

Aplicação de Sistema Especialista Fuzzy para Dosagem de Amido no Processo de Flotação de Minério de Ferro

Lucas A. Reis* Paula R. Gonçalves* Tiago C. Nunes*
Luiz R. F. Junior* Felipe N. Caldas* Marcílio C. Silva*
Wanderlei S. Sales* Guilherme A. S. Franco* Cezar G. Silva*

* Vale S/A, Mariana, MG, Brasil (e-mail: lucas.andery@vale.com,
paula.goncalves@vale.com, tiago.caixeta@vale.com,
luiz.rogerio.freitas@vale.com, fncaldas@gmail.com,
marcilio.silva@vale.com, wanderlei.sales@vale.com,
guilherme.franco@vale.com, cesar.goncalves@vale.com).

Abstract: This work details the study and application of a fuzzy expert system for the specific dosage control of starch on the flotation process of iron ore beneficiation. This advanced control manipulates the setpoint of the classic controller PID (proportional, integral, derivative), that controls the starch flow rate. The purpose of this application is to improve the specific starch dosing and reduce the content of iron in the tailing, contributing to increasing the mass yield of iron ore. The results with the active system show the achievement of the aforementioned objectives, with emphasis on the reduction of starch consumption, which is an expensive input used in the iron ore beneficiation process.

Resumo: O presente trabalho detalha o estudo e aplicação de um sistema especialista *fuzzy* para controle da dosagem específica de amido no processo de flotação do beneficiamento de minério de ferro. Esse controlador avançado manipula o *setpoint* do controlador clássico PID (proporcional, integral, derivativo), que controla a vazão de amido. O objetivo dessa aplicação é melhorar a dosagem específica de amido e reduzir o teor de ferro no rejeito, contribuindo para aumentar o rendimento em massa do minério de ferro. Os resultados com o sistema ativo mostram o atingimento dos objetivos supracitados com destaque para a redução do consumo de amido, que é um insumo caro utilizado no processo de beneficiamento de minério de ferro.

Keywords: Fuzzy Logic; Expert System; Advanced Control; Flotation; Ore Beneficiation.

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

1. INTRODUÇÃO

O processo de flotação é um método de concentração muito utilizado no beneficiamento de minério de ferro 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 econômico agregado). Segundo Lima et al. (2013), esse método de concentração utiliza as características hidrofóbica (não afinidade pela água) e hidrofílica (afinidade pela água) das partículas para separá-las. Para isso, utiliza-se máquinas de flotação (Figura 1) 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 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.

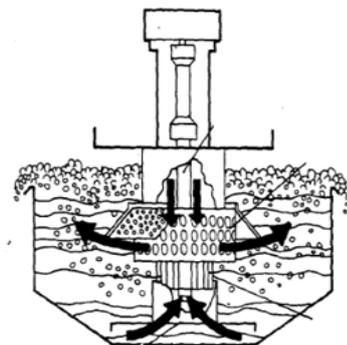


Figura 1. Máquina de flotação. (Luz et al., 2010)

Em uma primeira etapa acrescenta-se o amido, que se adere às partículas de hematita. Em seguida, a amina é adicionada, que induz a característica hidrofóbica ao quartzo, enquanto a hematita permanece hidrofílica, o que possibilita a separação dessas partículas por meio do ar injetado pelas máquinas de flotação. Vale ressaltar que o controle das variáveis do processo de flotação interfere diretamente na taxa de recuperação metalúrgica, o que afeta o teor de ferro no concentrado (Sun et al., 2021).

Melhorias no processo de flotação é de grande interesse do mercado, pois um aumento de 0,5% na recuperação metalúrgica pode ser economicamente significativo (Ferreira, 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, derivativo), que tem a robustez e a simplicidade de implementação como atributos. Porém, esse modelo tem como restrição ser um controle PI descentralizado de entrada única e saída única (SISO, *single input, single output*), onde não possibilita a inserção de restrições nas ações de controle e nem nas variáveis de processo (Reis, 2018).

Por isso, a ideia de se utilizar um controle, acima do PID, possibilita que o sistema de controle tenha múltiplas entradas (Reis et al., 2018). Como exemplo, temos 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 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 et al., 2014; Leite et al., 2010).

Além de ser amplamente utilizado em diversas áreas da indústria, a lógica *fuzzy* já vem sendo amplamente utilizada na mineração, como abordado por Ai et al. (2020), Du et al. (2019), Quintanilla et al. (2021) e Sun et al. (2021). Nunes and Soares (2021) desenvolve um controle especialista *fuzzy* e utiliza como variáveis de observação os teores de ferro e sílica para determinar as dosagens de reagentes na etapa de flotação. Já Ai et al. (2020) propõe um sistema especialista onde utiliza rede neural *fuzzy* como *soft-sensor* para suprir a falta de equipamentos de medição e utilizar na arquitetura do controlador avançado.

A partir dos exemplos de sucesso estudados, o objetivo é aplicar um sistema especialista *fuzzy* para dosagem de amido no processo de flotação de uma planta real de beneficiamento de minério de ferro. Para isso, realizou-se uma análise e exploração dos dados das variáveis de observação relevantes para o atingimento do objetivo supracitado.

Nesse trabalho é descrita a implementação de um sistema especialista por controlador *fuzzy*, manipulando o *setpoint* do controlador PID, para o controle da dosagem específica de amido em um processo de flotação. É apresentada a metodologia utilizada, bem como o desenvolvimento e os potenciais ganhos obtidos em um teste de aplicação.

2. CONTROLE DE PROCESSO DA FLOTAÇÃO

2.1 Processo de Flotação Convencional

Segundo Luz et al. (2010), 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, flotação;
- desaguamento: espessamento e filtragem;
- secagem: secador rotativo, secador de leito fluidizado;
- disposição de rejeito.

Para a obtenção do produto final, é necessária uma combinação dessas operações, sendo que a flotação tem um papel fundamental nesse contexto, por ser onde se concentra o minério considerando a proporção entre o mineral-minério (parte economicamente rentável) e o rejeito (ganga). A Figura 2 ilustra um fluxograma genérico das etapas do beneficiamento de minério, desde a extração do minério de ferro até a obtenção do produto final, proveniente da etapa de flotação.



Figura 2. Etapas do tratamento de minério. Adaptado de Sbárbaro and Del Villar (2010).

O processo de concentração por flotação é alimentado pelo produto da etapa de moagem, seguida pela etapa de classificação (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.

A partir dos estágios *rougher*, *cleaner*, *re-cleaner* e *scavenger*, a etapa de flotação utiliza como propriedades diferenciadoras a aversão das partículas pela água (hidrofobicidade) e a afinidade pela fase fluida (hidrofílicidade). Assim, é possível separar as partículas de quartzo (SiO_2) da hematita (Fe_2O_3), sendo que o concentrado do *re-cleaner* 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 and Leal Filho, 2007). A parte hidrofóbica permite que as partículas sejam coletadas pelas bolhas de ar e levadas até a superfície, integrando a camada de espuma. O concentrado que ficou alojado no inferior acompanha o fluxo de processo.

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma aplicação de sistema especialista por controlador *fuzzy* para controlar a dosagem específica de amido em um circuito de flotação convencional, que está diretamente relacionado com a qualidade final do produto esperada. Pode-se citar três variáveis de processo que influenciam na dosagem específica do amido:

- teor de ferro na alimentação;
- teor de ferro no rejeito;
- granulometria da alimentação passante em 0,045mm.

Além do controle de dosagem de amido e amina, existem outros controles de processo na flotação, mas que não influenciam diretamente no controle de dosagem dos reagentes, como: 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 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 and Shaw, 2007). Ela permite valores lógicos intermediários, chamados valores difusos, que podem assumir qualquer valor entre zero e um (Da Silva et al., 2019). Para isso, o sistema lógico *fuzzy* percorre três etapas: a fuzzyficação, a inferência e a defuzzyficação. Em Nunes and Soares (2021), essas etapas são utilizadas no projeto de controlador *fuzzy* para melhorar a eficiência do processo de flotação.

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 and Shaw, 2007). Com as regras determinadas, nessa etapa ocorrem as operações com os conjuntos *fuzzy* obtidos na etapa de

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

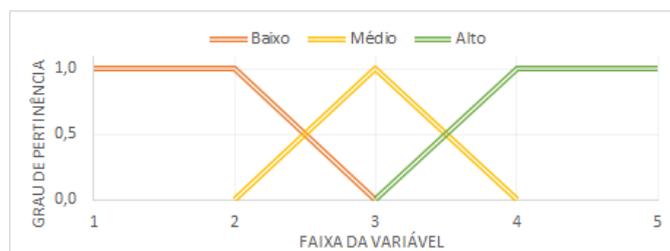


Figura 3. Exemplo de grau de pertinência de uma variável na etapa de fuzzyficação.

Por fim, o conjunto de saída passa pela etapa de defuzzyficação, que traduz as ações de controle em termos linguísticos para o mundo real (Júnior et al., 2019), 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. MATERIAIS E MÉTODOS

Implementou-se esse trabalho no processo de flotação de uma usina de beneficiamento de minério de ferro. O circuito tem como característica um fluxograma com duas linhas paralelas com os estágios *rougher*, *cleaner*, *re-cleaner* e *scavenger*.

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 e lidos pelo sistema LIMS (*Laboratory Information Management System*) em um período de quatro horas. LIMS é um *software* de gerenciamento laboratorial automatizado que armazena e controla os dados de laboratório para garantir a confiabilidade e a rastreabilidade das informações.

Uma vez armazenados no LIMS, no mesmo período de tempo, os valores das variáveis são atualizados no PIMS, (*Plant Information Management System*), que é um *software* que gerencia os dados da planta a partir do armazenamento em banco de dados e possibilita apresentar esse conteúdo em forma de tabela, gráficos de tendência, entre outras formas, a depender da necessidade. É por meio desse sistema que os dados são disponibilizados para leitura pelo sistema de controle. O fluxo da coleta dos dados até a disponibilização para o sistema de controle 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 amostragem foi de 4 horas, que é o tempo utilizado para análise laboratorial, já a coleta dos dados históricos foi de cinco meses. Na Figura 5, são ilustradas as distribuições das variáveis de entrada.

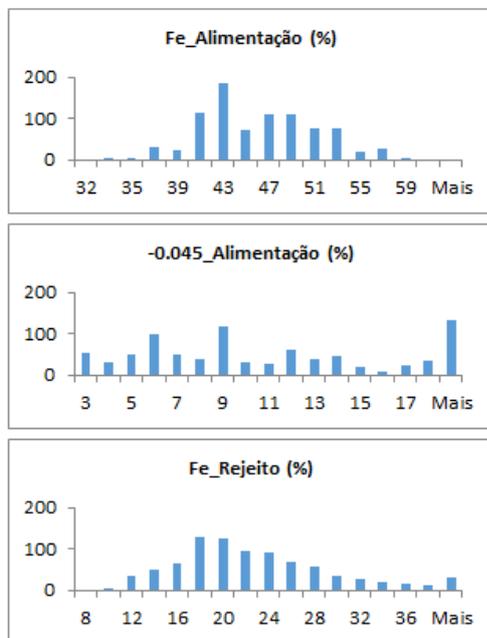


Figura 5. Histograma das variáveis de entrada.

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 são integradas no desenvolvimento do controlador *fuzzy*. Para isso, utilizam-se ferramentas nativas de CLP ou por meio de um controlador industrial capaz de executar rotinas de lógicas de controle *fuzzy*.

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.

Nesse trabalho, utilizou-se um controlador industrial da *National Instruments* para executar a lógica *fuzzy* e um CLP, família M580, da *Schneider Electric* para executar o controle de vazão de amido, feito por uma lógica PID. Para isso, estabeleceu-se a comunicação entre os ativos e o PIMS para a coleta dos dados de laboratório. 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.

4. 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, definiu-se o sistema 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 (%)

O diagrama de controle proposto está ilustrado na Figura 6. O controlador industrial, que executa o *fuzzy*, lê os valores das variáveis de observação do PIMS, faz o processamento das etapas de fuzzyficação, inferência e defuzzyficação e envia o valor calculado de dosagem de amido para o CLP, onde é executado o PID de vazão de amido, que faz a atuação na planta.

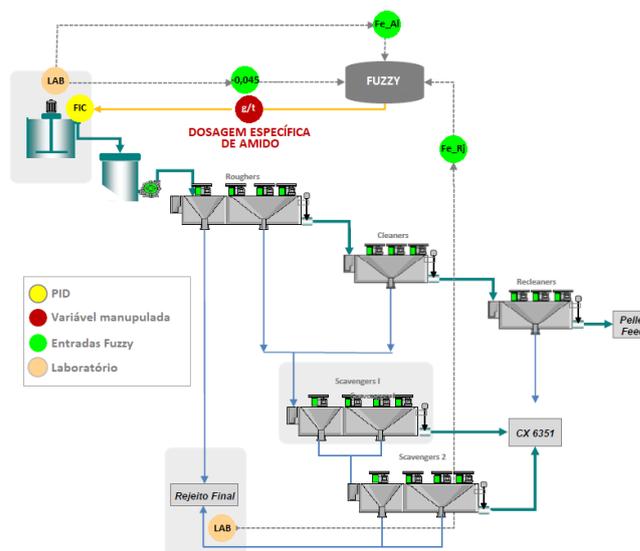


Figura 6. Diagrama de controle proposto aplicado à flotação.

A dosagem do amido no processo de flotação é realizado no condicionador, que é um tanque com agitador que recebe o material a ser flotado e mistura com o reagente para posteriormente alimentar a primeira célula de flotação. Nessa configuração, a dosagem leva alguns minutos para influenciar no processo. Após as novas leituras das variáveis de entrada, fornecidas pelo laboratório, o sistema gera uma nova ação de controle para correção da dosagem.

A partir da análise e exploração dos dados históricos das variáveis de processo foram definidas as faixas de trabalho para a criação das funções de pertinência de cada uma das variáveis do controlador. Essas funções fazem parte da etapa de fuzzyficação e são descritas em variáveis linguísticas. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 7.

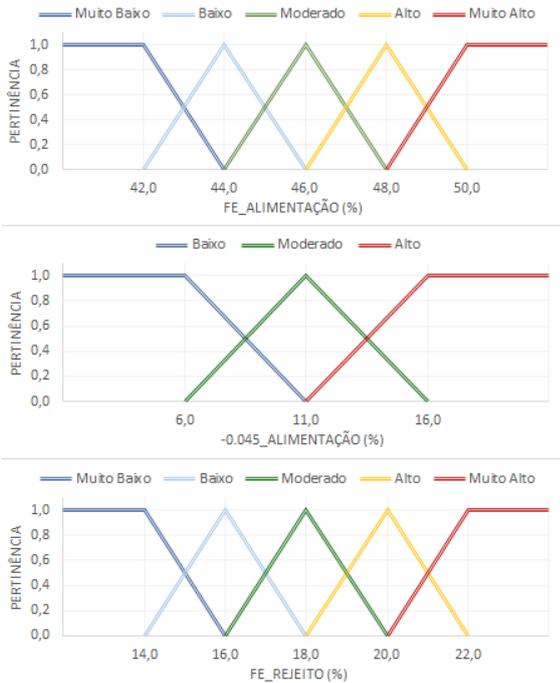


Figura 7. Funções de pertinência das variáveis de observação.

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.

Uma vez definida a vazão ideal de amido a partir das variáveis linguísticas resultantes da etapa de inferência, na defuzzyficação esse resultado é traduzido 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.

A saída do controlador gera o *setpoint* para a dosagem específica de amido no processo, que pode ser habilitada na janela de interface do supervisor. Para possibilitar essa seleção, criou-se uma tela no sistema supervisor, 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, que são definidas de acordo com as características do minério da alimentação do processo.

O sistema supervisor, também conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), permite por meio da aquisição de dados dos controladores, que informações do processo sejam coletadas e disponibilizadas (Mazzio Neto, 2019), além de enviar comandos do operador ao CLP para atuação na planta. Na sua interface com o usuário, ele contém telas gráficas que representam todo o processo produtivo e seu funcionamento é em tempo real.

%Fe_Rejeito	MUITO BAIXO		
%Fe_Alím / %-0.045_Alím	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_Alím / %-0.045_Alím	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_Alím / %-0.045_Alím	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_Alím / %-0.045_Alím	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_Alím / %-0.045_Alím	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

Figura 8. Conjunto de regras fuzzy.

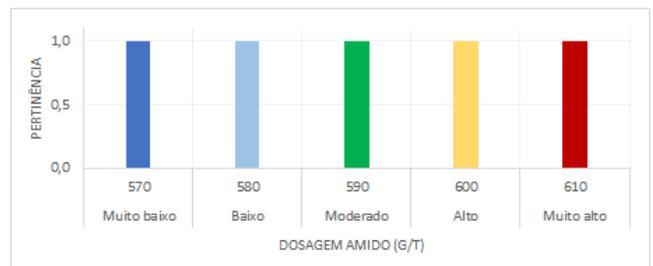


Figura 9. Faixas de dosagem do amido para defuzzyficação.



Figura 10. Tela de seleção no sistema supervisor.

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

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos com um teste da implementação do sistema especialista *fuzzy* para dosagem de amido no processo de flotação demonstraram excelentes indicadores como: redução do teor de ferro no rejeito, aumento na recuperação mássica e redução no consumo de amido.

Está ilustrado na Figura 11 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.

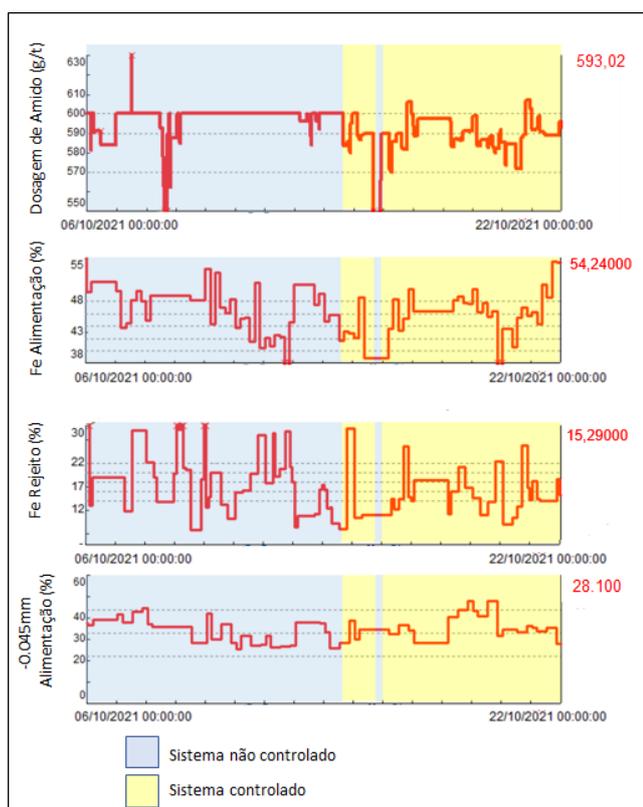


Figura 11. Comportamento das variáveis de processo antes e depois da ativação do sistema.

Observa-se que com o sistema especialista inativo, o *set-point* da dosagem variava-se pouco, o que demonstra uma ineficiência no controle de dosagem. Com a ativação do sistema especialista *fuzzy*, a adição de reagente passou a ser controlada de forma a calcular a vazão ideal 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.

Como potenciais ganhos com a utilização do sistema especialista observou-se, durante o período de teste, um aumento na recuperação mássica de 58,74% para 61,43% e uma redução de ferro no rejeito de 22,98% para 18,50%. Em relação ao consumo específico de amido houve uma redução de 545,95g/t para 539,75g/t. O que evidencia o sucesso da aplicação de um controlador *fuzzy* aplicado acima do controlador PID da camada regulatória da planta.

6. CONCLUSÃO

Com a avaliação dos resultados, conclui-se que o sistema especialista *fuzzy* desenvolvido se mostrou eficiente para o controle de dosagem específica de amido aplicado à flotação e atingiu o objetivo. Com o sistema ativo, houve uma melhora na recuperação mássica e aumento na estabilidade operacional. Outro fator importante foi a redução do consumo de amido, que é um insumo caro utilizado no processo de beneficiamento de minério de ferro e pode representar uma redução no custo de produção.

Para se chegar aos resultados obtidos, destaca-se a etapa de engenharia do sistema especialista *fuzzy*, que envolveu uma análise e exploração dos dados históricos da planta e a transferência do conhecimento dos especialistas do processo para o sistema inteligente. Ambos foram a base para o desenvolvimento correto das funções de pertinência e das regras e, por consequência, a dosagem adequada de amido ao processo.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros, o estudo da influência de novas variáveis de processo que possam compor o sistema especialista e o investimento em analisadores *on-line* com o objetivo de obter os valores das variáveis de observação em menor tempo do que o disponibilizado por análise laboratorial.

REFERÊNCIAS

- Ai, M., Xie, Y., Xie, S., Zhang, J., and Gui, W. (2020). Fuzzy association rule-based set-point adaptive optimization and control for the flotation process. *Neural Computing and Applications*, 32(17), 14019–14029.
- Costa, C.P., Caldas, F.N., Couto, P.H.d.M., and Caixeta, T. (2018). Sistema especialista fuzzy para dosagem de amina no processo de beneficiamento de minério de ferro.
- Da Silva, L.M., Gonçalves, R.M., Ferreira, L.M., Aristides da Silva, E.J., and Da Silva, B.Q. (2019). Estado da arte dos fundamentos e ideias da lógica fuzzy aplicada às ciências e tecnologia. *Revista Brasileira de Geomática*, 7(3), 149.
- Du, S., Wu, M., Chen, L., Zhou, K., Hu, J., Cao, W., and Pedrycz, W. (2019). A fuzzy control strategy of burn-through point based on the feature extraction of time-series trend for iron ore sintering process. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2357–2368.
- Ferreira, JP e Loveday, B. (2000). An improved model for simulation of flotation circuits. *Minerals Engineering*, 13(14-15), 1441–1453.
- Garcia, A.P., Cappelli, N.L., and Umez, C.K. (2014). Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Engenharia Agrícola*, 34(3), 510–522.
- Júnior, M.P., Bitaraes, S.M., Euzébio, T.A., and Belo Horizonte, M. (2019). Projeto de controle fuzzy para aprimorar a eficiência energética de secadores rotativos.
- Leite, M.S., Fileti, A.M.F., and Silva, F.V.d. (2010). Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e convencional em um bioprocesso. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, 21, 147–158.
- Lima, N.P., Valadão, G.E., and Peres, A.E. (2013). Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic

- flotation of an iron ore. *Minerals Engineering*, 45, 180–184.
- Luz, A.B.d., Sampaio, J.A., and França, S.C.A. (2010). Tratamento de minérios.
- Madazio Neto, I. (2019). Sistema supervisório destinado a aplicação em uma planta didática.
- Neder, E.E. and Leal Filho, L.d.S. (2007). O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros. *Holos*, 1, 53–75.
- Nunes, F.A.Q.P. and Soares, G.L. (2021). Fuzzy system to increase efficiency in the flotation process in a mining plant.
- Quintanilla, P., Neethling, S.J., Navia, D., and Brito-Parada, P.R. (2021). A dynamic flotation model for predictive control incorporating froth physics. part i: Model development. *Minerals Engineering*, 173, 107192.
- Reis, L., Júnior, Ê., and Euzébio, T. (2018). Hardware-in-the-loop testing platform of a predictive controller applied to a simulated regrinding circuit. In *6th International Congress on Automation in Mining. GECAMIN*.
- Reis, L.A. (2018). Controle preditivo por modelo de um circuito simulado de remoagem de minério de ferro.
- Sbárbaro, D. and Del Villar, R. (2010). *Advanced control and supervision of mineral processing plants*. Springer Science & Business Media.
- Simões, M.G. and Shaw, I.S. (2007). *Controle e modelagem fuzzy*. Editora Blucher.
- Sun, B., Yang, W., He, M., and Wang, X. (2021). An integrated multi-mode model of froth flotation cell based on fusion of flotation kinetics and froth image features. *Minerals Engineering*, 172, 107169.
- Telles, M.S. et al. (2005). Sistema especialista fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência.