequentemente resultava em paradas operacionais devido ao baixo nível do silo, o que inevitavelmente impacta negativamente na eficiência da britagem. Isso ocorre porque o nível da câmara diminuía devido à interrupção do fornecimento de material pelo alimentador.

O controlador *override* proposto neste trabalho teve como objetivo reduzir o número de intertravamentos dos alimentadores devido ao baixo nível, especialmente as microparadas. A estrutura do controlador é ilustrada na Figura 4.3. Nela, foram desenvolvidos dois controladores do tipo PI, um relacionado ao nível da câmara do britador e outro relacionado ao nível do silo. Um seletor de mínimo assegura que o controlador que gera o menor sinal de controle é o responsável por manipular a velocidade dos alimentadores.

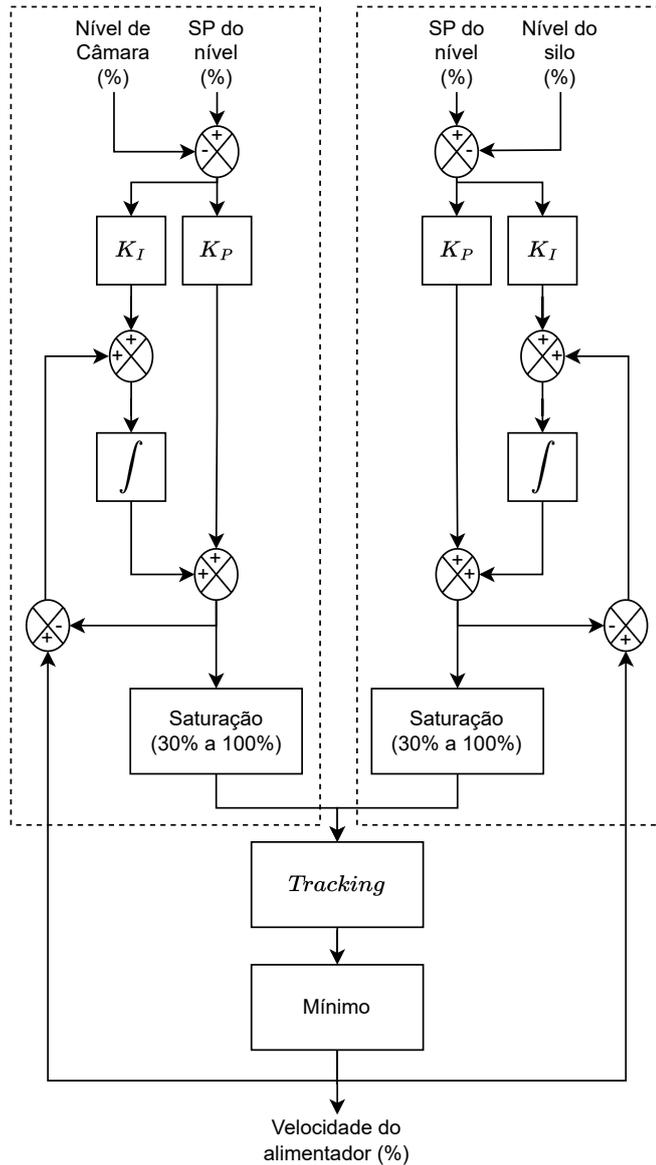


Figura 4.3: Estrutura do controlador *override* proposto.

Fonte: O autor.

Com o objetivo de garantir uma operação suave entre os controladores na estrutura de controle *override*, foi implementado um mecanismo de *tracking*. Em situações em que o nível de silo se encontra em um valor adequado, distante dos extremos, o controlador de nível baixo do silo entra em modo *tracking*, em que sua saída é determinada pela saída do controlador de nível da câmara, acrescida de um *offset*. Esse mecanismo permite a sincronização dos controladores, assegurando que o controlador de nível baixo se ajuste de forma precisa com base nas ações do controlador de nível da câmara. Dessa forma, é possível manter um controle eficiente e estável, promovendo uma operação adequada do sistema controlado.

O Controle *Override* é um tipo de controle no qual uma variável manipulada pode ser alterada através de varias variáveis controladas. Esse método de controle geralmente utiliza dois controladores simples, um seletor e uma única variável manipulada, de modo que monitorea-se

as variáveis controladas do processo, exceto a PV controlada pelo controlador principal. Assim, o controlador secundário atua nas demais variáveis controladas, uma de cada vez, quando essas atingirem valores inesperados (FREITAS JÚNIOR, 2016).

Os valores relacionados aos parâmetros dos controladores PI e seus respectivos SP estão apresentados na Tabela 4.1. A definição do nível da câmara teve como base a recomendação de eficiência fornecida pelo fabricante. Para determinar o nível do silo, conduzimos uma série de testes abrangendo o deslocamento do cabeça móvel de uma extremidade à outra. O objetivo era selecionar um valor que permitisse o movimento até o silo, evitando o esvaziamento, entretanto, que o nível não fosse alto suficiente para atuar sobre o alimentadores de forma desnecessária. Por fim, os parâmetros dos controladores, foram ajustados de forma empírica durante a operação dos equipamentos, procurando um ponto ótimo em termos de estabilidade e velocidade de correção, ou seja, não foi utilizado nenhum modelo para definição desses parâmetros, apenas testes industriais para realização de sintonia.,

Tabela 4.1: Parâmetros para o controle *override* BR's.

Parâmetro	Nível de câmara	Nível do silo
SP	80,0	35,0
K_P	1,5	3,0
K_I	40,0	20,0

4.4. Resultados

O complexo de Serra Sul é composto por três usinas similares que compartilham a mesma fonte de alimentação. Dessa forma, é possível implementar a nova estratégia em uma única usina e observar como ela se compara em relação as demais. O controlador *override* proposto foi desenvolvido no sistema de automação 800xA[®], do fornecedor ABB, e implantado na usina A. Para avaliar sua eficácia, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos na usina A, com o controlador, e na usina B, sem o controlador, no período de 06/03/2023 a 15/04/2023.

Na Figura 4.4, é mostrado um comparativo da frequência de microparasadas de cada alimentador dos circuitos de britagem terciária das usinas A e B. O termo frequência de microparasadas foi um indicador criado para facilitar a análises que corresponde ao número de microparasadas dividido pelas horas operadas do circuito, de modo que quanto maior este indicador menor é a estabilidade deste processo. Desta forma pode-se observar que o controle *override* obteve sucesso em reduzir significativamente este indicador frequência. Isso foi alcançado por meio de uma ação de controle que diminui a taxa de retirada de material do silo sempre que o nível do

mesmo atinge um patamar abaixo de 35%. Essa redução permite que o cabeça móvel alcance e alimente o silo antes que ocorra um intertravamento devido ao nível baixo. Em média, a frequência das microparadas na usina A foi aproximadamente 83% menor em comparação com a usina B.

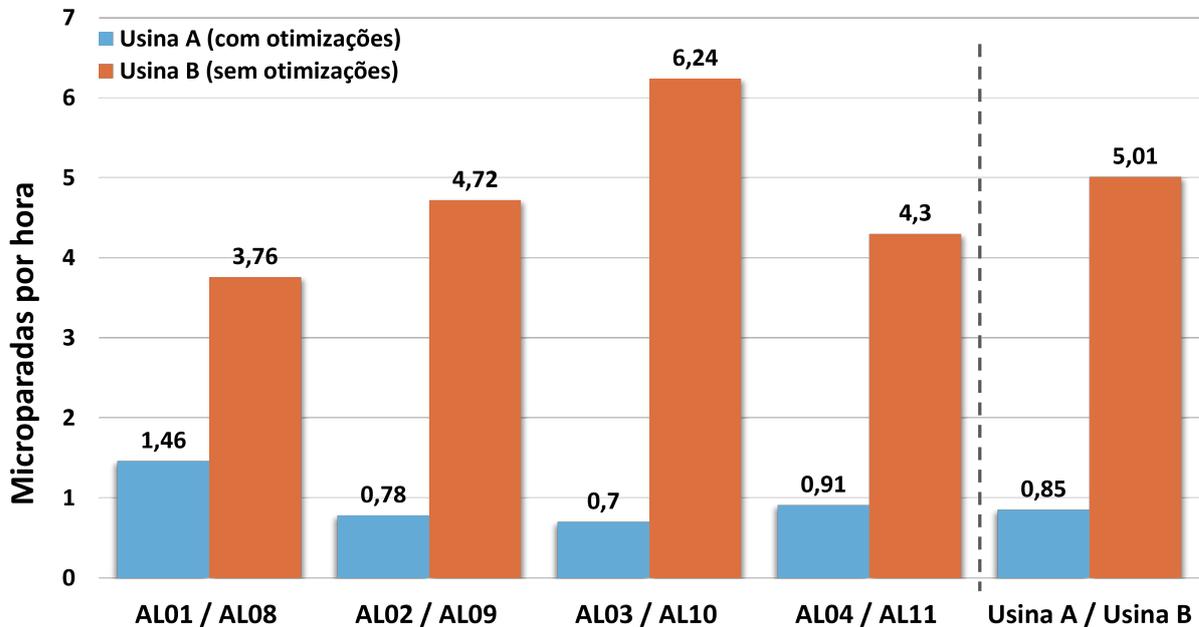


Figura 4.4: Frequência de microparadas.

Fonte: O autor.

Por meio da análise do histograma de microparadas apresentado na Figura 4.5, pode-se observar uma redução significativa na distribuição de microparadas ocorridas na usina A azul em que o controlador proposto foi implementado. Notavelmente, as microparadas com duração de até 40 segundos foram completamente eliminadas. No período analisado, a usina A registrou um total de 1.175 microparadas, enquanto a usina B apresentou 6.096 microparadas, apresentando assim uma redução de aproximadamente 83% no número absoluto de microparadas para o processo.

Uma preocupação relevante era compreender o impacto da atuação do controlador *override* em relação ao controle de nível do silo. Durante esses momentos, havia o receio de que o nível da câmara do britador diminuísse, comprometendo a sua eficiência de britagem. A Figura 4.6 apresenta o nível médio das câmaras dos britadores ao longo do período de testes comparativo entre as usinas A e B. Mesmo com a atuação do controlador *override*, o nível médio das câmaras dos britadores não foi significativamente alterado. Isso ocorreu devido ao tempo de recuperação mais rápido do nível da câmara na usina A com o controlador *override*, conforme ilustrado na Figura 4.7. Além disso, na usina B, onde não há o controlador *override*, o nível da câmara do britador diminuiu exclusivamente devido aos intertravamentos. Nestas circunstâncias,

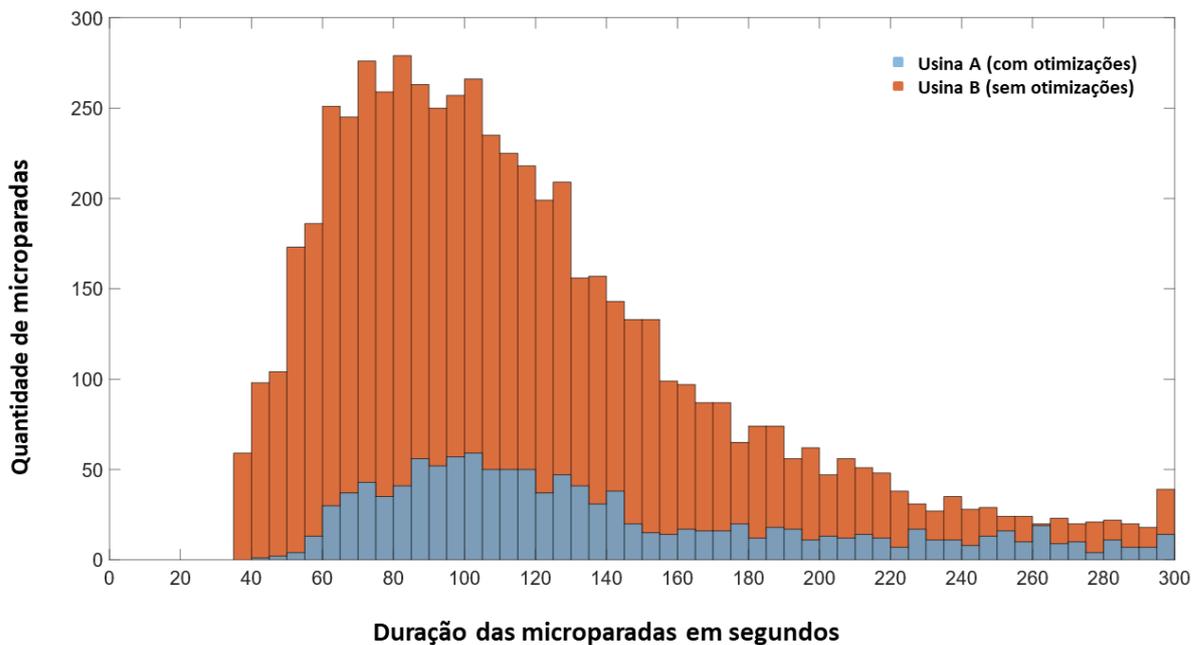


Figura 4.5: Histograma de microparasadas pelo tempo

Fonte: O autor.

a câmara tende a esvaziar, levando o seu nível a se aproximar de zero. Como resultado, o tempo necessário para que o nível retorne ao valor desejado (*setpoint*) é mais demorado.

É relevante notar que, a partir dos dados apresentados na Figura 4.7, torna-se evidente que a Usina A é capaz de restabelecer o nível desejado na câmara em menos de 60 segundos para cerca de 27% das situações, enquanto que para o restante (73% das ocorrências), leva mais tempo (acima de 60 segundos). Por outro lado, na Usina B, apenas 3% das vezes o nível retorna em menos de 60 segundos, enquanto em 97% dos casos o tempo é superior a esse limite. Essa análise facilita a compreensão dos dados gerados na Figura 4.6, na qual, mesmo com a estratégia implementada que tenderia a gerar uma redução no nível médio da câmara dos britadores, podemos observar que não houveram perdas. Desta forma, a melhoria proposta conseguiu reduzir o número de paradas operacionais como objetivo e sem prejudicar a eficiência da britagem no quesito britagem autógena.

4.5. Conclusão

Este estudo introduziu uma estratégia de controle *override* desenvolvida para otimizar a continuidade operacional de um circuito de britagem por meio do controle dos níveis dos silos. A validação dessa estratégia foi realizada em uma usina real, e os resultados apontaram melhorias consideráveis em relação ao sistema de controle anterior, resultando em uma notável

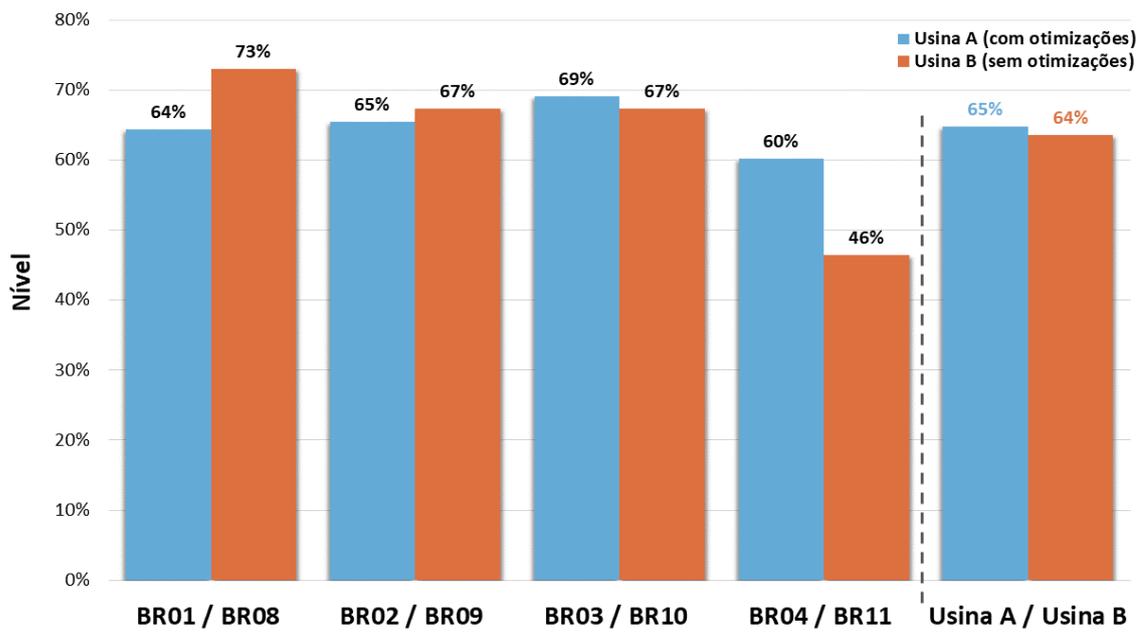


Figura 4.6: Nível de câmara dos britadores.

Fonte: O autor.

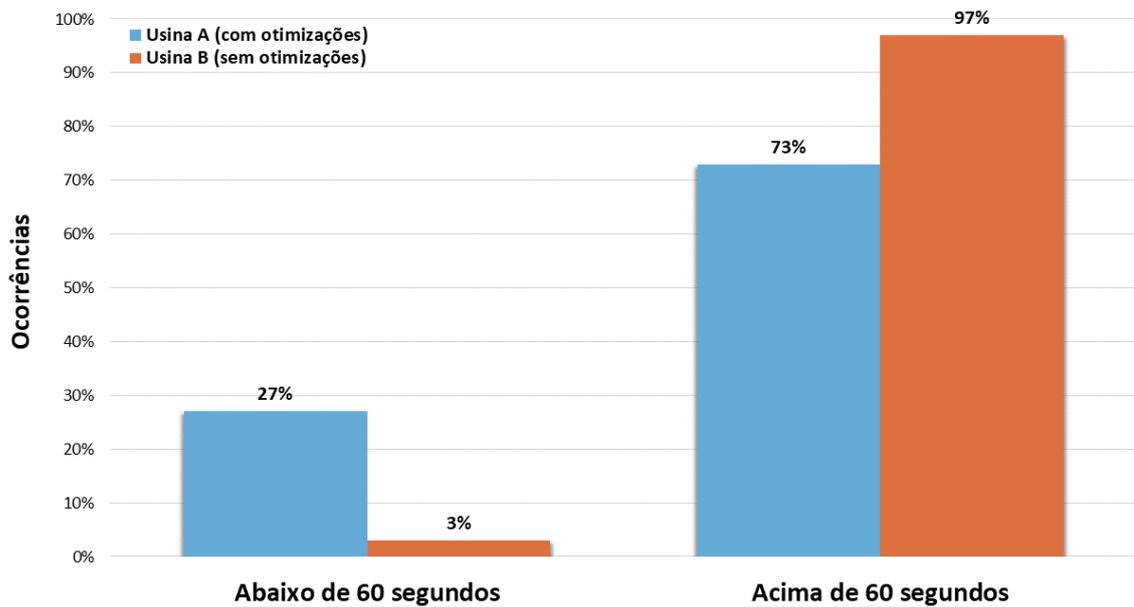


Figura 4.7: Recuperações de nível de câmara dos britadores.

Fonte: O autor.

redução das microparasdas de 83%. Essa abordagem permite a operação contínua do circuito, resultando em um aumento na produção, sem comprometer a eficiência do processo em termos do controle do nível da câmara do britador. Neste contexto, o controlador *override* proposto está atualmente em processo de expansão para abranger as outras duas usinas do mesmo complexo.

Este estudo introduziu uma estratégia de controle *override* desenvolvida com o propósito de otimizar a continuidade operacional de um circuito de britagem, através do controle dos níveis dos silos. A validação dessa estratégia foi conduzida em uma usina real e os resultados demonstraram melhorias significativas em comparação ao sistema de controle anterior, resultando em uma notável redução de 83% nas micro interrupções. Essa abordagem possibilita a operação ininterrupta do circuito, levando a um aumento na produção sem comprometer a eficiência do processo em relação ao controle do nível da câmara do britador. No contexto atual, o controlador *override* proposto está em processo de expansão para englobar as outras duas usinas do mesmo complexo

5. Conclusão

Ao final deste trabalho, é possível concluir que os modelos identificados e as soluções propostas, por meio da implementação de novos controladores na estratégia de override, demonstraram a capacidade de aprimorar a estabilidade do processo de peneiramento e britagem. Importante destacar que todas as estratégias propostas e implementadas podem ser consideradas de baixa e média complexidade de desenvolvimento porém com ótimos resultados. Assim, podemos fornecer respostas às questões levantadas no início deste trabalho.

- É possível caracterizar o minério que alimenta uma etapa de peneiramento por um método simples que possa melhorar o processo ?

Sim, no artigo 01 foi apresentado uma correlação entre características do minério: umidade, PPC, IMH, HGO e taxa de alimentação com a corrente de acionamento da peneira. e Essa correlação pode ser utilizada para tomadas de decisões no processo de maneira eficiente.

- É possível otimizar a taxa de alimentação de uma peneira para melhor aproveitar a capacidade nominal ?

Sim, através da correlação encontrada e utilizando a variável para controle da taxa de alimentação da peneira e com a nova estratégia de controle override para corrente de acionamento da peneira, é possível identificar momentos em que a peneira se encontra sobrecarregada e reduzir automaticamente a taxa de alimentação desta peneira. Além disso foi implementado um controlador de rotação que busca otimizar a eficiência de peneiramento evitando assim necessidade de redução de taxa do circuito.

- É possível implementar sistemas que otimize a performance dos circuitos e otimize também a vida útil dos ativos ?

Sim, diversos projetos apresentados neste trabalho demonstraram resultados que não apenas otimizaram o desempenho do circuito, mas também aumentaram a vida útil dos ativos. Um exemplo notável é o projeto do controlador de corrente e de rotação das peneiras, que contribuiu significativamente para esses objetivos. Além disso, outro projeto relevante que merece destaque é o controlador override de nível de silo do britador, o qual demonstrou a possibilidade de reduzir microparasas sem comprometer a eficiência do processo de britagem.

Os principais resultados encontrados nos trabalhos foram:

- Para o Circuito de peneiramento primário os principais resultados foram:
 - 1- Aumento de 5,1% no tempo de operação em modo automático;
 - 2- Redução de 67% nas paradas por sobrecargas,

3- Redução de 87% do tempo de operação em alta rotação das peneiras, elevando vida útil do equipamento,

4- Redução de 71,4% das paradas por nível baixo e alto das linhas de peneiramento e

5- Redução de 34,6% do desvio entre os níveis de silos.

- Para o Circuito de britagem terciária, o principal resultado foi:

1- Redução de 83% nas pequenas paradas operacionais por nível baixo, sem comprometer o controle de nível de câmara do britador e eficiência de britagem;

Segue abaixo resumo das melhorias implementadas e entregues neste trabalho:

- 1-Correlação encontrada entre Corrente de acionamento da peneira com características do minério;
- 2- Controlador *Override* de Corrente das Peneiras;
- 3- Controlador de rotação das Peneiras;
- 4- Controlador *Fuzzy* de balanceamento de níveis de silos;
- 5- Controlador *Override* de nível baixo de silos do peneiramento;
- 6- Controlador *Override* de nível baixo de silos do britador;

6. Trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho fica abaixo próximos passos e recomendações:

- Realizar estudo, seguindo metodologia utilizada, para etapas de peneiramento a umidade natural de todas unidades operacionais Vale, com objetivo de entender a relação encontrada entre as variáveis de processo e a corrente de acionamento das peneiras;
- Avaliar replicação da estratégia de controle de potencia para todo circuito de peneiramento a umidade natural das unidades operacionais ;
- Avaliar replicação da estratégia de controle de rotação para todo circuito de peneiramento a umidade natural das unidades operacionais Vale;
- Avaliar ganhos na disponibilidade física e utilização dos equipamentos após implementação das novas estratégias de controle, identificando possíveis falhas eliminadas ou minimizadas para circuito de Serra Sul;
- Avaliar ganhos de eficiência energética apos novas estratégias implementadas;

Referências Bibliográficas

- “ISO 281: Roller bearings - Dynamic load ratings and rating life”. International Organization for Standardization, 2007. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/39457.html>>.
- ALBUQUERQUE, K., SILVA, H., TEODORO, E., et al.. “Averaging level control of bulk solid material using a tripper car”, *IFAC-PapersOnLine*, v. 52, n. 14, pp. 147–152, 2019.
- ANDERY, P. “Tratamento de Minerios e Hidrometalurgia”, *VII Encontro Nacional de Tratamento de Minerios e Hidrometalurgia, Recife, ITEP*, pp. 205–240, 1980.
- ASBJÖRNSSON, G., BENGTSSON, M., HULTHÉN, E., et al.. “Model of banana screen for robust performance”, *Minerals Engineering*, v. 91, pp. 66–73, 2016.
- CALDAS, F. N., MARTINS, A. X. “Proposed Solutions to the Tripper Car Positioning Problem.” Em: *ICEIS (1)*, pp. 344–352, 2018.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. “Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem”, 2003.
- DE SÃO JOSÉ, F., JUNIOR, M. L. T., PEREIRA, C. A. “Análise de rota de peneiramento de minério de ferro no itm da namisa sa–um estudo de caso”, *HOLOS*, v. 4, pp. 299–307, 2017.
- DELFINO, O. “A PENEIRA EXCÊNTRICA CIRCULAR NA CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO COM UMIDADE NATURAL”. Em: *45º Ironmaking / 16º Iron Ore / 3º Agglomeration*, 2015.
- FONSECA, A. G. “Controle fuzzy para aumento de eficiência do peneiramento no processamento mineral.” 2022.
- FREITAS JÚNIOR, L. R. D. “Otimização de retomadora de granéis via controle multi-variável.” 2016.
- GONÇALVES, P. C. “Manuseio de minério de ferro coesivo sob umidade natural.” 2021.

- KING, R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2001.
- LI, Q., WANG, Y., CHEN, X. “Health-Aware Control of Crushing Systems Based on Dynamic Learning”. Em: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6710–6716. IEEE, 2020.
- LU, L. *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability*. Elsevier, 2015.
- LUZ, A. B. D., LINS, F. A. F. “Introdução ao tratamento de minérios”. CETEM/MCTIC, 2018.
- MATOS, S. N., PINTO, T. V., MOREIRA, V. S., et al.. “Estratégia de Avaliação da Eficiência do Processo de Peneiramento Utilizando Sensoriamento Remoto”. Em: *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*, v. 1, 2021.
- SANTOS, M. S., PINTO, T. V., JÚNIOR, Ê. L., et al.. “Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 94, pp. 103789, 2020.
- SMITH, J. A., JOHNSON, E. R. “Health Aware Control Strategies for Enhanced Crushing Plant Performance”, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, v. 12, n. 4, pp. 297–314, 2021.
- ZHANG, Y., WANG, X., WANG, J., et al.. “Deep reinforcement learning based volt-var optimization in smart distribution systems”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 12, n. 1, pp. 361–371, 2020.

A. Anexos

A.1. Anexo A: Produtos gerados

A.1.1. Artigo: Controle Override De Corrente elétrica para aumento de eficiência de peneiramento no Processo Mineral

Em resumo foram gerados dois artigos publicados e um pedido de patente.

O Projeto Controlador de Corrente Peneiramento Primário Serra Sul já foi aceite para apresentação como artigo no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI com data marcada para apresentação durante os dias 15 a 18 de outubro de 2023 em Manua/AM. Número de cadastro do artigo é 5037 e aceito como parte da secção *Aplicação de Controle 01*. Para o mesmo projeto também está em andamento depósito de patente. As figuras A.1 e A.2 são referentes as publicações e apresentação deste artigo no SBAI 2023.

A.1.2. Artigo: Aumento da continuidade operacional de um circuito por meio de um controle override

O Projeto Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador *override* já foi aceite para apresentação como artigo no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI com data marcada para apresentação durante os dias 15 a 18 de outubro de 2023 em Manua/AM. Número de cadastro do artigo é 7384 e aceito como parte da secção *Aplicação de Controle 01*. As figuras A.3 e A.4 são referentes as publicações e apresentação deste artigo no SBAI 2023.

A.2. Anexo B: Pedido de Patente

Processo de pedido de patente encontra-se em andamento, segue o resumo do pedido:

A.2.1. Resumo

Este pedido de patente refere-se a um método e sistema desenvolvidos de patenteabilidade relacionado ao projeto intitulado "Controle Override de Corrente Elétrica para o Aumento de Eficiência de Peneiramento no Processamento Mineral" referente ao campo técnico da mineração e processamento mineral, mais especificamente à otimização do processo de peneiramento a umidade natural. O projeto foi concebido e implementado na unidade operacional de

Serra Sul, conhecida como S11D, localizada em Canaã dos Carajás/PA, em colaboração com a equipe de Engenharia de Processo e Automação, em parceria com o Instituto Tecnológico Vale - Ouro Preto.

A.2.2. Campo Técnico

Este pedido de patente pertence ao campo técnico da mineração e processamento mineral, mais especificamente à otimização do processo de peneiramento em unidades de beneficiamento de minério de ferro.

A.2.3. Problema a ser resolvido

O peneiramento é uma operação sensível a diversos parâmetros, incluindo características do equipamento e do minério alimentado. Um problema comum é o impacto da umidade associado a determinadas litologias do minério no desempenho do peneiramento, uma vez que a água tende a fazer as partículas aderirem, reduzindo a eficiência e causando "cegamento" das telas de peneiramento resultando em paradas operacionais ou reduções de taxas. Então a necessidade de realizar ajustes na taxa de alimentação da peneira para uma melhor eficiência de peneiramento. Deve-se encontrar uma forma de definir essa taxa ideal de alimentação da peneira de forma dinâmica e automática, sem necessidade de intervenção manual no processo.

A.2.4. Solução Proposta

Neste pedido de patente, descrevemos uma correlação encontrada entre corrente elétrica do motor de acionamento da peneira com características do minério e com essa correlação implementar um sistema de controle "override" projetado para aprimorar a eficiência de peneiramento em uma usina de beneficiamento de minério de ferro. A solução atua ajustando a velocidade dos alimentadores para regular o fluxo de alimentação, de forma a evitar que a corrente da peneira ultrapasse um limite predeterminado. Isso reduz as paradas de produção devido a corrente alta nas peneiras, prolonga a vida útil do equipamento e otimiza a taxa de peneiramento, mesmo em cenários desafiadores.

Title	Controle Override de Corrente Elétrica para o Aumento de Eficiência de Peneiramento no Processamento Mineral
Authors	Kaike Albuquerque, Thiago A. M. Euzébio, Thomás Pinto, Alexandre Fonseca, Rodrigo Fina and Robson Duarte
Abstract	O processamento de minério de ferro a umidade natural proporciona uma série de benefícios econômicos , ambientais e operacionais. Isso acontece, principalmente, devido simplificação de rotas de processo, composta geralmente por apenas etapas de cominuição, classificação e manuseio. Porém esse tipo de processamento associado a condições climáticas e variações na litologia do material criam dificuldades no processamento tendo como principal causa o excesso de umidade do minério. Cenário esse, que em muitos casos, geram paradas operacionais por sobrecargas, entupimentos e perdas de eficiência. Nesse artigo será apresentado uma análise estatística de correlação, baseado em dados reais, para o processo de peneiramento a umidade natural. A correlação foi realizada entre a corrente elétrica (A) do acionamento da peneira com características físicas, químicas e litologia do minério. Com base nos resultados desta correlação, será proposto a utilização desta variável de corrente da peneira para implementar um novo controle regulatório de taxa, em estratégia Override e cascata , para proteger e ajustar o processo dinamicamente, substituindo a intervenção manual da equipe operacional. O trabalho foi realizado em uma usina de beneficiamento de minério de ferro da Vale, em Canaã dos Carajás PA, com objetivo de otimizar performance e reduzir parada operacionais por sobrecargas. Com a implementação do controle proposto houve uma redução de 67\% dos eventos indesejados de paradas por sobrecargas e um aumento no tempo de operação em modo automático de 5,1\%, atingindo 98,5\% do tempo em modo automático do controle de taxa da etapa de peneiramento primário de Serra Sul
Author keywords	Peneiramento Controle Override Análise de correlação Umidade natural
Number	5037
Two-session	no
Session	ZE : Aplicações de Controle 1
Session chairs	not assigned
Date	2023-10-16
Time	14:40
Duration (minutes)	20
Presenter	unknown
Scheduling remarks	

Authors

First name	Last name	Email	Country	Affiliation	Web page	Corresponding	Delete?
Kaike	Albuquerque	kaike.albuquerque@vale.com	Brazil	Vale		yes	
Thiago A. M.	Euzébio	t.melo-euzebio@hzdr.de	Germany	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf		yes	✘
Thomás	Pinto	thomas.pinto@itv.org	Brazil	Instituto Tecnológico Vale		yes	✘
Alexandre	Fonseca	alexnangf@hotmail.com	Brazil	Vale S/A		yes	✘
Rodrigo	Fina	rodrigo.fina@vale.com	Brazil	Vale S/A		yes	✘
Robson	Duarte	robson_a_d@hotmail.com	Brazil	Vale S/A		yes	✘

Figura A.1: Comprovante Submissão Artigo 01
Fonte: Sistema SBAI 2023.



Figura A.2: Certificado SBAI Artigo Peneiramento
 Fonte: SBAI 2023.

Title	Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador override
Authors	Kaïke Albuquerque, Alexandre Filho, Alexandre Fonseca, Robson Duarte, Thiago Euzébio, Thomás Pinto and Karina Marins
Abstract	Na indústria mineral, silos são usados como buffers para armazenar o material e suavizar as variações de taxa de minério transportada entre os processos. O controle de nível destes silos é uma tarefa essencial para manter a continuidade operacional das atividades. Neste trabalho, foi proposto um controlador override para o circuito de britagem terciária da usina de Serra Sul, Vale S.A. O intuito é que a nova estratégia de controle em override melhore a continuidade operacional do circuito por meio do controlador de nível baixo dos silos. Resultados da aplicação prática mostraram uma redução de aproximadamente 83% nas ocorrências de microparadas relacionadas as horas operadas. Essa nova estratégia não comprometeu o nível de câmara dos britadores e resultando em um aumento na eficiência da britagem através da estabilidade de processo.
Author keywords	Britagem Controle override Silos Controle de nível Continuidade operacional
Number	7384
Two-session	no
Session	14A: Aplicações de Controle 2
Session chairs	not assigned
Date	2023-10-17
Time	17:10
Duration (minutes)	20
Presenter	unknown
Scheduling remarks	

Authors

First name	Last name	Email	Country	Affiliation	Web page	Corresponding	Delete?
Kaïke	Albuquerque	kaïke.albuquerque@vale.com	Brazil	Vale S/A / Instituto Tecnológico Vale		yes	
Alexandre	Filho	alexandremstf@gmail.com	Brazil	Instituto Tecnológico Vale		yes	✘
Alexandre	Fonseca	alexnangf@hotmail.com	Brazil	Vale S/A		yes	✘
Robson	Duarte	robson_a_d@hotmail.com	Brazil	Vale S/A		yes	✘
Thiago	Euzébio	t.melo-euzebio@hzdr.de	Brazil	Institute of Fluid Dynamics		yes	✘
Thomás	Pinto	thomas.pinto@itv.org	Brazil	Instituto Tecnológico Vale		yes	✘
Karina	Marins	karine.marins@pq.itv.org	Brazil	Instituto Tecnológico Vale		yes	✘

Figura A.3: Comprovante Submissão Artigo 02
 Fonte: Sistema SBAI 2023.



Figura A.4: Certificado SBAI Artigo Britagem
Fonte: SBAI 2023.