UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU

PAULA RABELLO GONÇALVES

SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY DE DOSAGEM DE AMIDO APLICADO À ETAPA DE FLOTAÇÃO DE UM PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2022

PAULA RABELLO GONÇALVES

SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY DE DOSAGEM DE AMIDO APLICADO À ETAPA DE FLOTAÇÃO DE UM PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Bruno Nazario Coelho, Dr.

Coorientador: Lucas Andery Reis, MSc.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635s Goncalves, Paula Rabello.
Sistema especialista Fuzzy de dosagem de amido aplicado à etapa de flotação de um processo de beneficiamento de minério de ferro. [manuscrito] / Paula Rabello Goncalves. Paula Rabello Gonçalves. - 2022.
32 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Bruno Nazario Coelho.
Coorientador: Me. Lucas Andery Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Lógica Fuzzy. 2. Sistema Especialista. 3. Controle Avançado. 4. Flotação. 5. Beneficiamento de Minério. I. Gonçalves, Paula Rabello. II. Coelho, Bruno Nazario. III. Reis, Lucas Andery. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5

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

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Paula Rabello Gonçalves

Sistema especialista Fuzzy de dosagem de amido aplicado à etapa de flotação de um processo de beneficiamento de minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação

Aprovada em 13 de junho de 2022

Membros da banca

[Doutor] - Bruno Nazário Coelho - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestre] - Lucas Andery Reis - Coorientador (Vale)
[Doutor] - Karla Boaventura Pimenta Palmieri - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestre] - Mariana Caroline Andrade Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruno Nazário Coelho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/06/2022

Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/06/2022, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0343882** e o código CRC **00FEBD6F**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Este trabalho é dedicado às meninas que um dia terão dúvidas,
e essas dúvidas as levarão a se tornarem grandes engenheiras.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha familia, por todo o apoio e pela oportunidade de cursar o ensino superior. Sem vocês nada disso seria possível. Agradeço também à Instituição Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, pelo ensino de qualidade. A todos os professores, em especial Bruno Nazário, por ter sido meu orientador. Agradeço, também, ao Lucas Andery, co-orientador da monografia, que acompanhou todo o projeto.

RESUMO

A indústria de mineração é um dos pilares mais importantes para o desenvolvimento econômico no Brasil, atraindo, assim, a atenção de estudos e de possíveis avanços tecnológicos. Como grande aliado nessa busca por melhorias no processo, tem-se o setor de automação, que através da tecnologia é capaz de fornecer processos otizimados. O presente trabalho é um exemplo dessa interface, que detalha o estudo e a aplicação de um sistema especialista *fuzzy* para controle da dosagem específica de amido na etapa de flotação de uma usina de beneficiamento de minério de ferro. Esse controlador avançado manipula o *setpoint* do controlador clássico PID (proporcional, integral, derivativo), que controla a vazão de amido na camada regulatória. O objetivo dessa aplicação é otimizar o sistema de dosagem específica de amido e reduzir o teor de ferro no rejeito, contribuindo para aumentar a recuperação mássica do processo de concentração do minério de ferro. Os resultados obtidos em um teste dessa aplicação foram satisfatórios em uma usina de beneficiamento de minério de ferro, representando uma redução no teor de ferro no rejeito de 22,98% para 18,50% e uma redução no consumo de amido de 545,95 g/t para 539,75 g/t. Alcançou-se, ainda, um aumento na recuperação mássica de 58,74% para 61,43%.

Palavras-chaves: Lógica *Fuzzy*; Sistema Especialista; Controle Avançado; Flotação; Beneficiamento de Minério.

ABSTRACT

The mining industry is one of the most important pillars for economic development in Brazil, thus attracting the attention of studies and possible technological advances. As a great ally in this search for process improvements, there is the automation sector, which through technology is able to provide optimized processes. The present work is an example of this interface, which details the study and application of a fuzzy expert system for the specific dosage control of starch on the flotation stage of iron ore beneficiation. This advanced control manipulates the setpoint of the classic controller PID (proportional, integral, derivative), that controls the starch flow rate in the regulatory layer. The purpose of this aplication is to optimize the specific starch dosing system and reduce the content of iron in the tailing, contributing to increasing the mass yield of iron ore. The results obtained on a test with this aplication were satisfactory in a iron ore beneficiation plant, representing a reduction in the iron content in the tailings from 22.98% to 18.50% and a reduction in starch consumption from 545.95 g/t to 539.75 g/t. An increase in the mass recovery from 58.74% to 61.43% was also achieved.

Key-words: Fuzzy Logic; Expert System; Advanced Control; Flotation; Ore Beneficiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do tratamento de minério 13
Figura 2 – Máquina de flotação 18
Figura 3 – Exemplo de grau de pertinência de uma variável na etapa de fuzzyficação . . 20
Figura 4 – Fluxograma do tratamento das variáveis 21
Figura 5 – Histograma das variáveis de entrada 22
Figura 6 – Diagrama de controle proposto aplicado à flotação 23
Figura 7 – Funções de pertinência das variáveis de entrada 24
Figura 8 – Conjunto de regras *fuzzy* 25
Figura 9 – Dosagem do amido para defuzzyficação 25
Figura 10 – Tela de seleção no sistema supervisório 26
Figura 11 – Comportamento das variáveis de processo antes e depois da ativação do sistema 27
Figura 12 – Resultados de processo obtidos no teste de aplicação 28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis do sistema. 23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PID	Proporcional, integral, derivativo
SISO	*Single input, single output*
CLP	Controlador lógico programável
LIMS	*Information Management System*
PIMS	*Plant Information Management System*
SCADA	*Supervisory Control and Data Aquisitio*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Contexto 12
1.2 Objetivos geral e específicos 15
1.2.1 Objetivo Geral 15
1.2.2 Objetivos Específicos 15
1.3 Justificativa do trabalho 15
1.4 Estrutura do trabalho 15

2 REVISÃO DA LITERATURA 17
2.1 Controle de Processo da Flotação 17
2.2 Controle Clássico PID 18
2.3 Controlador Fuzzy 19

3 DESENVOLVIMENTO 21
3.1 Metodologia 21
3.2 Desenvolvimento 22

4 RESULTADOS 27

5 CONCLUSÃO 29

REFERÊNCIAS 30

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A mineração é um processo de extrema importância para humanidade, desde seus primórdios. Sua relevância é tanta que a nomenclatura de eras da evolução humana é representada pelos marcos ligados à mineração, como suas técnicas e utilizações dos recursos, como Idade da Pedra Lascada, Idade da Pedra Polida, Idade do Cobre, Idade do Bronze, Idade do Aço e Petróleo, entre outros (BARSA, 2007 apud CURI, 2017).

Além de indicativo da chamada Idade do Homem, a mineração pode representar o avanço da tecnologia, pois o ramo está sempre em busca de novas técnicas de aperfeiçoamento (CURI, 2017). No que se refere especificamente à industria do minério de ferro, na atualidade, grande parte dessa motivação está diretamente ligada ao seu valor econômico e a sua rentabilidade. Isto posto, justifica-se a incessante busca pela otimização nos seus processos, empregando as mais diversas técnicas disponíveis.

Os procedimentos de uma mina de minério de ferro percorrem um longo caminho, iniciando-se na procura por locais com minerais de interesse econômico até o fornecimento desse mineral processado e concentrado para a indústria metalúrgica (DUTRA, 2014). Ainda, de acordo com Dutra (2014), as etapas que compõem esse processo são:

- Prospecção e Pesquisa Mineral: é feito o reconhecimento geológico preliminar, visando encontrar o local onde há a ocorrência do mineral de interesse, seguido pelo estudo das propriedades do mineral e da infra-estrutura do local, determinando a viabilidade econômica da extração;
- Lavra de Jazidas: é a fase de desenvolvimento do projeto e exploração mineral, que pode ser feito em mina a céu aberto ou subterrânea, onde ocorre a extração do minério, seguindo as etapas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte;
- Beneficiamento de Minérios: são operações aplicadas ao mineral, realizando transformações física a fim de se obter o produto final com valor econômico agregado;
- Recuperação Ambiental: é o tratamento da área degradada, devolvendo suas características naturais, dentro do possível, para entregá-la de volta a quem pertencia.

Segundo Chaves (1996), o beneficiamento de minério de ferro tem como objetivo adequar a granulometria do minério processado e enriquecê-lo para obter como produto um concentrado chamado de *pellet feed*. Para se alcançar esse objetivo, o minério é submetido às operações unitárias:

- cominuição: britagem e moagem;
- peneiramento e classificação;
- concentração: gravítica, magnética, eletroestática e flotação;
- desaguamento: espessamento e filtragem;
- secagem: secador rotativo e secador de leito fluidizado;
- disposição de rejeito.

Essas operações ocorrem de forma ordenada em uma usina de beneficiamento de minério. A Figura 1 apresenta um fluxograma genérico das etapas desse processo, desde a extração do minério de ferro até a obtenção do produto final, proveniente da etapa de flotação.

Figura 1 – Etapas do tratamento de minério

Fonte: Adaptado de Sbárbaro e Villar (2010).

O intuito de tratar o bem mineral é aprimorar a qualidade do produto final, aumentando o teor dos minerais de interesse e agregando valor. Sendo assim, essa é uma etapa de grande importância e atrai a atenção das mineradoras, que buscam otimizar esse processo para obter um produto dentro dos padrões de mercado com o menor custo possível.

A automação e o controle de processo são grandes aliados para alcaçar esse objetivo. Diferentes estratégias de controle são constantemente procuradas e aplicadas à essa etapa. Tanto o controle clássico PID quanto a lógica *fuzzy* podem ser utilizados, requerendo estudos acerca desses assuntos.

O presente trabalho representa, portanto, um desses estudos acerca da etapa de flotação. Essa etapa consiste no processo para a separação de misturas heterogêneas de partículas em fase aquosa, separando-as em dois produtos, o concentrado (parte economicamente rentável) e o rejeito (ganga, fração sem valor agregado). Segundo Lima, Valadão e Peres (2013), esse método de concentração utiliza as características hidrofóbica (afinidade pelo ar) e hidrofílica (afinidade pela água) das partículas para separá-las. Para isso, utiliza-se máquinas de flotação que injetam ar no meio aquoso, onde as partículas de rejeito (quartzo) tornam-se hidrofóbicas com a adição de amina, sendo carregadas para a superfície pelas bolhas de ar injetado e o ferro é deprimido no

inferior da célula de flotação pela a adição de amido, que inibe a ação da amina na superfície dos óxidos de ferro, mantendo-os hidrofílicos.

Os reagentes amina e amido são responsáveis pela seletividade do processo: a amina induz a hidrofobicidade da ganga silicatada, enquanto o amido mantém os óxidos de ferro hidrofílicos, inibindo a adsorção da amina. Por isso, o controle adequado de dosagem específica desses reagentes se torna imprescindível para o bom desempenho do processo e pelo custo da operação.

A otimização desse processo é de grande interesse do mercado, pois um aumento de 0,5% na recuperação metalúrgica pode ser economicamente significativo (FERREIRA; LOVEDAY, 2000), além de evitar o desperdício dos reagentes. Entretanto, o desafio no projeto de controle para esse processo está em sua dinâmica complexa, pois envolve diversos fatores de influência e dinâmicas que variam com o tempo (SUN et al., 2021).

O controle de vazão dos reagentes para a etapa de flotação é comumente realizado por malhas de controle, utilizando o controle clássico PID (proporcional, integral e derivativo), que tem a robustez e a simplicidade de implementação como atributos. Porém, tem como restrição ser um controle de entrada única e saída única (SISO, *single input, single output*) PI descentralizado onde não possibilita a inserção de restrições nas ações de controle e nas variáveis de processo (REIS, 2018).

Por isso, a ideia de se utilizar um controle de camada supervisória, acima do PID, possibilita que o sistema de controle utilize como entradas variáveis provenientes do laboratório. Como exemplo, tem-se o teor de ferro na alimentação, teor de ferro no rejeito e granulometria, que são influentes na decisão das ações de controle para a dosagem específica dos reagentes.

Em linha com essa abordagem, os sistemas especialistas, por meio de controladores *fuzzy*, tem a capacidade de integrar o conhecimento humano em regras a partir da utilização de variáveis de processo da camada supervisória como entradas do sistema para a tomada de decisão. Sistemas desse tipo têm a capacidade de ponderar a influência de cada variável de entrada para diferentes pontos de operação de sistemas não lineares e são compatíveis com processos de múltiplas entradas, possuem leis de controle simples, variáveis linguísticas flexíveis e facilidade de implementação (GARCIA; CAPPELLI; UMEZU, 2014), (LEITE; FILETI; SILVA, 2020). Além de ser amplamente utilizado em diversas áreas de controle, a lógica *fuzzy* já vem sendo amplamente utilizada na mineração, como abordado por Ferreira e Loveday (2000), Quintanilla et al. (2021), Sun et al. (2021).

Nesse trabalho é descrita a implementação de um sistema especialista por controlador *fuzzy* em uma camada supervisória, acima do controlador PID, para o controle da dosagem específica de amido em uma linha de flotação. É apresentada a metodologia utilizada na implementação, bem como o desenvolvimento e os potenciais ganhos obtidos com a aplicação do controlador em um período de teste.

1.2 Objetivos geral e específicos

1.2.1 Objetivo Geral

Melhorar o controle de reagentes na etapa de flotação do beneficiamento de minério de ferro. Para essa melhoria, pretende-se desenvolver um sistema especialista *fuzzy* para determinar o *setpoint* calculado da vazão de amido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um estudo em lógica *fuzzy*;
- Desenvolver um sistema especialista *fuzzy* para controle de adição de reagentes na etapa de flotação do beneficiamento de minério de ferro;
- Reduzir o teor de ferro e o consumo de amido na etapa de flotação, através do controle desenvolvido;
- Permitir a seleção da faixa de trabalho do controlador pela equipe de operação devido à alterações no minério de ferro.

1.3 Justificativa do trabalho

O projeto foi implementado em uma usina de benefiamento de minério de ferro, onde já existia um controle de adição de reagentes. Porém, este controle não vinha apresentando bom desempenho, ficando estagnado na dosagem máxima. Essa estagnação mostrava que o controle vigente não era eficaz, necessitando o desenvolvimento de uma nova forma de controle.

A malha de controle do Controlador Lógico Programável - CLP - é complexa e envolve outros fatores além do *setpoint* calculado, que não necessitavam de ajuste. Sendo assim, optou-se por desenvolver um sistema especialista *fuzzy* para determinar o *setpoint* calculado e enviá-lo ao controlador PID.

Os reagentes utilizados na etapa de flotação representam uma grande parcela dos gastos de uma usina, então um bom sistema de controle na sua utilização é de grande interesse econômico para uma mineradora. Além disso, uma performance otimizada dessa etapa gera um concentrado mais puro com maior valor agregado e reduz o descarte de mineral minério no rejeito.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro é a indrodução, onde são apresentados alguns conceitos que embasam o projeto, bem como sua relevância. O segundo capítulo é a revisão da literatura, onde são apresentados os estudos feitos acerca de trabalhos

semelhantes ou que utilizam as mesmas ferramentas. Em seguida, tem-se o desenvolvimento, onde são descritos os passos percorridos durante o desenvolvimento e a aplicação do projeto.

Os capítulos finais, quatro e cinco, resultados e conclusão, respectivamente, discutem os resultados obtidos após a implantação do projeto, com os ganhos da usina de beneficiamento de minério de ferro, e a possibilidade de replicações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para construir um embasamento teórico acerca do assunto, é preciso pesquisar e entender melhor os pontos centrais que exercem mais influência sobre o trabalho. Sendo assim, foram feitas pesquisas sobre o controle de processo da flotação, controlador PID e lógica *fuzzy*. As informações coletadas e julgadas pertinentes são descritas a seguir neste capítulo.

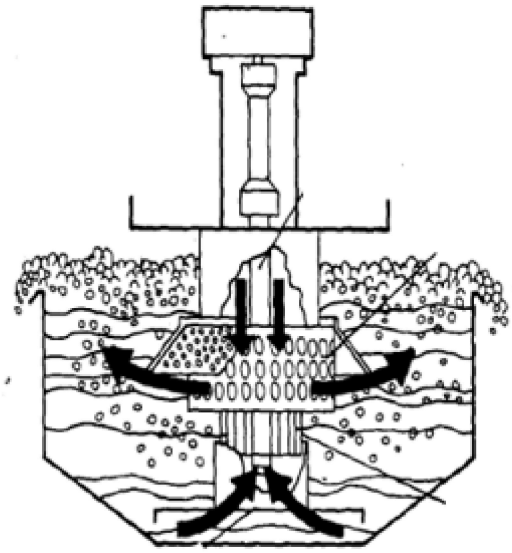
2.1 Controle de Processo da Flotação

A flotação é um método de concentração muito utilizado no beneficiamento de minério de ferro, por ser onde se concentra o minério considerando a proporção entre o mineral-minério (parte economicamente rentável) e o mineral de ganga (rejeito). Ele é alimentado pelo produto da etapa de moagem (responsável pela adequação da granulometria), seguida de uma etapa de classificação (possivelmente responsável pela deslamagem). A polpa de minério composta por uma mistura de partículas mineralogicamente heterogêneas alimenta uma pré etapa da flotação, denominada condicionamento, composta por tanque com agitador onde são adicionados os reagentes, como o amido e a amina, no caso específico do minério de ferro (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A partir dos estágios *rougher, cleaner, recleaner e scavenger*, a etapa de flotação utiliza como propriedades diferenciadoras a aversão das partículas pela água (hidrofobicidade) e a afinidade pela fase fluida (hidrofilicidade). Assim, é possível separar as partículas de quartzo (SiO_2) da hematita (Fe_2O_3), sendo que o concentrado do *recleaner* é o produto final, o qual precisa atender a determinadas especificações de mercado como, por exemplo, o teor de contaminantes (COSTA et al., 2018).

O amido gelatinizado utilizado no processo de concentração por flotação é em sua grande maioria de milho e sua dosagem é realizada por meio de controlador clássico PID. Ao adicionar o amido de milho à polpa, este interage com as partículas de hematita, mantendo sua afinidade com a fase líquida, deprimindo-a à parte inferior da mistura. Em seguida, acrescenta-se a amina, que é uma substância tensoativa: uma parte dela é hidrofílica e a outra hidrofóbica (NEDER; FILHO, 2006). A parte hidrofóbica permite que as partículas sejam coletadas pelas bolhas de ar injetadas pelas pela máquina de flotação (Figura 2) e levadas até a superfície, integrando a camada de espuma. O concentrado que ficou alojado no inferior acompanha o fluxo de processo (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Figura 2 – Máquina de flotação



Fonte: Luz, Sampaio e França (2010).

Além do controle de dosagem de amido e amina, na flotação existem outros controles importantes para o bom desempenho dessa operação de concentração. Pode-se citar: controle de nível das células de flotação pelas válvulas de descarga, controle de pH por dosagem de soda e controle de vazão de ar nas células de flotação.

2.2 Controle Clássico PID

Controle de processos industriais consiste em ações sobre um sistema, com o objetivo de comandar e regular seu funcionamento, a fim de alcançar um resultado específico (RODRIGUES, 2016). Segundo Garcia (2017), controlar um processo significa fazer com que suas variáveis interajam de forma ordenada para que estejam o mais próximo possível do que é considerado ideal. Saber quando, como e quanto alterar o valor de uma variável para obter uma melhor resposta do sistema constitui a questão central das estratégias de controle. Portanto, o propósito final do controle é alcançar um determinado valor de saída, chamado de ponto de ajuste ou *setpoint* (SP) e a estratégia de controle é a forma como o sistema irá chegar nesse valor desejado.

O controlador clássico PID, que pode ser chamado também de controlador de três termos, consiste em uma combinação entre três modos de controle: proporcional, integral e derivativo. O modo proporcional funciona com a correção proporcional ao erro. Ou seja, quanto maior for o erro, maior será a ação de correção e, à medida que o erro diminui, o processo de correção também reduz. No modo derivativo, a proporcionalidade está ligada à taxa em que o erro varia. Quando o sinal de erro varia rapidamente, o controlador produz uma grande correção; quando essa variação é gradual, a correção gerada é pequena. O modo integral possui esse nome pois a

ação de controle é proporcional à integral do erro em relação ao tempo. Sendo assim, um erro constanste gera uma correção crescente (RODRIGUES, 2016).

Dentre os modelos de controle clássicos, o PID é o mais usado, pois a associação tem como objetivo minimizar os pontos negativos de cada um dos modos isolados. O modo proporcional (P) tem como principal desvantagem não eliminar o erro estacionário e ele pode gerar instabilidade no sistema caso o ganho possua valores altos. O modo integral (I) consegue eliminar o erro estacionário, mas essa correção pode aumentar a instabilidade ou reduzir o amortecimento do sistema. O modo derivativo (D), por sua vez, aumenta o amortecimento e, geralmente, gera uma melhor estabilidade (GARCIA, 2017).

Essa associação feita entre os três modos de controle P, I e D tem como objeitvo alcançar um grau satisfatório de redução do erro em regime permanente juntamente com um sistema que possua boa estabilidade e bom amortecimento. Um controlador proporcional diminui o erro estacionário e o tempo de resposta. Ao incluir o controlador integral, elimina-se o erro estacionário, mas, normalmente, essa ação pode levar a uma resposta mais oscilatória. Para corrigir esse inconveniente, associa-se o termo derivativo, que tem a capacidade de diminuir a intensidade das oscilações, bem como fornecer uma resposta mais rápida ao sistema (GARCIA, 2017).

2.3 Controlador Fuzzy

A lógica booleana se caracteriza por dividir os elementos em dois grupos: "verdadeiro"e "falso"ou "zero"e "um". Assim, o elemento pertence totalmente a um dos grupos. Essa é a forma como os computadores processam as informações, mas não levam em consideração as incertezas presentes nos modelos de processo. Surge então, na década de 1960, a lógica *fuzzy* para possibilitar que os computadores raciocinem como as percepções humanas de verdades parciais (SIMÕES; SHAW, 2007). Ela permite valores lógicos intermediários, chamados valores difusos, que podem assumir qualquer valor entre zero e um (SILVA et al., 2019). Para isso, o sistema lógico *fuzzy* percorre três etapas: a fuzzyficação, a inferência e a defuzzyficação.

Na etapa de fuzzyficação, as variáveis de processo são lidas pelo sistema *fuzzy* e são descritas em variáveis linguísticas, como BAIXA, MÉDIA e ALTA por meio de funções de pertinência, que são funções normalizadas que representam as faixas do grupo linguístico de cada variável com seu conjunto imagem no intervalo $[0, 1]$, conforme ilustrado na Figura 3. Sendo que a função de pertinência pode ser representada por uma função padronizada trapezoidal, triangular e gaussiana, como pode ser visto em Telles et al. (2005).

Para o mecanismo de inferência é utilizado um conjunto de regras de causa e efeito, no formato SE/ENTÃO, criado em conjunto com os especialistas do processo produtivo, que traduzem uma implicação lógica (SIMÕES; SHAW, 2007). Com as regras determinadas, nessa etapa ocorrem as operações com os conjuntos *fuzzy* obtidos na etapa de fuzzyficação que dá

Figura 3 – Exemplo de grau de pertinência de uma variável na etapa de fuzzyficação

origem ao conjunto de saída em termos linguísticos, para a tomada de decisão.

Por fim, o conjunto de saída passa pela etapa de defuzzyficação, que traduz as ações de controle em termos linguísticos para o mundo real (SIMÕES; SHAW, 2007), entendível pelas máquinas, sendo que os três métodos mais utilizados nessa etapa são: centro do máximo, média do máximo e centro da área ou centroide, que é o método utilizado nesse trabalho.

3 DESENVOLVIMENTO

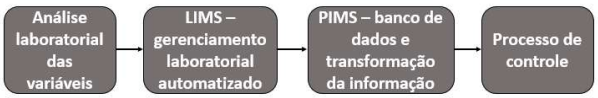
3.1 Metodologia

Esse trabalho foi implantado no processo de flotação de uma usina de beneficiamento de minério de ferro localizada no quadrilátero ferrífero.

As três variáveis de processo que influenciam diretamente a dosagem de amido, definidas como entradas para o sistema especialista *fuzzy* são: o teor de ferro no rejeito, o teor de ferro na alimentação e a granulometria da alimentação passante em 0.045mm. Os valores dessas variáveis são obtidos por meio de análise laboratorial, que são lidas pelo sistemas LIMS (*Laboratory Information Management System*), que é um *software* de gerenciamento laboratorial automatizado, que otimiza o processo, facilita o armazenamento e o controle dos dados e garante a confiabilidade e a rastreabilidade das informações.

Uma vez armazenados no LIMS, os valores das variáveis são lidos pelo PIMS, (*Plant Information Management System*), que é um *software* que recebe dados da planta e os armazena em um banco de dados. É responsável pelo gerenciamento das informações da planta possibilitando apresentar esse conteúdo em forma de tabela, gráficos de tendência, entre outras formas, a depender da necessidade. E é por meio desse sistema que os dados são disponibilizados para leitura pelo sistema de controle. O fluxo dessas informações é apresentado na Figura 4.

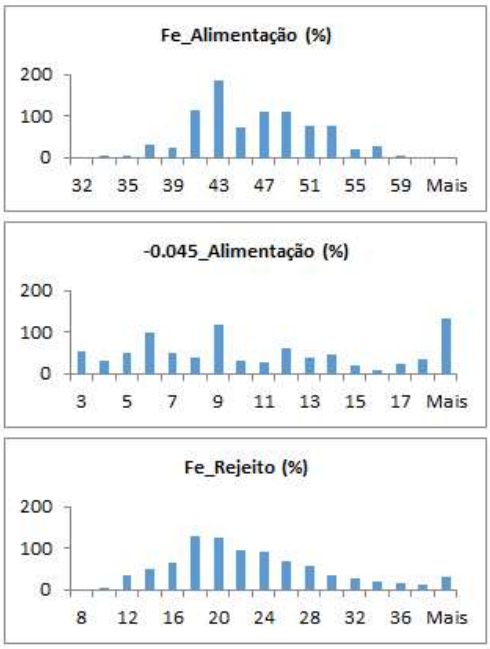
Figura 4 – Fluxograma do tratamento das variáveis



Como fase inicial, garantiu-se a coleta e tratamento das variáveis no LIMS e a leitura pelo PIMS. A partir disso, realizou-se um levantamento histórico dos dados para serem utilizados na etapa de engenharia do controlador. O período de registro das variáveis pelo laboratório é de quatro horas, o que também foi definido como o período de amostragem na coleta dos dados históricos de cinco meses, conforme ilustradas na Figura 5, as distribuições das variáveis de entrada.

Com a análise do histórico das variáveis, definiu-se as funções de pertinência, traduzindo as faixas de trabalho identificadas em variáveis linguísticas para serem utilizadas na construção das regras. Uma vez definidas, as regras fazem parte do desenvolvimento do controlador *fuzzy*. Para isso, são utilizadas ferramentas nativas de CLP ou por meio do controlador da *National Instruments*, que é um controlador industrial capaz de executar rotinas de lógicas de controle avançado desenvolvidas no *software Labview*, que é uma das ferramentas utilizadas nesse trabalho.

Figura 5 – Histograma das variáveis de entrada



A variável de saída do sistema *fuzzy* é a dosagem específica de amido, dada em g/t. O valor dessa variável é utilizada no *setpoint* calculado do PID de vazão de amido para a linha de flotação, ou seja, o sistema especialista fornece o valor da dosagem adequada para o *setpoint* do PID, que é responsável por garantir a vazão de amido gelatinizado ao processo de flotação por meio da variação de velocidade do motor do alimentador de amido para a preparação e bombeamento. O cálculo do *setpoint* de vazão é feito baseado na relação entre a vazão na alimentação da deslamagem, a recuperação da deslamagem, a dosagem específica do amido e sua umidade.

Como o CLP da planta fica responsável por ler as informações disponibilizadas pelo controlador industrial que realiza o controle *fuzzy*, é necessário que o controlador PID executado por esse CLP seja capaz de interagir com o sistema especialista *fuzzy*, estabelecendo a comunicação entre os ativos. Uma vez integrado o sistema especialista *fuzzy* ao PID, a dosagem de amido passa a ser realizada pela decisão do sistema inteligente implantado, onde a habilitação desse sistema é feita pelo operador no sistema supervisório da planta.

3.2 Desenvolvimento

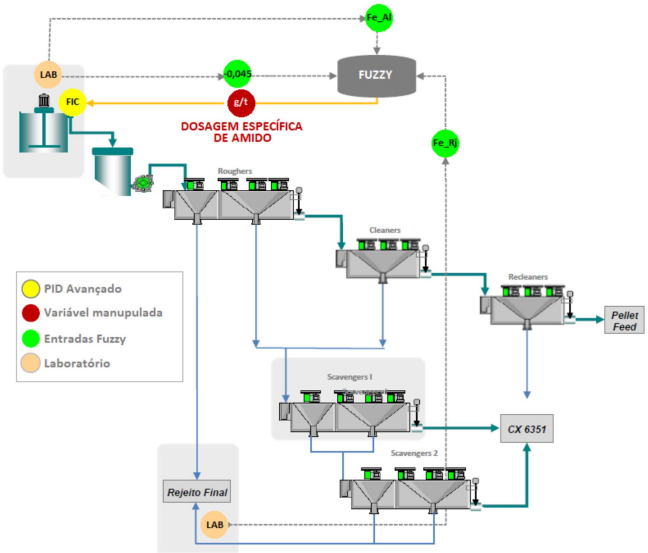
É proposto o desenvolvimento do sistema especialista *fuzzy* com o objetivo de realizar, de forma adequada, a dosagem específica de amido (g/t) utilizando variáveis de observação que influenciam nessa dosagem, além de serem variáveis que demonstram o desempenho do processo de flotação. Dessa forma, o sistema ficou definido com as variáveis da Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis do sistema.

Tipo	Variável
Manipulada	Dosagem específica de amido (g/t)
Observação	Ferro na alimentação $(\%)$
Observação	Gran. alimentação passante em $0,045mm$ $(\%)$
Observação	Ferro no rejeito $(\%)$

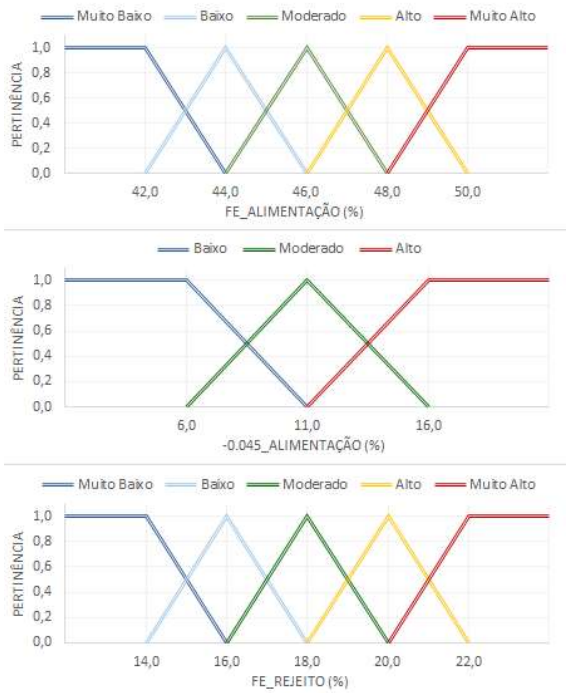
A partir da utilização de estatística dos dados históricos coletados das variáveis de processo, são definidas as faixas de trabalho do controlador. O sistema lê essas variáveis, faz o processamento das etapas de fuzzyficação, inferência e defuzzyficação, envia o valor de dosagem para o PID de vazão de amido, que faz a atuação na planta, conforme está demonstrado no esquema da Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de controle proposto aplicado à flotação



Para a etapa de fuzzyficação, utilizou-se os histogramas das variáveis de observação. Eles determinam a distribuição das variáveis e foram a base para definir as faixas de atuação que são referências na etapa de inferência. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 – Funções de pertinência das variáveis de entrada



Definidas as funções de pertinência, parte-se para a criação das regras de causa e efeito, formulando a relação entre as faixas de operação de cada variável de observação e a saída desejada, de acordo com o conhecimento humano do processo. Nessa etapa, utiliza-se variáveis linguísticas, conforme ilustrado na Figura 8. A tomada de decisão foi determinada a partir da experiência operacional comprovada, a fim de alcançar uma dosagem ideal de amido.

Figura 8 – Conjunto de regras *fuzzy*

%Fe_Rejeito	MUITO BAIXO		
%Fe_Alim / %-0.045_Alim	BAIXO	MODERADO	ALTO
MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO
BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	BAIXO
MODERADO	BAIXO	BAIXO	MODERADO
ALTO	MODERADO	MODERADO	MODERADO
MUITO ALTO	MODERADO	MODERADO	ALTO

%Fe_Rejeito	BAIXO		
%Fe_Alim / %-0.045_Alim	BAIXO	MODERADO	ALTO
MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	BAIXO
BAIXO	BAIXO	BAIXO	MODERADO
MODERADO	BAIXO	MODERADO	MODERADO
ALTO	MODERADO	MODERADO	MODERADO
MUITO ALTO	MODERADO	ALTO	ALTO

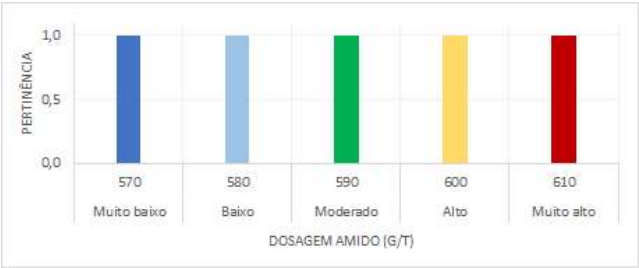
%Fe_Rejeito	MODERADO		
%Fe_Alim / %-0.045_Alim	BAIXO	MODERADO	ALTO
MUITO BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO
BAIXO	BAIXO	BAIXO	MODERADO
MODERADO	MODERADO	MODERADO	MODERADO
ALTO	MODERADO	ALTO	ALTO
MUITO ALTO	ALTO	ALTO	ALTO

%Fe_Rejeito	ALTO		
%Fe_Alim / %-0.045_Alim	BAIXO	MODERADO	ALTO
MUITO BAIXO	BAIXO	BAIXO	MODERADO
BAIXO	MODERADO	MODERADO	MODERADO
MODERADO	MODERADO	ALTO	ALTO
ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
MUITO ALTO	ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO

%Fe_Rejeito	MUITO ALTO		
%Fe_Alim / %-0.045_Alim	BAIXO	MODERADO	ALTO
MUITO BAIXO	MODERADO	MODERADO	MODERADO
BAIXO	MODERADO	MODERADO	ALTO
MODERADO	ALTO	ALTO	ALTO
ALTO	ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO
MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO

Uma vez definida a vazão ideal de amido a partir das variáveis linguísticas resultantes da etapa de inferência, na defuzzyficação esse resultado é trazido em valores reais da planta. Para se chegar nas faixas de dosagem específica do amido obtidas, utilizou-se a base histórica e o conhecimento operacional da equipe. As faixas de dosagem são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Dosagem do amido para defuzzyficação



A saída do controlador gera o *setpoint* para a dosagem específica de amido no processo, que pode ser habilitada na janela de interface do supervisório. Para possibilitar essa seleção, criou-se uma tela no sistema supervisório, conforme ilustrado na Figura 10. Essa tela também permite selecionar três faixas de dosagem distintas (baixa, moderada, elevada), possibilitando

que o operador defina, de maneira simples, a faixa de operação do processo. Essas faixas são definidas de acordo com características do minério de entrada do processo.

Figura 10 – Tela de seleção no sistema supervisório

O sistema supervisório, também conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*), permite por meio da aquisição de dados, que informações do processo sejam coletadas e rastreadas (NETO, 2019), além de transmitir comandos do operador da sala de controle à planta. Na sua interface com o usuário, ele contém telas gráficas que representam todo o processo produtivo e seu funcionamento é em tempo real.

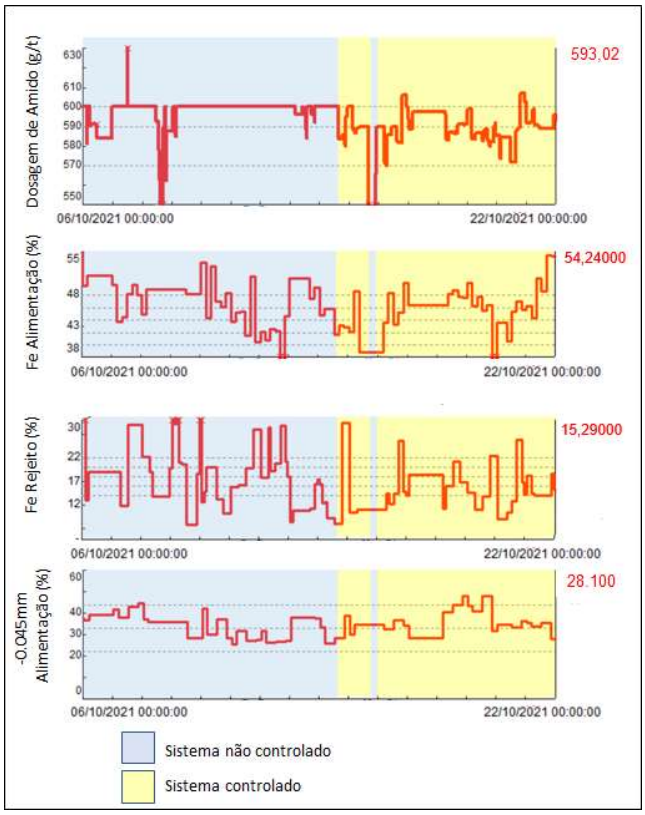
A execução do sistema especialsita *fuzzy* é contínua no controlador industrial utilizado e a frequência de atualização da dosagem fica dependente de uma nova leitura das variáveis de observação pelo laboratório. A solução proposta foi ativada e iniciou-se um trabalho de acompanhamento do seu desempenho.

4 RESULTADOS

O sistema especialista *fuzzy* para dosagem de amido no processo de flotação foi colocado em operação para um período de teste de três meses. Os resultados obtidos com a implementação demonstraram excelentes indicadores como: redução do teor do ferro no rejeito, aumento na recuperação mássica e redução no consumo de amido.

A Figura 11 ilustra um comparativo entre a dosagem de amido antes e depois da ativação da aplicação *fuzzy*. Nela estão representadas a dosagem específica do amido determinada pelo sistema e o comportamento das três variáveis de observação: teor de ferro na alimentação, teor de ferro no rejeito e granulometria da alimentação passante em 0,045mm.

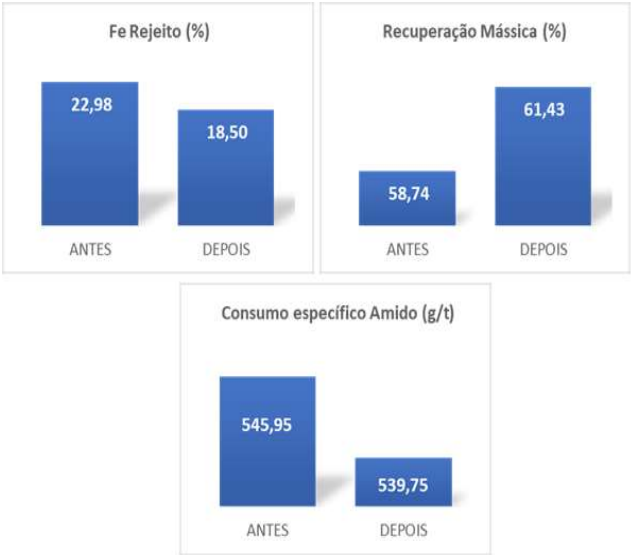
Figura 11 – Comportamento das variáveis de processo antes e depois da ativação do sistema



Observa-se que antes do sistema especialista ser ativado, o *setpoint* da dosagem mantinha-se a maior parte do tempo no limite máximo de $600g/t$ e ainda assim o desempenho do processo não era satisfatório. Com a ativação do controlador *fuzzy*, a adição de reagente passou a ser controlada de forma a não liberar uma vazão acima da necessária para se alcançar um produto final com uma qualidade superior. Isso se comprova com o teor de ferro no rejeito, que foi reduzido após o início de operação do controlador avançado, mesmo com uma dosagem inferior ao que se praticava anteriormente.

A Figura 12 ilustra graficamente o potencial de ganhos, como um aumento de $2,69\%$ na recuperação mássica, além de uma redução de $4,48\%$ de ferro no rejeito e $6,2g/t$ de consumo específico de amido. O que evidencia o sucesso da aplicação de um controlador *fuzzy* aplicado acima do controlador PID que fica na camada regulatória da planta.

Figura 12 – Resultados de processo obtidos no teste de aplicação



5 CONCLUSÃO

O sistema especialista *fuzzy* desenvolvido se mostrou eficiente para o controle de dosagem específica de amido aplicado à flotação. Os objetivos almejados, como a otimização da dosagem do amido, que é um insumo caro para o processo de beneficiamento de minério de ferro, e a redução de ferro no rejeito, foram atingidos. Por consequência, o sistema resultou, ainda, em uma melhora na recuperação mássica.

Para se chegar aos resultados obtidos, destaca-se a etapa de engenharia do sistema especialista *fuzzy*, que envolveu uma análise estatística do histórico da planta e o conhecimento dos especialistas do processo. Ambos foram a base para o desenvolvimento correto das funções de pertinência e das regras e, por consequência, da atuação do controlador avançado.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a replicação desse modelo para as demais plantas de flotação que possuem as mesmas características e o estudo da influência de novas variáveis de processo que possam compor o sistema especialista e melhorar ainda mais os resultados.

REFERÊNCIAS

BARSA, P. *Enciclopédia barsa universal*. [S.l.]: Barcelona, 2007. Citado na página 12.

CHAVES, A. P. *Teoria e prática do tratamento de minérios*. [S.l.]: Signus, 1996. Citado na página 12.

COSTA, C. P. et al. Sistema especialista fuzzy para dosagem de amina no processo de beneficiamento de minério de ferro. *ABM Week*, 2018. 2018. Citado na página 17.

CURI, A. *Lavra de minas*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2017. Citado na página 12.

DUTRA, R. Mineração–atividades e responsabilidades. *Associação Paulista de Engenheiros de Minas. Ponta Grossa/PR*, 2014. 2014. Citado na página 12.

FERREIRA, J.; LOVEDAY, B. An improved model for simulation of flotation circuits. *Minerals Engineering*, 2000. v. 13, n. 14-15, p. 1441–1453, 2000. Citado na página 14.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Engenharia Agrícola*, 2014. v. 3, p. 510–522, 2014. Citado na página 14.

GARCIA, C. *Controle de processos industriais: estratégias convencionais*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

LEITE, M. S.; FILETI, A. M. F.; SILVA, F. V. da. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e convencional em um bioprocesso. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 2020. v. 21, p. 147–158, 2020. Citado na página 14.

LIMA, N. P.; VALADÃO, G. E.; PERES, A. E. Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic flotation of an iron ore. *Minerals Engineering*, 2013. 2013. Citado na página 13.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. [S.l.]: CETEM/MCT, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

NEDER, E. E.; FILHO, L. de S. L. O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros. *Holos*, 2006. v. 1, p. 53–75, 2006. Citado na página 17.

NETO, I. M. Sistema supervisório destinado a aplicação em uma planta didática. *Minerals Engineering*, 2019. 2019. Citado na página 26.

QUINTANILLA, P. et al. A dynamic flotation model for predictive control incorporating froth physics. part i: Model development. *Minerals Engineering*, 2021. v. 173, p. 107–192, 2021. Citado na página 14.

REIS, L. A. Controle preditivo por modelo de um circuito simulado de remoagem de minério de ferro. *Universidade Federal de Ouro Preto*, 2018. 2018. Citado na página 14.

RODRIGUES, R. *Controle e Automação da Produção*. [S.l.]: Grupo A, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

SBÁRBARO, D.; VILLAR, R. D. *Advanced control and supervision of mineral processing plants*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. Citado na página 13.

SILVA, L. M. D. et al. Estado da arte dos fundamentos e ideias da lógica fuzzy aplicada as ciências e tecnologia. *Revista Brasileira de Geomática*, 2019. v. 7, n. 3, 2019. Citado na página 19.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem fuzzy*. [S.l.]: Editora Blucher, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SUN, B. et al. An integrated multi-mode model of froth flotation cell based on fusion of flotation kinetics and froth image features. *Minerals Engineering*, 2021. v. 172, p. 107–169, 2021. Citado na página 14.

TELLES, M. S. et al. Sistema especialista fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência. *Florianópolis, SC*, 2005. 2005. Citado na página 19.