



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDSON DAVI OLIVEIRA DE MELO

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800xA PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL**

TUCURUÍ

2025

EDSON DAVI OLIVEIRA DE MELO

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800xA PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa.

TUCURUÍ

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

O48i OLIVEIRA DE MELO, EDSON DAVI.
IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB
800xA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL /
EDSON DAVI OLIVEIRA DE MELO. — 2025.
32 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2025.

1. Controle da dosagem de cal; flotação de minérios;
proporcional-integral; sistema ABB 800xA. I. Título.

CDD 621.317

EDSON DAVI OLIVEIRA DE MELO

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800xA PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 19/03/2025.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Orientadora - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

**Dra. Priscilla Kadja Pontes de Melo
Carneiro**
Avaliadora Externa - PPGEE/IFPB

TUCURUÍ

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**TÍTULO: IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800xA PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL**

DISCENTE: EDSON DAVI OLIVEIRA DE MELO

MATRÍCULA: 201833940003

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	<i>Prof. Dra. Andrécia Pereira da Costa FEE/CAMTUC/UFPA</i>	Orientador
2	<i>Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira, FEE/CAMTUC/UFPA</i>	Membro
3	<i>Dra. Priscila Kadja Pontes de Melo Carneiro, PPGEE/IFPB</i>	Membro

Data da Defesa: 19/03/2025

Hora Início: 16:00

Hora Término: 17:45

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,5	10	9,5
Linguagem (gramática e semântica)	9,5	10	10
Conteúdo técnico	9,0	10	9,0

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	10	9,0	9,0
Administração do tempo	10	9,0	9,0
Expressão oral	9,5	9,0	8,0
Domínio do tema	9,0	8,0	8,5

Média por examinador	9,57	9,29	9,0
Média Final	9,26		
Conceito Final	EXCELENTE		

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRECIA PEREIRA DA COSTA
Data: 19/03/2025 17:55:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tucuruí-PA, 19/03/2025.

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br DAVI CARVALHO MOREIRA
Data: 19/03/2025 18:08:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br PRISCILLA KADJA PONTES DE MELO CARNEIRO
Data: 19/03/2025 17:58:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro

Membro

Dedico este trabalho ao meu pai, José Edson, e à minha mãe, Macileia Melo, que, sob muito sol, me fizeram chegar até aqui pela sombra. Dedico também a todas as pessoas cujos sonhos foram interrompidos pela falta de acesso à educação, um direito que deveria ser de todos. A única diferença entre o meu caminho e o delas foi a oportunidade. Que este trabalho seja uma homenagem a essas vozes silenciadas, com a esperança de um futuro em que a educação seja, de fato, o caminho para transformar vidas e construir um mundo mais justo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de minha força, perseverança e esperança, por me sustentar nos momentos de incerteza e me conceder saúde e coragem para seguir em frente.

Manifesto minha gratidão aos meus pais, José Edson e Macileia, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais em cada etapa da minha vida. Sou imensamente grato pelos sacrifícios que fizeram para me proporcionar uma educação de qualidade, abrindo mão de tantas coisas para investir no meu futuro. Mãe, obrigado por cada madrugada acordada para me levar à Escola Cantinho do Saber, enfrentando a distância da nossa zona rural até a cidade para que eu tivesse sempre o melhor ensino. Seu esforço, dedicação e amor foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Pai, sou grato por cada conselho, cada palavra de motivação e pela sua incansável batalha para me dar as melhores oportunidades. Sem o esforço e o amor de vocês, nada disso teria sido possível. Tudo o que conquistei também é mérito de vocês, e minha gratidão será eterna.

Externo meu agradecimento à minha querida vó Maria do Bento, que sempre foi como uma segunda mãe para mim, me acolhendo com tanto amor e carinho. Lembro com emoção das vezes em que, ao me preparar para voltar a Tucuruí para as aulas, você chegava com a mão fechada, me entregava dinheiro e dizia: "Toma, meu filho, cuide-se e vá com Deus." Seu apoio e cuidado constantes foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Esta vitória também é sua, vó. Ao meu avô Bento, reitero meu agradecimento por tudo o que fez por mim ao longo dos anos.

Agradeço também aos meus padrinhos, tios, tias, primos e à minha irmã Sophia Melo por todo o apoio, carinho e incentivo. Sem vocês, essa conquista não teria sido possível. Meu coração transborda de gratidão por cada um de vocês.

Quero prestar uma homenagem especial ao meu querido amigo, primo e irmão Gilmar Douglas, que já não está mais entre nós. Lembro com carinho do dia em que passei no vestibular e você foi o primeiro a raspar minha cabeça, comemorando minha conquista como se fosse sua também. Sua motivação e apoio sempre foram essenciais para mim, e sei que, aí do céu, você está feliz por tudo que tem acontecido na minha vida. "*Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.*" (1 Tessalonicenses 5:18). Esse versículo, que você tanto amava, representa a gratidão que levo no coração por tudo o que fez por mim. Douglas, você sempre será lembrado com carinho e saudade. Essa vitória também é sua!

Aos meus professores, transmito meus sinceros agradecimentos pelo compartilhamento de conhecimento ao longo da minha jornada acadêmica. Cada ensinamento,

incentivo e palavra de apoio foram essenciais para minha formação, tornando esse caminho mais enriquecedor e significativo. Em especial, à minha orientadora, Dra. Andrécia Costa, meu eterno reconhecimento por sua sabedoria, competência e paciência. Sua dedicação foi fundamental para a realização deste sonho, e levarei comigo, para sempre, os valiosos aprendizados que me proporcionou.

Aos meus amigos de graduação, Matheus Gama, Wallas Ximenes, Cascio Batista, Francisco Félix, Victor Gaspar, Daniel Aviz, Kevin Martins, Alessandro Araújo, Felipe Vasconcelos, Mateus Dias e tantos outros, deixo aqui minha gratidão pelo apoio mútuo, pelas trocas de experiências e pelas palavras de incentivo que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora. Em especial, agradeço a Matheus Gama e Wallas Ximenes pela amizade, companheirismo e pelas palavras de motivação, que foram fundamentais ao longo desse caminho.

Aos amigos que tive a alegria de conhecer durante meu período de estágio na Vale S.A, o Diego Dolla, Débora Chaves, Ana Paula, Suzana Soares, Rubens Júnior, João Paulo, Francielle Giese, Bernardo Poeiras, Clebson Romano e Thiago Bomjardim, minha mais sincera gratidão. Cada conhecimento compartilhado, cada conselho e cada momento de aprendizado ao lado de vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico, profissional e pes.soal. Levo comigo não apenas as valiosas lições que aprendi, mas também a amizade de cada um de vocês.

Agradeço de coração à minha namorada, Paula Lima, pelo apoio, pelas palavras de motivação e por me incentivar a concluir este trabalho. Seu incentivo fez toda a diferença nessa jornada.

Registro meu agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

"Em tudo dai graças."
(1 Tessalonicenses 5:18).

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado o relatório de estágio supervisionado, desenvolvido durante o período de 04/10/2023 a 01/07/2024, sob orientação do Engenheiro de Automação da empresa Valle S.A Diego Rodrigo Dolla supervisor de estágio. Este trabalho foi elaborado seguindo a resolução nº1/2024 da Faculdade de Engenharia Elétrica - CAMTUC, que regulamenta os termos da flexibilização do Trabalho de Conclusão de Curso na IN nº5/2023 da PROEG - UFPA, sob orientação da professora Andrécia Pereira da Costa. O estágio foi realizado na Coordenação de Automação Salobo da Empresa Valle S.A, na cidade Parauapebas/PA. Foi investigado a implementação do controlador Proporcional-Integral (PI) no sistema *Asea Brown Boveri* (ABB) 800xA para o controle da dosagem de cal na flotação de minérios. O objetivo principal foi avaliar os impactos dessa automação na estabilidade do pH da polpa mineral, eficiência operacional e consumo de reagentes. Para isso, realizou-se um estudo de caso em uma planta de beneficiamento de cobre, na qual, foram analisados dados operacionais antes e depois da implementação do sistema automatizado. Os resultados indicaram uma redução significativa das oscilações no pH, garantindo maior previsibilidade e controle do processo, além de otimizar o uso de cal e melhorar a seletividade da flotação. A integração do controlador PI com sensores industriais e comunicação via protocolo *Manufacturing Message Specification* (MMS) permitiu ajustes dinâmicos na dosagem do reagente, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e aumentando a confiabilidade do sistema. Logo, a automação da dosagem de cal não apenas aprimora a estabilidade do processo, mas também contribui para a sustentabilidade e a segurança operacional da planta, demonstrando a relevância da aplicação de tecnologias avançadas na mineração.

Palavras-chave: Controle da dosagem de cal; flotação de minérios; proporcional-integral; sistema ABB 800xA.

ABSTRACT

In this work, the supervised internship report is presented, developed during the period from 10/04/2023 to 07/01/2024, under the guidance of the Automation Engineer of the company Vale S.A, Diego Rodrigo Dolla, internship supervisor. This work was prepared following Resolution No. 1/2024 of the Faculty of Electrical Engineering - CAMTUC, which regulates the terms of the flexibilization of the Course Completion Work in IN No. 5/2023 of PROEG - UFPA, under the guidance of Professor Andrécia Pereira da Costa. The internship was carried out at the Salobo Automation Coordination of Vale S.A, in the city of Parauapebas/PA. The study investigated the implementation of the Proportional-Integral (PI) controller in the Asea Brown Boveri (ABB) 800xA system for lime dosage control in ore flotation. The main objective was to evaluate the impacts of this automation on the stability of the mineral pulp pH, operational efficiency, and reagent consumption. For this purpose, a case study was conducted in a copper beneficiation plant, where operational data were analyzed before and after the implementation of the automated system. The results indicated a significant reduction in pH oscillations, ensuring greater predictability and process control, as well as optimizing lime usage and improving flotation selectivity. The integration of the PI controller with industrial sensors and communication via the Manufacturing Message Specification (MMS) protocol enabled dynamic adjustments in reagent dosage, reducing the need for manual interventions and increasing system reliability. Thus, lime dosage automation not only enhances process stability but also contributes to the sustainability and operational safety of the plant, demonstrating the relevance of applying advanced technologies in mining.

Keywords: *Lime dosing control; mineral flotation; proportional-integral; ABB 800xA system.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de preparação e dosagem de cal na flotação	21
Figura 2 – Malha de controle do sistema de dosagem de cal na flotação	22
Figura 3 – Sensor de pH do modelo <i>Liquiline M CM42</i> da <i>Endress+Hauser</i> : (a) pH 7,91; (b) pH 9,22	22
Figura 4 – Inversor de Frequência: (a) Parte externa; (b) Parte interna com detalhes do inversor	23
Figura 5 – CLPs do sistema ABB 800xA: (a) Detalhes do conjunto dos CLPs; (b) Detalhe do sistema ABB 800xA	24
Figura 6 – Interface do sistema controlador PI	24
Figura 7 – Lógica da média	25
Figura 8 – Tendência (<i>Trend</i>) do PI	26
Figura 9 – Comparação da estabilidade do pH antes e depois da implementação do controle PI: (a) Alta variabilidade no pH da polpa mineral; (b) Relação expressa nas flutuações do pH	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri, Multinacional Suíço-Sueca de Tecnologia e Automação Industrial</i>
APC	<i>Advanced Process Control, Controle Avançado de Processos</i>
CAMTUC	<i>Campus Universitário de Tucuruí</i>
CPG	<i>Controle Preditivo Generalizado</i>
CVRD	<i>Companhia Vale do Rio Doce</i>
CLPs	<i>Controladores Lógicos Programáveis</i>
FEE	<i>Faculdade de Engenharia Elétrica</i>
GS	<i>Gain Schedule, Ajuste Variável de Ganho</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission, Comissão Eletrotécnica Internacional</i>
ISE	<i>Integral of Squared Error, Integral do Erro ao Quadrado</i>
MPC	<i>Controle Preditivo Multimodelos</i>
MMS	<i>Manufacturing Message Specification, Especificação de Mensagem de Fabricação</i>
PI	<i>Proporcional-Integral</i>
PID	<i>Controlador Proporcional Integral Derivativo</i>
PROEG	<i>Pró-Reitoria de Ensino de Graduação</i>
PROFINET	<i>Process Field Network, Rede de Campo de Processos</i>
RAFs	<i>Relatórios de Análise de Falhas</i>
TCC	<i>Trabalho de Conclusão de Curso</i>
UFPA	<i>Universidade Federal do Pará</i>
VFD	<i>Variable Frequency Drive, Inversor de Frequência Variável</i>

SUMÁRIO

1	TEXTO DE APRESENTAÇÃO	14
	ANEXO A – IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800XA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL	16
A.1	Apresentação da Empresa Vale S.A	16
A.2	Atividades Realizadas	17
A.3	Resultados	25
A.4	Considerações Finais	28
	Referências	30

1 TEXTO DE APRESENTAÇÃO

Este relatório de estágio, descreve as atividades realizadas na Coordenação de Automação Salobo da Empresa Vale S.A, na cidade Parauapebas/PA, durante o período de nove meses, de 04/10/2023 a 01/07/2024, com carga horária semanal de 30 horas.

O objetivo deste trabalho é documentar as atividades realizadas durante o estágio, a partir da investigação aplicada a automação industrial no processo de dosagem de cal na flotação de uma usina de cobre da Vale S.A, destacando os impactos utilização do sistema *Asea Brown Boveri* (ABB) (Multinacional Suíço-Sueca de Tecnologia e Automação Industrial) 800xA e do controlador Proporcional-Integral (PI) na eficiência operacional, estabilidade do pH e otimização do consumo de reagentes.

A motivação para a realização deste trabalho surgiu da necessidade de aprimorar o controle de pH na flotação, visando reduzir interferências operacionais e otimizar a dosagem de cal. Além do impacto técnico-industrial, este estudo está alinhado com as exigências do setor mineral por processos mais sustentáveis e eficientes.

Durante o estágio, o discente teve a oportunidade de desenvolver diversas habilidades na coordenação de automação, atuando junto à equipe de projeto, supervisão e controle. Essa experiência proporcionou uma compreensão detalhada do funcionamento do processo de mineração. No dia a dia, o discente participou de reuniões do Diálogo Diário de Saúde, Segurança e Meio Ambiente da Vale (DSSMAC), bem como de reuniões de acompanhamento das demandas da equipe. Além disso, integrou agendas participativas e participou de treinamentos promovidos pela ABB, ampliando seu conhecimento técnico e prático na área.

Essa experiência foi fundamental para a compreensão da estrutura operacional das redes industriais, permitindo também o acompanhamento de diversas atividades realizadas pela equipe. Dentre essas atividades, destacam-se o gerenciamento das redes *Profibus*, Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*, IEC), *Modbus* e *Foundation Fieldbus*, bem como das redes de controle, tanto primária quanto secundária. Com isso, foi possível ampliar o conhecimento sobre a integração e o funcionamento dessas redes, aspecto essencial para a compreensão dos processos industriais. Essa vivência contribuiu significativamente para a formação técnica e profissional do discente, agregando valor ao seu desenvolvimento acadêmico e prático.

Entre as principais dificuldades encontradas, destacam-se: adaptação ao ambiente corporativo – dificuldades para se acostumar com a cultura organizacional, hierarquia, normas e políticas da empresa; Falta de experiência prática – a transição da teoria aprendida na universidade para a prática no ambiente de trabalho foi desafiador; Expectativas versus

realidade – criou-se expectativas diferentes sobre as atividades desempenhadas e sentimento de frustração com as tarefas menos estratégicas e mais operacionais; Dificuldade com processos internos – a Vale S.A possui processos complexos e específicos, o que gerou confusão no início do estágio; Uso de ferramentas e *softwares* – foi necessário aprender a utilizar sistemas internos e *softwares* específicos que não foram abordados no curso de graduação e por fim, sentimento de insegurança – a falta de confiança nas próprias habilidades, impactando no desempenho e gerando medo de cometer erros.

O trabalho em questão foi apresentado como parte integrante do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), por meio de uma estratégia de flexibilização, definida pela RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 01/2024/FEE, de 12 de abril de 2024, que trata da flexibilização da atividade curricular de TCC por meio da INSTRUÇÃO NORMATIVA N° 05/2023 - Pró-Reitoria de Ensino de Graduação (PROEG)/Universidade Federal do Pará (UFPA), de 21 de dezembro de 2023, a utilização deste trabalho com o objetivo proposto, tem aprovação do colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC) da UFPA como declarado na ATA DE REUNIÃO ORDINÁRIA N° 02/2025/FEE, de 19 de fevereiro de 2025.

ANEXO A – IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PI NO SISTEMA ABB 800xA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MINERAL

A.1 Apresentação da Empresa Vale S.A

Fundada em 1º de junho de 1942, em Minas Gerais, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) surgiu como uma estatal focada na extração de minério de ferro. Desde seus primeiros anos, a empresa desempenhou um papel significativo no desenvolvimento econômico do Brasil. Com o tempo, ampliou suas atividades, incorporando a extração de outros minerais, como níquel, cobre e carvão, além de investir em áreas estratégicas, como logística, energia e siderurgia (FILADELPHO, 2024); (VALE, 2024).

A privatização, realizada em 1997, marcou um novo capítulo para a companhia, consolidando-a como uma das maiores mineradoras globais. Atualmente, a Vale S.A é referência mundial na exportação de minério de ferro e pelotas, matérias-primas essenciais para o setor siderúrgico. Comprometida com práticas responsáveis, a empresa foca em inovação, sustentabilidade e segurança, além de contribuir para o progresso das comunidades onde está presente, reafirmando sua relevância econômica e social, (VALE, 2024).

Conforme informações obtidas na empresa Vale S.A, a coordenação de automação é um setor estratégico, responsável por garantir a eficiência e a confiabilidade dos processos industriais por meio de tecnologias avançadas, como o sistema ABB 800xA, Controle Avançado de Processos (*Advanced Process Control - APC*), instrumentação inteligente e algoritmos de otimização aplicados ao controle de dosagem na flotação. As principais funções desempenhadas neste setor incluem:

- Desenvolvimento de estratégias de manutenção para otimizar a confiabilidade dos sistemas industriais.
- Planejamento e execução de manutenção preventiva e corretiva, visando reduzir falhas e otimizar a performance operacional.
- Análise de Relatórios de Análise de Falhas (RAFs), identificando causas e implementando soluções definitivas.
- Melhoria contínua dos processos, buscando maior eficiência, segurança e estabilidade operacional.
- Gerenciamento da rede industrial, incluindo protocolos como: *Profibus*, *IEC*, *Modbus*, *Foundation Fieldbus*, Rede Controle e Rede Cliente-Servidor.
- Administração de servidores industriais, realizando atualizações (*upgrades*) e otimizações para garantir maior confiabilidade e desempenho da planta.

A atuação da coordenação de automação mantém a eficiência dos processos produtivos, assegurando que a planta opere de forma segura, sustentável e alinhada às melhores práticas da indústria mineral (VALE, 2024).

A.2 Atividades Realizadas

A experiência adquirida durante o desenvolvimento deste estágio proporcionou uma compreensão aprofundada da aplicação do sistema ABB 800xA na supervisão e no controle em tempo real, abrangendo desde a coleta de dados até a tomada de decisões operacionais. Além disso, a participação ativa no setor de automação industrial permitiu observar como essa tecnologia contribui para a eficiência, segurança e continuidade das operações, além de otimizar os resultados da planta. Ao longo do período de atuação, foram realizadas participações em reuniões técnicas e operacionais, nas quais foram discutidas estratégias de melhoria, análise de desempenho e resolução de problemas dos sistemas. Essas interações foram essenciais para compreender os desafios enfrentados na planta e para a elaboração de soluções técnicas viáveis.

Entre as atividades realizadas, destaca-se o acompanhamento das inspeções das lógicas dos *switches* no *datacenter*, com o uso das ferramentas *HiVision* e *HiView*. Além disso, foram desenvolvidas outras atividades, como a atualização das planilhas de forças do sistema ABB 800xA e a assinatura de instrumentos no sistema. Também foi possível acompanhar o monitoramento das redes junto à equipe de redes da automação, utilizando a ferramenta *Zabbix*.

O sistema ABB 800xA é uma plataforma avançada de automação que integra controle de processos, gerenciamento de ativos, segurança operacional e análise de dados em uma interface única. Sua arquitetura modular e altamente flexível permite a integração com diferentes protocolos industriais, como Especificação de Mensagem de Fabricação, (*Manufacturing Message Specification* - MMS), *Modbus* e Rede de Campo de Processos (*Process Field Network* - PROFINET), garantindo compatibilidade com sensores, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e sistemas supervisórios de diversos fabricantes, (SILVA; BRANQUINHO, 2019).

A capacidade de comunicação e integração viabiliza um controle mais preciso dos processos industriais, reduzindo variabilidades operacionais e otimizando a eficiência das operações (MARTINS, 2023).

Na mineração, o sistema ABB 800xA se torna uma ferramenta estratégica no monitoramento contínuo de variáveis críticas, como o pH da polpa na flotação, ajustando automaticamente a dosagem de reagentes para manter condições químicas ideais ao longo do processo. Essa automação minimiza oscilações que poderiam comprometer a recuperação mineral, promovendo uma separação mais eficiente dos minérios de interesse (SILVA;

BRANQUINHO, 2019).

Além disso, o sistema contribui para a melhoria da eficiência energética, evitando desperdícios e otimizando o uso de insumos químicos, tornando o processo mais sustentável e economicamente viável (ALBUQUERQUE et al., 2023).

A interface do sistema ABB 800xA permite a análise simultânea de dados em tempo real e históricos, facilitando a tomada de decisões operacionais baseadas em informações precisas e reduzindo a necessidade de intervenções manuais (PINTO et al., 2022). O contato direto com a interface do sistema ABB 800xA foi uma experiência essencial durante a fase de estágio, proporcionando uma compreensão aprofundada de sua aplicação na automação industrial. Ao longo do período de aprendizado, foi possível entender o funcionamento técnico desse sistema, assim como sua importância no gerenciamento e controle do processo produtivo, garantindo maior eficiência e confiabilidade operacional.

A interação com a ferramenta do sistema ABB 800xA proporcionou uma visão abrangente de todo o fluxo operacional da planta, desde a coleta e análise de dados em tempo real até a tomada de decisões automatizadas. Essa experiência evidenciou como a automação contribui para a estabilidade dos processos, a segurança operacional e a otimização de desempenho, além de minimizar variações indesejadas no sistema de mineração. O conhecimento adquirido sobre essa tecnologia é um diferencial na formação profissional, ampliando a compreensão da automação industrial, da integração de sistemas e do controle de processos.

No contexto da flotação, o sistema ABB 800xA processa informações provenientes de sensores de pH, vazão e dosagem de cal, utilizando algoritmos avançados para realizar ajustes dinâmicos e estabilizar o processo. Com isso, evita-se a subdosagem ou superdosagem de reagentes, garantindo maior seletividade na separação mineral e melhorando a qualidade do concentrado final (VOLPATO et al., 2020).

A flotação é um dos processos mais empregados na mineração para a separação seletiva de minerais valiosos a partir de minérios de baixa concentração. Baseia-se nas diferenças nas propriedades físico-químicas das superfícies das partículas minerais, permitindo a separação de minerais hidrofóbicos (que repelem a água) de minerais hidrofílicos (que se misturam à água) (CARNEIRO et al., 2021). Os benefícios diretos da implementação do sistema ABB 800xA incluem a redução de falhas operacionais, a minimização de variações no pH e a otimização do consumo de reagentes, o que impacta positivamente na redução de custos operacionais e na sustentabilidade do processo da mineração. Além disso, a análise contínua de dados permite a identificação precoce de anomalias, possibilitando intervenções corretivas antes que ocorram falhas que comprometam a produtividade da planta (SILVA; BRANQUINHO, 2019).

O princípio fundamental da flotação envolve a adesão seletiva de bolhas de ar às

partículas hidrofóbicas, fazendo com que essas partículas ascendam à superfície da célula de flotação, onde formam uma espuma que pode ser coletada (FERREIRA; CABRAL, 2023). Já os minerais hidrofílicos permanecem na polpa e são descartados como rejeito. Esse processo é amplamente utilizado na concentração de minérios metálicos, como cobre, zinco, chumbo, níquel e ouro, além de alguns minérios industriais, como fosfato e carvão (VOLPATO et al., 2020).

A flotação é essencial na mineração devido à sua capacidade de aumentar a recuperação mineral, permitindo a concentração eficiente de minérios de baixo teor e tornando economicamente viável a exploração de depósitos menos ricos (LIMA, 2023). Além disso, a flotação contribui para a redução do impacto ambiental ao maximizar o aproveitamento dos recursos e minimizar o volume de rejeitos gerados, promovendo uma operação mais sustentável (MARCHESAN et al., 2022).

Outro aspecto fundamental da flotação é sua seletividade, que possibilita a separação de diferentes minerais em etapas sucessivas do processo, aumentando a eficiência na obtenção dos produtos desejados e melhorando a qualidade do concentrado final (VOLPATO et al., 2020).

O sucesso da flotação depende de uma série de variáveis que influenciam a estabilidade das bolhas, a adsorção dos reagentes e a eficiência da separação. Portanto, o controle dessas variáveis é crucial para maximizar a recuperação e a qualidade do concentrado mineral (LIMA, 2023).

Diante da complexidade dos fatores que influenciam a eficiência da flotação, é fundamental adotar estratégias de controle automatizado para garantir a estabilidade do processo e a otimização dos parâmetros operacionais (FERREIRA; CABRAL, 2023). Nesse contexto, a implementação de controladores automáticos, como o controlador PI, se torna uma solução eficaz, pois permite ajustes contínuos e dinâmicos na adição de cal. Isso reduz a necessidade de intervenções manuais, garantindo maior previsibilidade e eficiência no controle químico da flotação.

Além das atividades desempenhadas no setor de automação, houve a oportunidade de contribuir diretamente para o desenvolvimento de uma proposta de melhoria no processo de dosagem de cal na flotação, um dos estágios críticos na mineração. A solução proposta consistiu na implementação de um controlador Proporcional-Integral (PI), programado no sistema ABB 800xA, com o objetivo de aprimorar o controle da dosagem de cal, um reagente essencial para o ajuste do pH da polpa mineral.

Durante as etapas iniciais do projeto, foram realizadas reuniões com engenheiros de automação, técnicos de manutenção e operadores da planta, a fim de coletar informações sobre as dificuldades do controle manual e os impactos das variações de pH na recuperação mineral.

Com base nas demandas identificadas, o projeto foi estruturado para garantir maior precisão e estabilidade na dosagem de cal. Para isso, foram implementados dois sensores de pH instalados em pontos estratégicos do processo de mineração. Esses sensores foram escolhidos devido à necessidade de monitorar de forma contínua o nível de acidez do processo de flotação, o que é fundamental para ajustar a dosagem de cal de forma eficaz. As medições obtidas pelos sensores passaram a ser processadas continuamente pelo sistema ABB 800xA, permitindo um controle mais preciso e confiável, resultando em uma operação mais eficiente e na redução de falhas no processo de flotação.

A média dos valores coletados serviu como referência para a ação do controlador PI, que ajustava dinamicamente a velocidade da bomba dosadora. Esse controle era realizado por meio de um Inversor de Frequência Variável (*Variable Frequency Drive* - VFD), permitindo que a dosagem de cal fosse ajustada em tempo real conforme as condições operacionais, garantindo estabilidade química e eficiência no processo de flotação.

Além da programação do controlador PI, o projeto exigiu a integração de dois CLPs utilizando o protocolo de comunicação MMS no ambiente do sistema ABB 800xA. A utilização de dois CLPs foi necessária devido à complexidade e à necessidade de redundância no processo. Com dois CLPs, foi possível dividir a carga de trabalho, garantindo maior confiabilidade e desempenho no sistema de controle da flotação. Esse arranjo também ofereceu maior flexibilidade e segurança, permitindo que, em caso de falha de um CLP, o outro assumisse suas funções sem comprometer a continuidade do processo de flotação. O protocolo MMS foi essencial para viabilizar a troca de informações em tempo real entre os dispositivos, garantindo a sincronização e o funcionamento integrado do sistema de controle.

A implementação da solução foi acompanhada por testes operacionais e reuniões de validação, durante as quais os resultados preliminares foram analisados, os parâmetros do controlador ajustados e o *feedback* da equipe de operação coletado, com a participação da equipe de infraestrutura de redes industriais na configuração e teste da comunicação entre os CLPs e o sistema supervisão.

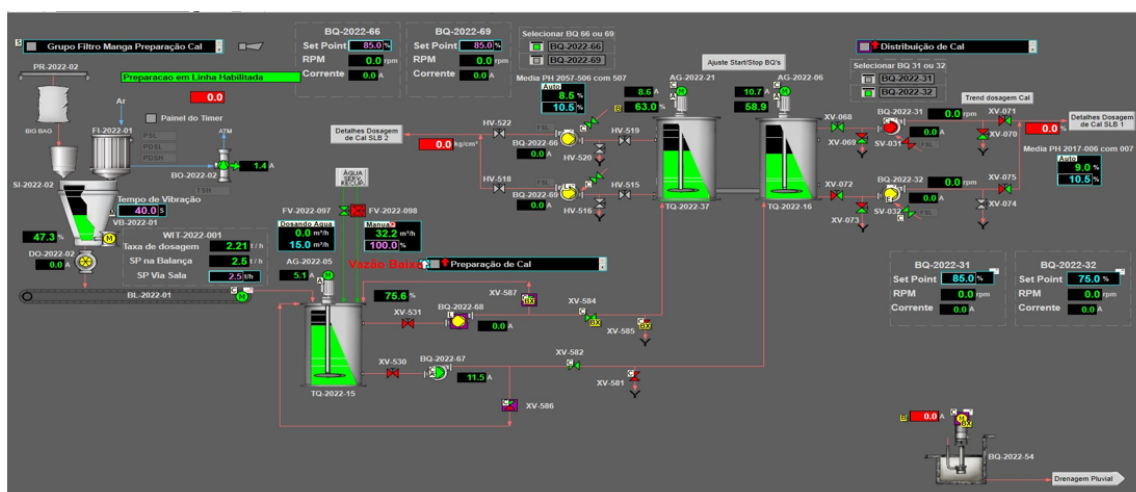
A interface gráfica de monitoramento exibida permite o acompanhamento em tempo real das variáveis operacionais, incluindo níveis dos tanques de preparação e distribuição de cal, vazões, *setpoints* e estados dos equipamentos, conforme ilustrado na figura 1. O sistema ABB 800xA assegura que a dosagem de cal ocorra de forma precisa e automatizada, ajustando sua adição conforme a necessidade do processo, evitando desperdícios e oscilações no pH que possam comprometer a eficiência da flotação.

No decorrer do estágio, o aprendizado prático sobre o sistema ABB 800xA foi de extrema importância, pois permitiu não apenas compreender seu funcionamento técnico, mas também sua relevância no gerenciamento e controle do processo produtivo.

Através do uso do sistema ABB 800xA, foi possível entender com mais profundidade todo o processo da planta, desde a coleta e análise de dados em tempo real até a tomada de decisões operacionais. Essa experiência foi fundamental para compreender como o sistema contribui para a eficiência, segurança e continuidade das operações, além de otimizar os resultados da planta.

O principal objetivo da melhoria no processo de dosagem de cal na flotação foi garantir um controle mais preciso e eficiente da dosagem de cal, um reagente essencial para o ajuste do pH no processo de flotação. Para isso, foram utilizados dois sensores de pH, instalados em pontos estratégicos desse processo. Os valores coletados eram processados, e a média das leituras servia como referência para a ação do controlador PI. Esse controlador, por sua vez, ajustava a velocidade de uma bomba dosadora, controlada por um VFD, garantindo que a dosagem fosse adequadamente ajustada às condições de operação.

Figura 1 – Sistema de preparação e dosagem de cal na flotação



Fonte: Autoria própria (2024)

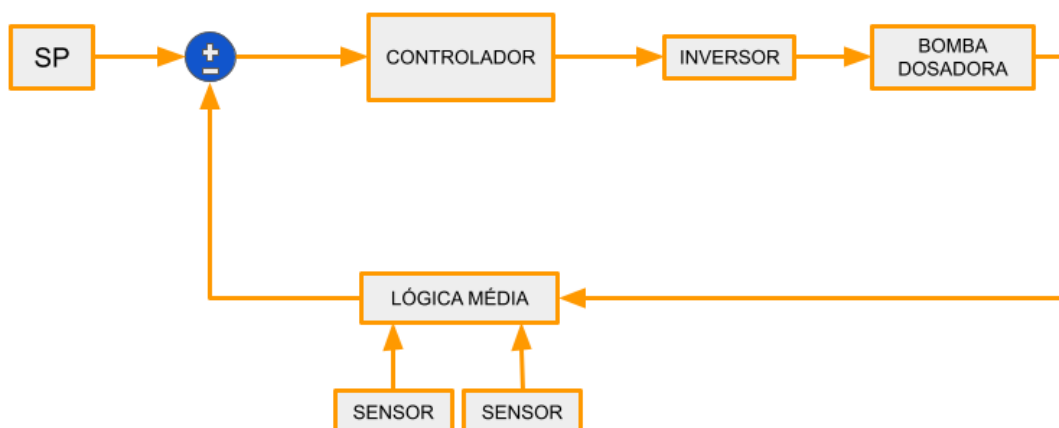
A automação do sistema ABB 800xA, por meio de sensores e controladores, permite uma resposta dinâmica às variações do processo, garantindo maior estabilidade operacional e otimizando o consumo de reagentes. Isso resulta em uma maior recuperação mineral e na redução dos impactos ambientais.

O diagrama da figura 2 ilustra a arquitetura de controle do sistema de dosagem de cal na flotação, destacando a integração entre sensores, o processamento de dados e a atuação sobre o processo da dosagem de cal na flotação.

Nesta malha de controle, dois sensores instalados no campo realizam medições da variável de processo em tempo real. Os dados obtidos por esses sensores são enviados para uma lógica que calcula a média das leituras, gerando um único valor que representa o comportamento do sistema de forma mais precisa. Esse valor médio é então comparado com o *setpoint*, que define o parâmetro ideal para o processo da dosagem de cal na flotação.

A diferença entre o valor médio obtido e o setpoint é utilizada para gerar um sinal de erro, que é processado pelo controlador PI. Este controlador avalia o erro e determina a ação necessária para corrigir qualquer desvio identificado, promovendo o ajuste adequado do processo. A saída do controlador é utilizada para regular o VFD, que controla a taxa de dosagem de cal.

Figura 2 – Malha de controle do sistema de dosagem de cal na flotação



Fonte: Autoria própria (2024)

As figuras 3(a) e 3(b) exibem um sensor de pH do modelo *Liquiline M CM42* da *Endress+Hauser*, utilizado para medição contínua do pH no campo, com valores de pH 7,91 e 9,22. Esse sensor permite medir o nível de acidez ou alcalinidade da mistura de minerais e água, conhecida como polpa. A tecnologia do sensor converte essa medida em um valor de pH, que indica se a polpa está ácida, neutra ou alcalina.

Figura 3 – Sensor de pH do modelo *Liquiline M CM42* da *Endress+Hauser*: (a) pH 7,91; (b) pH 9,22

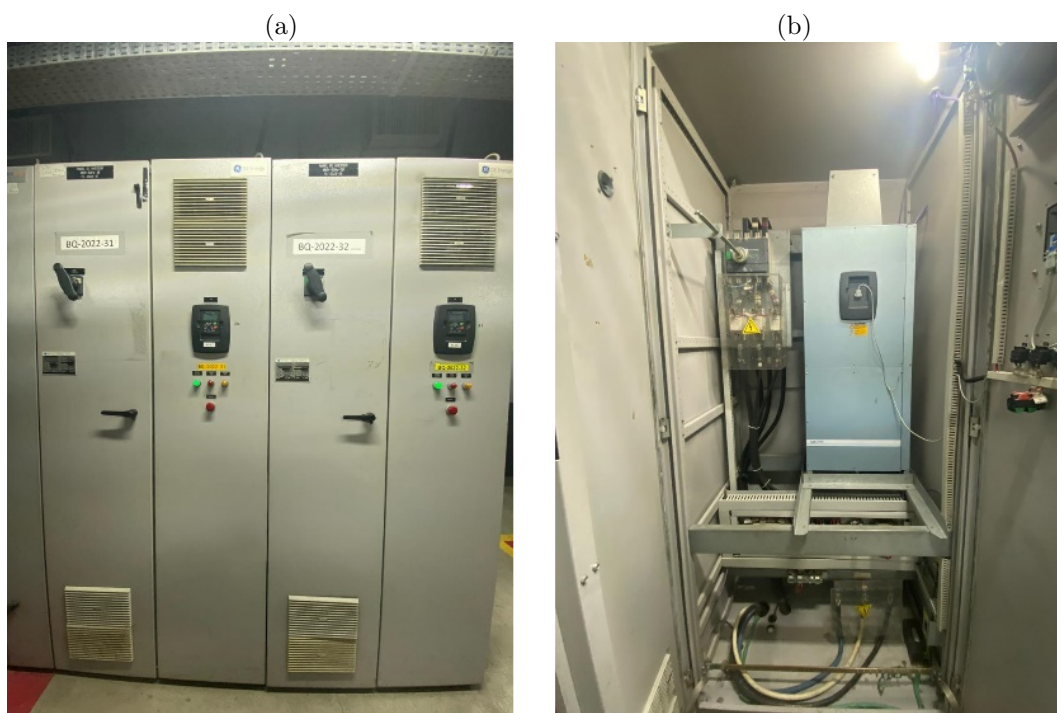


Fonte: Autoria própria (2024)

Os valores obtidos por esse sensor são transmitidos ao sistema de automação, onde

são processados e utilizados para ajustar dinamicamente a dosagem de cal, garantindo a estabilidade do pH no processo de flotação e otimizando a eficiência da separação mineral. Os painéis de inversores de frequência, responsáveis pelo controle da velocidade das bombas dosadoras de cal são mostrados nas figuras 4(a) e 4(b).

Figura 4 – Inversor de Frequência: (a) Parte externa; (b) Parte interna com detalhes do inversor



Fonte: Autoria própria (2024)

Esses dispositivos recebem o sinal do controlador, que define a velocidade necessária para a bomba, ajustando a frequência e a tensão fornecidas ao motor da bomba. Isso permite controlar com precisão a dosagem de cal, conforme as exigências do processo de flotação e o pH desejado.

As figuras 5(a) e 5(b) apresentam os CLPs do sistema ABB 800xA, utilizados na automação do processo de dosagem de cal na flotação. O CLP recebe informações do campo, processa esses dados conforme a lógica programada e envia comandos para os atuadores, como bombas e válvulas. No processo de flotação, o CLP garante que a dosagem de cal seja ajustada de maneira adequada, mantendo o pH dentro dos parâmetros desejados.

Foi configurada a comunicação pelo protocolo de comunicação MMS entre dois CLPs para transferir os dados de um instrumento para o outro, permitindo que o controlador responsável pela dosagem de cal ajuste a rotação da bomba conforme necessário. Facilitando a integração do sistema e garante um controle preciso da dosagem de cal.

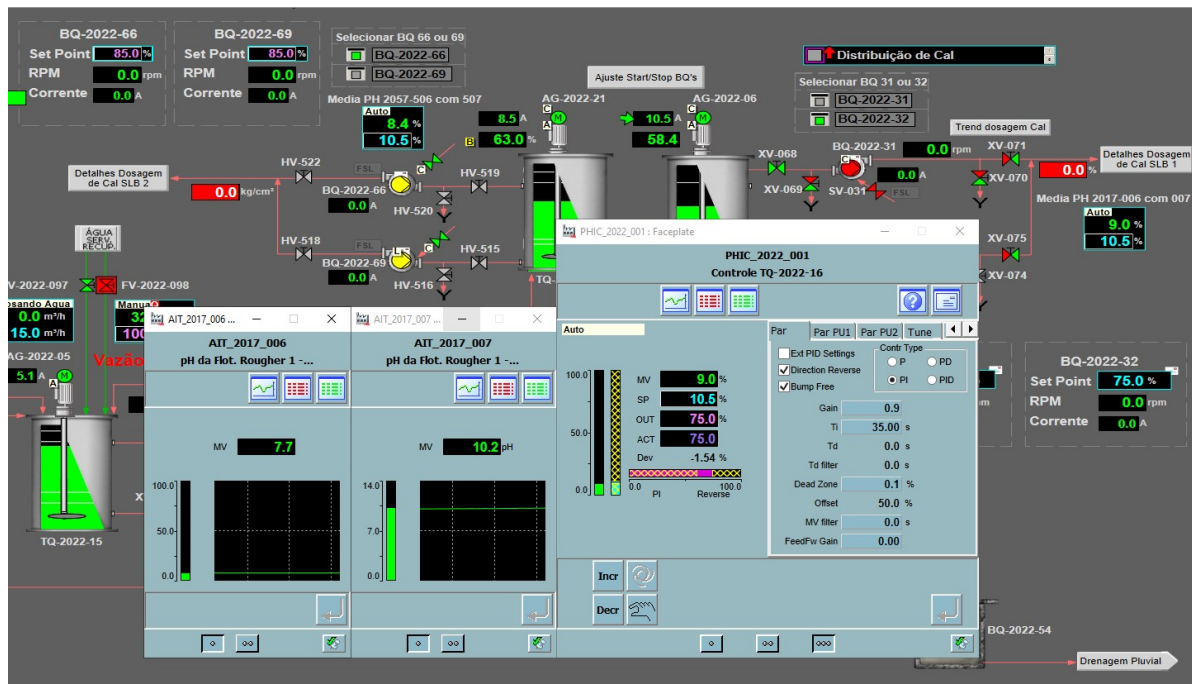
Figura 5 – CLPs do sistema ABB 800xA: (a) Detalhes do conjunto dos CLPs; (b) Detalhe do sistema ABB 800xA



Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 6 ilustra a aplicação do controlador PI no sistema ABB 800xA, detalhando como os sinais são processados para garantir maior estabilidade no processo de flotação.

Figura 6 – Interface do sistema controlador PI



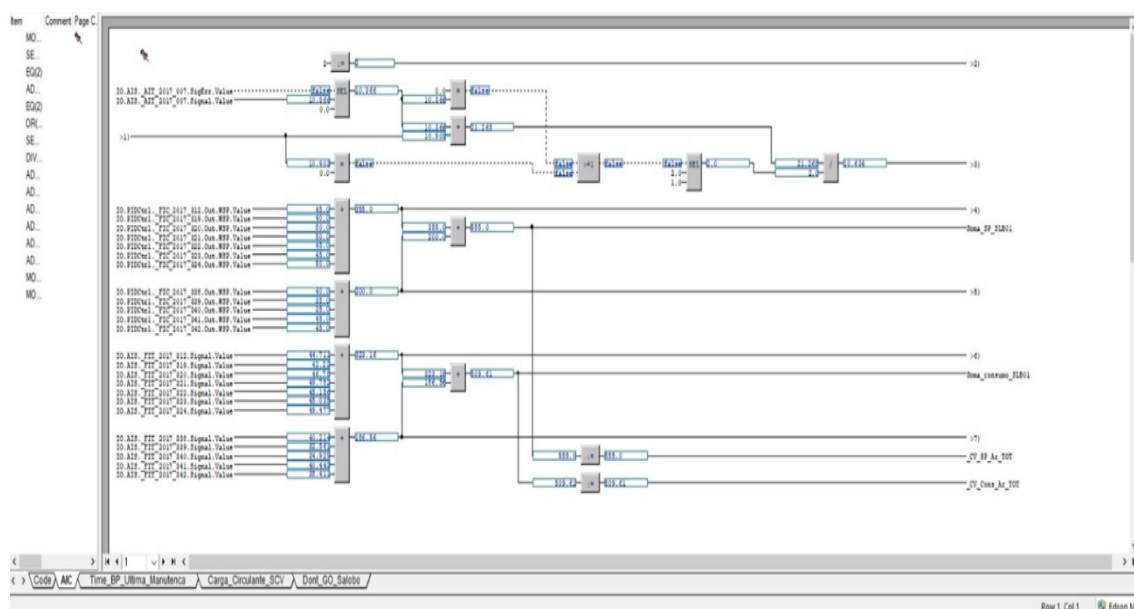
Fonte: Autoria própria (2024)

O funcionamento do controlador PI é apresentado na figura 6, destacando a contribuição das ações proporcional (P) e integral (I) no ajuste da dosagem de cal. A ação proporcional responde diretamente ao erro entre o *setpoint* (valor desejado de pH) e a leitura dos sensores, gerando um sinal de controle proporcional à discrepância observada. Já a ação integral corrige desvios persistentes ao longo do tempo, garantindo que o sistema

atinja e mantenha o *setpoint*, mesmo diante de variações no processo. Com essa abordagem, o controle automatizado reduz oscilações indesejadas, melhora a eficiência da flotação e otimiza o consumo de reagentes, tornando a operação mais estável e sustentável. Antes da implementação do controlador PI, a dosagem de cal no processo de flotação era realizada de forma menos precisa, resultando em variações significativas no pH da polpa mineral. Para aprimorar esse controle, foi desenvolvido um sistema baseado em *feedback*, no qual a dosagem de cal é ajustada automaticamente de acordo com as medições realizadas pelos sensores de pH.

A figura 7 exibe a lógica de programação do controlador PI no sistema ABB 800xA, realizada no CLP, utilizada para o controle da dosagem de cal no processo de flotação.

Figura 7 – Lógica da média



Fonte: Autoria própria (2024)

A lógica da média é responsável por combinar as leituras dos dois sensores de campo, enviadas para o CLP via MMS, fornecendo um valor único que representa de forma mais precisa a variável de processo. Essa lógica processa as informações dos sensores de pH, calcula a média das leituras e compara o valor obtido com o setpoint estabelecido.

A partir dessa comparação, é gerado um sinal de erro, que é utilizado pelo controlador PI para ajustar dinamicamente a vazão da bomba dosadora, garantindo que o pH da polpa mineral seja mantido dentro dos parâmetros operacionais ideais. Esse método assegura maior precisão, estabilidade e confiabilidade no controle do processo de flotação.

A.3 Resultados

O estágio supervisionado na Vale S.A. proporcionou a oportunidade de acompanhar e colaborar diretamente na operação dos sistemas da mineração. A figura 8 ilustra a

tendência do controlador PI ao longo do tempo, evidenciando a atuação do sistema no ajuste da dosagem de cal para o controle do pH da polpa mineral na flotação.

Figura 8 – Tendência (*Trend*) do PI



Fonte: Autoria própria (2024)

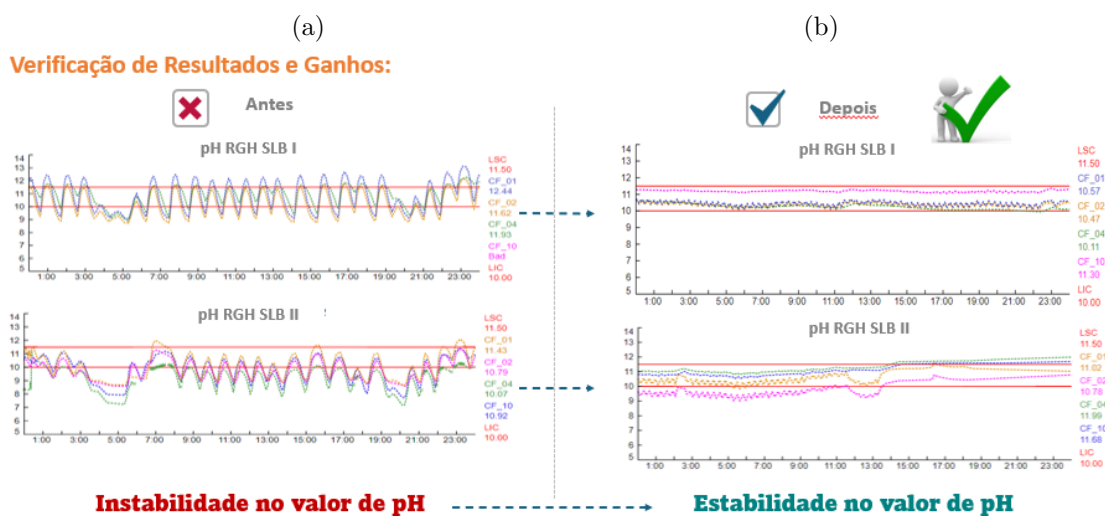
No gráfico, a curva azul representa o sinal de saída do controlador, indicando os ajustes realizados na bomba dosadora conforme a variação do pH, enquanto a curva verde mostra a evolução do pH medido ao longo do tempo. Observa-se que, com a estabilização do sistema de flotação, há uma redução das oscilações, garantindo que o *setpoint* seja atingido de forma eficiente. Além disso, os valores médios, mínimos e máximos registrados na figura 8 demonstram a consistência do controle após a implementação da estratégia automatizada.

Conforme Dias, Queiroz e Araújo (2023), os controladores PI convencionais são amplamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade de projeto e facilidade de ajuste. No entanto, sua eficiência pode ser comprometida diante de mudanças nas condições operacionais, ruídos e perturbações externas, o que exige ajustes frequentes e pode reduzir a robustez do sistema de mineração (DIAS; QUEIROZ; ARAUJO, 2023).

Diante disso, a abordagem proposta por Dias, Queiroz e Araújo (2023), ao integrar uma função não linear ao controle PI tradicional, permite que a planta rastreie a dinâmica de um modelo de referência, resultando em um sistema mais adaptável e menos suscetível à degradação de desempenho. Essa melhoria se traduz na redução de oscilações no controle da variável de processo, como o pH na flotação, garantindo maior precisão na dosagem de reagentes e aumento da eficiência operacional (DIAS; QUEIROZ; ARAUJO, 2023).

A figura 9(a) e 9(b) apresenta uma comparação entre os valores de pH antes e depois da implementação do controlador PI no sistema de dosagem de cal da flotação.

Figura 9 – Comparação da estabilidade do pH antes e depois da implementação do controle PI: (a) Alta variabilidade no pH da polpa mineral; (b) Relação expressa nas flutuações do pH



Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se na figura 9(a) uma alta variabilidade no pH da polpa mineral, com oscilações frequentes e desvios significativos em relação ao *setpoint*, o que pode comprometer a eficiência da separação mineral. Já na figura 9(b), após a implementação do controle automatizado, observa-se uma redução expressiva nas flutuações do pH, evidenciando maior estabilidade do processo e um melhor controle da variável crítica. Essa melhoria é resultado da ação combinada dos termos proporcional e integral do controlador PI, que ajustam dinamicamente a dosagem de cal com base nas leituras dos sensores de pH, garantindo um processo mais robusto, previsível e eficiente.

Esses resultados demonstram que a automação da dosagem de cal reduz as oscilações indesejadas, melhora a seletividade da flotação e otimiza o consumo de reagentes, resultando em ganhos operacionais e proporcionando um maior controle sobre a qualidade do concentrado final. Em consonância com isso, o estudo de Silva (2023) demonstrou que a automação do controle de pH por meio de um controlador PI é uma alternativa eficiente para reduzir as oscilações no processo de neutralização química e otimizar o consumo de reagentes.

Ainda de acordo com Silva (2023), com a implementação do sistema de controle PI, foi possível garantir uma resposta mais rápida e precisa às flutuações do pH, ajustando a dosagem de ácido sulfúrico em tempo real e mantendo a estabilidade do processo de flotação (SILVA, 2023).

Além de aprimorar a eficiência operacional, a automação trouxe ganhos significativos em segurança industrial, ao reduzir a necessidade de intervenção manual e, conseqüentemente, a exposição dos operadores a produtos químicos corrosivos. Embora o

controlador PI seja amplamente utilizado devido à sua simplicidade e robustez, o estudo de Carvalho (2023), destaca o Controle Preditivo Generalizado (CPG) como uma alternativa capaz de antecipar o comportamento do sistema e otimizar a resposta do controle operacional (CARVALHO, 2023).

Segundo Carvalho (2023), a principal diferença entre essas abordagens está na forma como as correções são aplicadas: o PI atua de forma reativa, ajustando a saída com base no erro presente, enquanto o CPG utiliza um modelo matemático para prever e corrigir o comportamento do sistema de forma antecipada. Embora o controle PI tenha demonstrado melhorias significativas na estabilidade do pH e no consumo de reagentes, Carvalho (2023) sugere que técnicas mais avançadas, como o controle preditivo, podem complementar ou até superar abordagens tradicionais em processos industriais mais dinâmicos e sujeitos a variações frequentes.

A pesquisa de Serrano (2020), comparou duas abordagens de controle linear aplicadas a um sistema de tratamento de pH: o Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) com Ajuste Variável de Ganho, (*Gain Schedule* - GS) e o Controle Preditivo Multimodelos (MPC). Os resultados indicaram que a utilização de duas camadas de controle, onde o PID GS atua na estabilização primária e o MPC otimiza a resposta do sistema, foi a solução mais eficaz. Essa abordagem garantiu melhores tempos de acomodação, maior estabilidade operacional e maior viabilidade da planta ao tratar diferentes faixas de pH, com controladores ajustados para cada faixa específica. Além disso, a pesquisa demonstrou que técnicas de sintonia avançadas, como *Ziegler e Nichols*, Integral do Erro ao Quadrado, (*Integral of Squared Error* - ISE) e *Relé de Åström e Hägglund*, são fundamentais para otimizar o desempenho do controle em processos de pH instáveis (SERRANO, 2020).

Esses achados reforçam a importância da automação e da escolha criteriosa das estratégias de controle, indicando que, embora controladores PI e PID sejam amplamente utilizados devido à sua robustez e simplicidade, a adoção de técnicas mais sofisticadas, como o MPC, pode proporcionar ganhos adicionais em processos com maior variabilidade e exigência de desempenho.

A.4 Considerações Finais

O estágio na coordenação de automação foi uma experiência significativa para a formação profissional do discente, oferecendo a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos na universidade e de desenvolver novas habilidades tanto técnicas quanto interpessoais.

Durante esse período, foi oportunizado compreender a importância da automação industrial no setor de mineração, especialmente no que diz respeito à eficiência, segurança e estabilidade dos processos da mineração.

A interação com profissionais experientes foi um dos aspectos mais enriquecedores da experiência, possibilitando a troca de conhecimentos e a vivência de desafios reais no ambiente industrial. Além disso, a participação direta em projetos voltados à otimização do controle da dosagem de cal na flotação proporcionou um aprendizado profundo sobre controle de processos, integração de sistemas e análise de desempenho operacional.

Outro ponto relevante foi a experiência em um ambiente industrial que prioriza segurança, ergonomia e inovação, reforçando a importância da automação não apenas para o aumento da produtividade, mas também para a sustentabilidade e a proteção dos trabalhadores. A vivência no setor permitiu uma compreensão mais profunda da dinâmica do trabalho em equipe, da importância da comunicação clara e dos desafios enfrentados na área de automação e controle.

A implementação do sistema ABB 800xA demonstrou, na prática, como a automação pode transformar e otimizar processos industriais, reduzindo a dependência de ajustes manuais e minimizando oscilações em parâmetros críticos, como o pH da polpa mineral na flotação. Essa solução resultou em maior previsibilidade operacional, redução no consumo de reagentes e melhorias na recuperação mineral, além de trazer impactos positivos na sustentabilidade e segurança do processo na mineração.

Diante dos estudos discutidos, fica evidente que a escolha da estratégia de controle é crucial para a estabilidade e eficiência dos processos industriais. A implementação do controlador PI na dosagem de cal na flotação demonstrou ser uma solução eficaz para minimizar oscilações no pH, otimizar o consumo de reagentes e garantir maior previsibilidade operacional. No entanto, conforme apontado por pesquisas que exploram técnicas de controle mais avançadas, como o PID GS, MPC e Controle Adaptativo, existem oportunidades para aprimorar ainda mais a automação e o desempenho do sistema de flotação.

Assim, trabalhos futuros podem explorar a viabilidade da integração de estratégias preditivas e Inteligência Artificial (IA) para melhorar ainda mais a estabilidade do controle de pH e otimizar a eficiência da flotação.

De maneira geral, o estágio possibilitou a conexão entre teoria e prática, preparando-me para os desafios futuros na minha carreira na automação industrial. A experiência adquirida será fundamental para o meu desenvolvimento profissional, consolidando o entendimento sobre o papel da tecnologia na otimização de processos e no aprimoramento da eficiência operacional.

Referências

- ALBUQUERQUE, K. S. et al. Aumento da continuidade operacional de um circuito de britagem por meio de um controlador override. *Proceedings do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:275898092>>, 2023. [Acesso em: 10 de dez. 2024]. Citado na página 18.
- CARNEIRO, A. A. et al. Avaliação de diferentes polissacarídeos como depressores na flotação aniônica direta de minério fosfático ultrafino. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, p. 19633–19645, 2021. Citado na página 18.
- CARVALHO, T. O. G. d. *Controle preditivo generalizado aplicado a um processo de dessalinização por osmose reversa. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Engenharia de Controle e Automação de Processos - Universidade Federal da Bahia*. [S.l.]: Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79029>. [Acesso em: 05 de fev. 2025], 2023. Citado na página 28.
- DIAS, S.; QUEIROZ, K.; ARAUJO, A. Controlador PI não linear por modelo de referência. *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI 2023*, Disponível em: <https://laci.ufrn.br/acervo/>, 2023. [Acesso em: 15 de dez. 2024]. Citado na página 26.
- FERREIRA, B. B. d. O.; CABRAL, R. R. *Desempenho de reator biológico de leito móvel seguido por flotação no pós-tratamento em escala real na estação de tratamento de esgoto verde em Ponta Grossa-PR. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Engenharia Civil - Universidade Federal de Ponta Grossa*. [S.l.]: Disponível em: <https://ri.uepg.br/monografias/handle/123456789/22>. [Acesso em: 15 de fev. 2025], 2023. Citado na página 19.
- FILADELPHO, C. *Vale S.A: História, privatização e mais da mineradora*. 2024. Disponível em: <https://investidor10.com.br/conteudo/vale-s-a-historia-privatizacao-e-mais-da-mineradora-109071/>. [Acesso em: 25 de nov. 2024]. Citado na página 16.
- LIMA, A. A. *Melhoria do sistema de preparação do coletor para flotação de apatita através de medidores de vazão. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Engenharia de Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia*. [S.l.]: Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38652>. [Acesso em: 03 de fev. 2025], 2023. Citado na página 19.
- MARCHESAN, L. et al. Influência do ph inicial no tratamento de água por eletrocoagulação-flotação. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, v. 8, p. 1–11, 2022. Citado na página 19.
- MARTINS, K. G. A. *Um estudo da comunicação de sistemas SCADA com infraestrutura Leaky Feeder em mina subterrânea. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Universidade Federal de Uberlândia*. [S.l.]: Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38998>. [Acesso em: 18 de jan. 2025], 2023. Citado na página 17.

PINTO, T. V. B. e et al. Ganhos de eficiência energética em moinho sag por meio de controle automático. *Proceedings do XXIV Congresso Brasileiro de Automática*, Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265298957>, 2022. [Acesso em: 1 de dez. 2024]. Citado na página 18.

SERRANO, M. A. P. *Estratégias de controle avançado para uma planta de tratamento de pH*. Dissertação (Mestrado) — Engenharia de Sistemas - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2020. Citado na página 28.

SILVA, C. V. M. d. *Controle de pH no tratamento de efluente de unidade desmineralizadora em uma indústria petroquímica. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) -Engenharia de Controle e Automação de Processos - Universidade Federal da Bahia*. [S.l.]: Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/38868>. [Acesso em: 10 de fev. 2025], 2023. Citado na página 27.

SILVA, M. A. P.; BRANQUINHO, L. Implementação de estratégia de controle cascata e tratamento dos distúrbios do processo da malha de controle da alimentação da moagem Semi-Autógena (SAG). *1º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma*, p. 1296–1323, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

VALE. *Vale: Há 80 anos transformando o futuro*. 2024. Disponível em: [//vale.com/pt/quem-somos](https://vale.com/pt/quem-somos). [Acesso em: 10 de dez. 2024]. Citado na página 16.

VOLPATO, S. B. et al. Tratamento de efluentes ácidos para a remoção do manganês e de metais pesados associados aos efluentes da mineração de carvão por meio dos processos de floculação e flotação por ar dissolvido. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, v. 55, n. 4, p. 536–551, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.