DOI: 10.48011/asba.v2i1.1566

Sistema especialista fuzzy de dosagem de floculante aplicado no controle da turbidez em espessamento de lamas em minério de ferro

Cássio Pascoal Costa * **Gabriel Duarte Lott** **
Tiago Caixeta Nunes *** **Thiago Antonio Melo Euzébio** ****

* *Vale S/A, Gerência de Automação Sudeste, Serra do Esmeril, Itabira, MG, Brasil, (e-mail: cassio.costa@vale.com).*
** *Vale S/A, Gerência de Automação Sudeste, Serra do Esmeril, Itabira, MG, Brasil (e-mail: gabriel.lott@vale.com).*
*** *Vale S/A, Gerência de Automação Sudeste, Serra do Machado, São Gonçalo do Rio Abaixo, MG, Brasil, (e-mail: tiago.caixeta@vale.com).*
**** *Instituto Tecnológico Vale, Avenida Juscelino Kubitschek, 31, Bauxita, Ouro Preto, MG, Brasil (e-mail: thiago.euzebio@itv.org).*

Abstract: The thickening process is a solid and liquid separation operation widely used in the mineral industry to maximize water recovery. This paper evaluates the sedimentation and turbidity effects of the mud in laboratory experiments for different flocculant levels in iron ore concentration. An expert system is developed with fuzzy rules to improve the specific consumption of flocculant and guarantee the recovered water quality. As an input of the system, the measurement of turbidity supplies online information for the system to increase ultra-fine minerals recovery. Results show a 17% reduction of average specific consumption of flocculant and a 35% reduction of turbidity.

Resumo: O processo de espessamento é uma operação de separação sólido e líquido amplamente utilizada na indústria mineral, que visa maximizar a recuperação de água. Neste contexto, este artigo propõe inicialmente a realização de ensaios em bancada para avaliar os efeitos do floculante na sedimentação e turbidez da lama gerada na concentração de minério de ferro. Baseado nos resultados dos testes, foi implementado um sistema especialista utilizando lógica Fuzzy, com o objetivo de otimizar o consumo específico de floculante e garantir a qualidade da água de processo recuperada. Empregou-se também como variável de entrada no sistema, a medição online de turbidez, que contribui para aumentar a recuperação de partículas ultrafinas. Obteve-se como resultado uma redução significativa de 17% no consumo específico médio de floculante e uma diminuição de 35% na turbidez.

Keywords: Sludge; Flocculant; Turbidity; Expert System; Fuzzy.
Palavras-chaves: Lama; Floculante; Turbidez; Sistema Especialista; Fuzzy.

1. INTRODUÇÃO

O processo de espessamento tem sido um dos principais métodos de separação sólido e líquido para a indústria de mineração (Gladman et al., 2006). Muitas indústrias utilizam este processo de separação para recuperar água que será reutilizada em seus processos. Esta operação envolve a separação de duas fases: uma fração com alta concentração de sólidos, e uma fração líquida (Sorsamäki e Nappa, 2015).

Nas usinas de concentração é usual obter água recuperada com características físicas e químicas compatíveis com o processo, a fim de assegurar o controle da operação. Diversas configurações dos circuitos que promovem a recuperação de água podem ser aplicadas nos minerais beneficiados. Segundo Luz et al. (2010), de forma geral, levam-se em conta os seguintes fatores:

- disponibilidade limitada de água nova;
- custo elevado do tratamento da água para retorno ao meio ambiente;
- redução dos custos operacionais devido à recuperação de reagentes residuais;
- custo evitado com a redução no bombeamento da água nova por longas distâncias;
- remoção de sólidos residuais na água, principalmente na água reutilizada no processo que proporcionam desgastes prematuros de tubulações e válvulas de controle;
- cumprimento das exigências legais do meio ambiente.

Para o espessamento é importante ressaltar que o tamanho, forma e propriedades físicas das partículas influenciam no processo de separação (Sorsamäki e Nappa, 2015).

Segundo Sorsamäki e Nappa (2015), as partículas muito finas, com tamanho médio inferior a 1μm, são denominadas coloides, e partículas entre 1μm a 10μm são denominadas ultrafinos ou sistema quase coloidais. As lamas são exemplos de misturas de sistemas coloidais e ultrafinos. Esta característica é considerada como problema no tratamento do rejeito (Andrade e França, 2015). Devido à sua baixa velocidade de sedimentação, apresentam dificuldade para sedimentar. Tal processo, apresenta também grande quantidade de materiais dissolvidos e suspensos, ocasionando um aspecto de alta coloração e turbidez, respectivamente, conforme Vaz et al. (2010).

Uma característica de todos os sistemas coloidais é que a área superficial específica de contato entre as partículas e o meio de dispersão é grande (Shaw, 1980), em geral 10,0 m^2/g. Nesta condição, as forças gravitacionais e viscosas tornam-se desprezíveis, frente às forças interfaciais predominantes: atração de *van der Waals* e repulsão (atração eletrostática) (Shaw, 1980).

Diversos reagentes são utilizados no processo de espessamento, entretanto os coagulantes e floculantes são os mais empregados na mineração. Os processos de coagulação e floculação tem por finalidade a remoção de substâncias coloidais. Segundo Wang et al. (2018), o uso combinado de coagulante e floculante pode contribuir para melhorar o desempenho no processo de espessamento.

Na coagulação a cinética entre as partículas é estabelecida principalmente por ligações de atração de *van der Waals*, responsável pela compactação da camada difusa, formando o coagulo. Os coágulos são geralmente polímeros lineares, não filamentosos e pouco ramificados.

Na floculação, as partículas, anteriormente dispersas, estabelecem ligações de pontes filamentosas de moléculas poliméricas (muito ramificadas com elevada cadeia carbônica) que se propagam, com surgimento e crescimento rápido de flocos.

2. ESPESSAMENTO DE LAMAS

Os fluxos do processo de espessamento são representados conforme Figura 1. Verifica-se que a alimentação ocorre na região central, onde as partículas mais densas sedimentam com maior velocidade que as menos densas. As partículas sedimentadas são recolhidas no ápice da parte cônica e são nomeadas de *underflow*, enquanto o líquido clarificado é denominado *overflow* (Guimarães, 2010). O termo clarificação é utilizado para definir a operação em que a sedimentação das partículas é empregada com o objetivo principal de produzir um líquido clarificado (isento de sólidos).

Com relação às estratégias de controle aplicadas no espessamento de lamas no minério de ferro, em sua maioria, utiliza-se uma ou duas variáveis dependentes para controlar as variáveis independentes. São amplamente utilizadas a dosagem específica de floculante e o controle de densidade do *underflow*, manipulando-se a velocidade de bomba como variável independente. As variáveis dependentes incluem torque, turbidez do *overflow*, nível de interface de água ou sólidos (profundidade do leito), velocidade de sedimentação de sólidos e viscosidade no *underflow*.

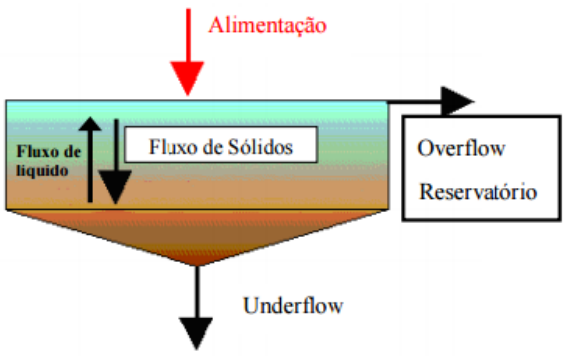

Figura 1. Fluxo Esquemático de Espessadores. Fonte: Adaptado de Guimarães (2010).

Existem na literatura vários modelos para controle de espessamento com aplicações industriais. Segundo Betancourt et al. (2014) e Bürger et al. (2017), os modelos dinâmicos para o processo de espessamento são não lineares e difíceis de controlar. Diversos algoritmos têm sido utilizados para controle de espessadores de lamas com graus variados de sucesso (Segovia et al., 2011). Estruturas de controle baseadas em controladores PI padrões combinadas com outras propostas podem ser verificadas em Gupta e Yan (2016), Diehl (2008).

Os sistemas especialistas baseados em regras também são utilizados nos controles de espessadores. Schoenbrun et al. (2002) propõe uma estrutura com ação de otimizar o desempenho do espessador e outra para situações de emergência do processo, como aumento de torque e princípios de obstrução. Karageorgos et al. (2009) relataram a aplicação da abordagem tradicional do sistema especialista em conjunto com técnicas multivariáveis e desacoplamento.

Diante deste cenário, uma aplicação de sistema de controle no processo de espessamento de lamas pode contribuir para aumentar a recuperação de ultrafinos de minérios, além de disponibilizar uma melhor qualidade da água recuperada e estabilidade ao processo. Lembrando que uma instabilidade neste processo poder levar uma quantidade maior de sólidos presente na água recuperada. Uns dos efeitos colaterais do aumento de sólidos na água recuperada seriam desgastes prematuros em tubulações e válvulas de controle que utilizam tal água.

Neste trabalho, além do embasamento teórico, combinam-se dados experimentais de laboratório e industriais. De acordo com os pressupostos assumidos, o objetivo desta pesquisa é implementar um sistema de controle baseado em conjuntos de regras fuzzy, para controle da turbidez no espessador de lamas de minério de ferro, manipulando-se a dosagem específica de floculante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostragem e Reagente

A amostra utilizada neste estudo foi uma lama gerada no processo do 1º e 2º estágio da deslamagem de uma usina

de beneficiamento de minério de ferro. Tal amostra representa uma caracterização da alimentação do espessador de lamas, que corresponde de 8 a 12% da massa processada na usina. Por ano, mais de 1,8 milhões de toneladas de lamas são direcionadas para uma barragem de rejeito, sendo recuperados no *overflow* do espessador de lamas mais de 10.000 m^3/h de água.

Para avaliação do comportamento e representação industrial das amostras foram realizadas diversas etapas de caracterização como análise química da lama, percentual de sólidos e densidade da polpa, pH da solução, turbidez do sobrenadante e velocidade de sedimentação para o *underflow*. As caracterizações realizadas em bancadas são importantes para avaliação das restrições físicas reais do espessador como, por exemplo, percentual de sólidos ou densidade do underflow e velocidade de sedimentação além da característica química da provável lama a ser enviada para a barragem de rejeito.

O reagente utilizado nos testes foi um floculante típico industrial que é um tipo de polímero (poliacriamida) com alto peso molecular e carga elétrica aniônica. O floculante foi preparado incialmente em uma solução cuja concentração em peso era de 0,01%, semelhante com o praticado no preparo para a dosagem no processo industrial.

Para o processo industrial foi adquido uma instrumentação analítica para medição de turbidez e nível de interface de água clarificada no espessador de lamas.

3.2 Ensaios em bancadas

Com o objetivo de identificar as influências no comportamento do processo indutrial, foram planejados os ensaios experimentais utilizando 9 provetas de 2.000ml de polpa, com percentual de sólidos de 1,53%, e variando três níveis de dosagens de floculantes combinados com três níveis de pH operacionais, sendo os resultados mostrados conforme Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de laboratório na lama de minério de ferro.

Ensaio	Dosagem (g/t)	pH	%Sólidos Final	Vel. Sedim. (m/h)	Turbidez (NTU)
1	7,5	8,20	33,95	12,37	645
2	15,0	8,21	33,92	25,31	600
3	22,5	8,21	30,62	31,91	415
4	7,5	7,88	35,10	13,71	605
5	15,0	7,91	35,71	27,37	398
6	22,5	7,93	36,72	32,00	320
7	7,5	7,62	37,24	15,62	195
8	15,0	7,60	37,98	21,09	164
9	22,5	7,59	41,16	41,71	62

A Figura 2 apresenta o comportamento da turbidez nos testes realizados, sendo agrupados de acordo com o pH na Figura 2a e dosagem específica de floculante na Figura 2b.

Observa-se uma redução na turbidez com o aumento da dosagem de floculante e a redução de pH, sendo a dosagem de floculante em 22,5 g/t e pH em 7,6 ocasionando a menor turbidez de 62 NTU. Na Figura 2a percebe-se que para pH de 8,2 e 7,9 com uma dosagem baixa de floculante 7,5 g/t, a turbidez mantem-se elevada, com partículas dispersas na solução, não rompendo a barreira

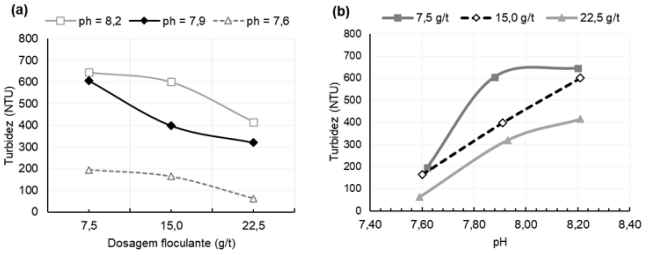

Figura 2. Comportamento agrupado da caracterização dos ensaios na lama de minério de ferro analisada.

energética, predominando as forças repulsivas e deixando o sistema estabilizado mesmo depois de 24 horas de repouso. A Figura 2b demonstra que um pH de 7,6 obtém uma turbidez ótima mesmo com dosagens de floculante baixa, mostrando que a redução de pH é uma variável que impacta sensivelmente na redução da turbidez, com valores abaixo de 250 NTU, desejados pelo processo atual.

O ensaio conforme Torquato e Luz (2011) para velocidade de sedimentação é mostrado na Figura 3 com o intuito de avaliar os mesmos efeitos combinatórios de variações de dosagem de floculante e pH na sedimentação.

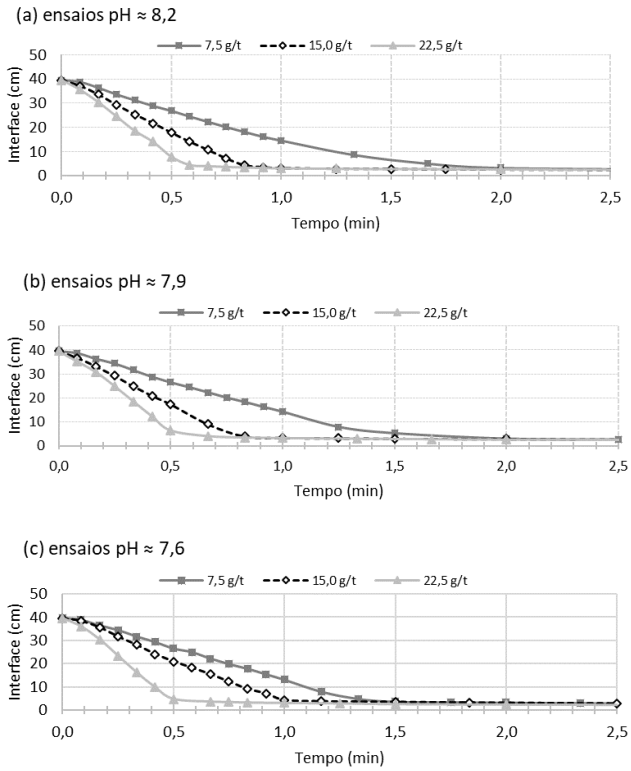

Figura 3. Testes sedimentação realizados com a lama de minério de ferro amostrada.

A Figura 3 mostra as curvas de sedimentação (zona constante) da fase sólida nos ensaios realizados. Foram agrupados também de acordo com os valores de pH e dosagem de floculante. Observa-se nas Figuras 3a, 3b, 3c que para uma mesma faixa de pH variando apenas a dosagem de floculante, o aumento de floculante impacta diretamente na curva de sedimentação, as quais ocorreram

de forma mais acelerada, com zona constante ocorrendo em menos de 1 minuto.

3.3 Modelo proposto para tomada de decisão

Para desenvolvimento das regras do sistema especialista foram realizados ensaios em bancada, e geradas inicialmente as dosagens de floculante observando-se a turbidez e percentual de sólidos no *underflow*, para um ponto determinado de operação de pH.

Foi desenvolvida uma regressão múltipla dos ensaios com os dados, conforme Tabela 2, para simular uma matriz de tomada de decisões. Para reduzir o modelo foi definido um ponto de operação fixo de pH em 7,9, a qual é uma condição normal de operação.

Tabela 2. Regressão multipla para predição da dosagemde floculante observando pH, %sólidos e turbidez.

Estatatística	
R múltiplo	0,84519
R-Quadrado	0,71434
R-quadrado ajustado	0,54295
Erro padrão	4,39108
Observações	9

Coeficientes	
Interseção	-305,17589
pH	38,86075
%Sólidos	0,83640
Turbidez	-0,04495

Na Figura 4, foi gerada a tabela simulada com valores de turbidez e percentual de sólidos no *underflow*. Valores estes que estão condizentes com valores encontrados em processo de espessamento de lamas. Verifica-se na tabela que uma dosagem de floculante mais elevada implicará uma turbidez menor e maior percentual de sólidos no *underflow*, o que irá garantir uma maior recuperação de ultrafinos. Para condição proposta na Figura 4 as dosagens específicas de floculante variam de 6,7 g/t a 19,0 g/t próximo aos praticados em operação.

pH	Sólidos									
7,9	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5	30,0	Color Map
Turbidez 175	15,7	16,1	16,5	17,0	17,4	17,8	18,2	18,6	19,0	19,0
200	14,6	15,0	15,4	15,8	16,3	16,7	17,1	17,5	17,9	17,0
225	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	16,0	16,4	16,8	14,0
250	12,3	12,8	13,2	13,6	14,0	14,4	14,8	15,3	15,7	13,0
275	11,2	11,6	12,0	12,5	12,9	13,3	13,7	14,1	14,6	12,0
300	10,1	10,5	10,9	11,3	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	11,0
325	9,0	9,4	9,8	10,2	10,6	11,1	11,5	11,9	12,3	9,5
350	7,8	8,3	8,7	9,1	9,5	9,9	10,3	10,8	11,2	8,5
375	6,7	7,1	7,5	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6	10,1	6,7

Figura 4. Simulação inicial de dosagem de floculante com base nos ensaios realizados.

A proposta desenvolvida para tomada de decisão do sistema especialista em função das condições do processo e valores de dosagens de floculante limitados entre 8 a 15 g/t, é ilustrada conforme Figura 5. Algumas adaptações foram realizadas como a inversão do sentido das faixas de turbidez e substituição do %sólidos do underflow pela relação linear entre as vazões mássicas de entrada pela saída do espessador, comportamento esperado similar. A inversão das faixas de turbidez é fundamental para uma correta tomada de decisão a ser aplicada ao processo, onde, por exemplo, o sistema deve tomar decisões de reduzir a dosagem para turbidez mais baixa.

pH	Relação Massa Entrada / Saída									
7,9	0,60	0,68	0,75	0,83	0,90	0,98	1,05	1,13	1,20	Color Map
Turbidez 200	8,0	8,3	8,7	9,1	9,5	9,9	10,3	10,8	11,2	15,0
225	9,0	9,4	9,8	10,2	10,6	11,1	11,5	11,9	12,3	13,8
250	10,1	10,5	10,9	11,3	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	12,7
275	11,2	11,6	12,0	12,5	12,9	13,3	13,7	14,1	14,6	11,5
300	11,2	11,6	12,0	12,5	12,9	13,3	13,7	14,1	14,6	10,3
325	13,5	13,9	14,3	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	9,2
350	14,6	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	8,0

Figura 5. Estrutura proposta de modelo para tomada de decisão do sistema especialista.

4. CONTROLADOR FUZZY

A lógica fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e consiste em três operações básicas, a fuzzificação, a inferição e a desfuzzificação, conforme Figura 6.

Figura 6. Estrutura de um controlador Fuzzy.

O sistema fuzzy para dosagem específica de floculante foi desenvolvido em função da turbidez e a relação de massa estimada de entrada pela massa de saída do espessador de lamas, conforme ilustrado na Figura 7.

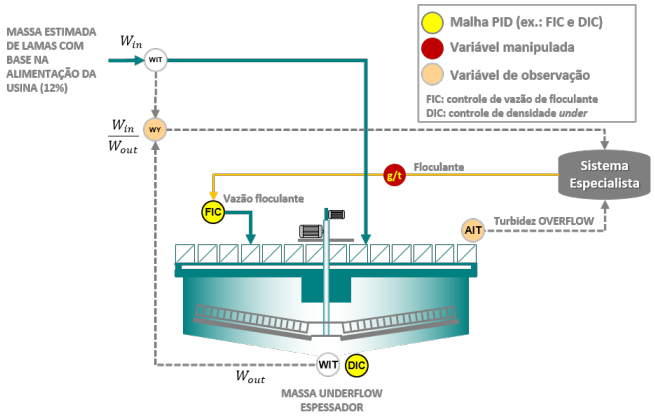

Figura 7. Estrutura proposta de controle para o desenvolvimento do sistema especialista de dosagem de floculante.

Os resultados gerados pelos testes em bancada no laboratório contribuem para direcionamento de decisões operacionais mais assertivas na proposta do desenvolvimento no projeto de controle avançado no espessamento. A relação entre as massas de entrada e saída pode ser desenvolvida com base no comportamento esperado no percentual de sólidos do *underflow*, conforme verificado durante os ensaios.

Na prática, para o processo atual, o percentual de sólidos no *underflow* do espessador de lamas será influenciado pelo controle de densidade existente. Tal controle de densidade tem como objetivo garantir um teor ideal de sólidos no rejeito final e uma recuperação de água mais estável.

Todas as malhas de controle foram ajustadas sendo algumas com estratégias do tipo *overrides* para condições de restrições como de vazões mínimas de bombas para evitar possíveis entupimentos. Existem também lógicas de automatismos para garantir que não ocorra condições que comprometam a integridade do processo, como a recirculação para densidades baixas e elevação do braço raspador com aumento de torque.

Anteriormente, a dosagem específica de floculante era calculada em g/t de massa alimentada e realizada sobre a massa estimada da alimentação do espessador, sendo considerado um valor fixo 12% da massa total alimentada da usina, que é um valor de projeto da partição de lama que será alimentada no espessador.

No controlador proposto, calcula-se a relação entre a vazão mássica estimada de entrada e a vazão mássica de saída do *underflow* do espessador (valores observados entre 0,6 a 1,2), ao invés da massa estimada da alimentação, para realizar uma dosagem específica de floculante (g/t massa alimentada) possibilita corrigir desvios e antecipar, em conjunto com a turbidez, alguns comportamentos na vazão de saída. Exemplificando, tal relação, utilizada de forma combinada com a informação de turbidez, pode representar uma mudança na quantidade de sólidos dispersos no espessador ou uma diminuição de sua taxa de sedimentação.

A Figura 8 ilustra a montagem do medidor de turbidez TURBIMAX-CUS51D da *Endress Hauser* no espessador de lamas, sendo instalada entre a chapa do anel de retenção da espuma e a borda com *overflow* da água recuperada.

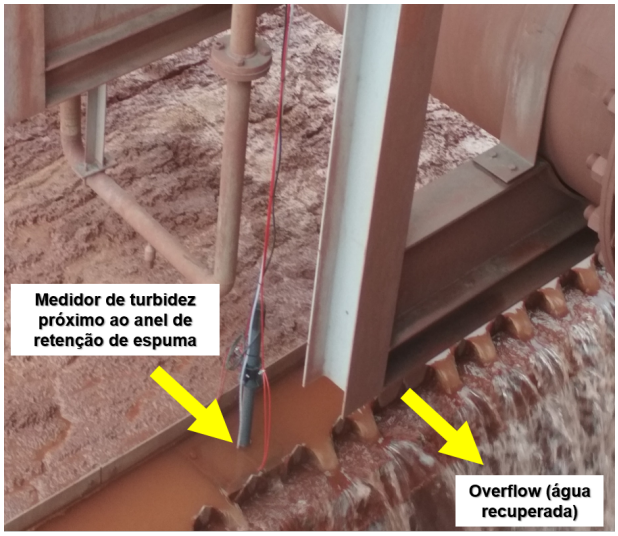

Figura 8. Montagem medidores de turbidez no espessador de lamas.

A Figura 9 ilustra o comportamento temporal do medidor de turbidez. O medidor instalado possui limpeza automática, o que garante uma maior disponibilidade e confiabilidade da informação, requerendo uma menor hora de manutenção e operação para manter o funcionamento do ativo.

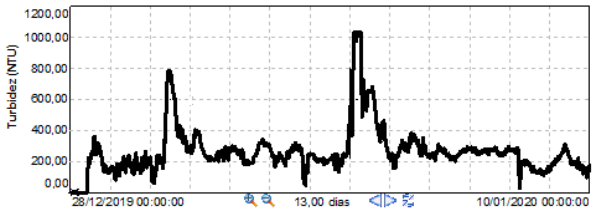

Figura 9. Medição de turbidez do espessado de lamas.

As proteções do espessador, como aumento do torque e elevação do braço raspador, são mantidas no sistema de automação. Define-se, dessa forma, limites mínimo e máximo de dosagem de floculante para evitar riscos à operação do equipamento e redução da exposição de pessoas na área. Os valores dos intervalos correspondentes aos diferentes níveis de cada variável são apresentados na Figura 10

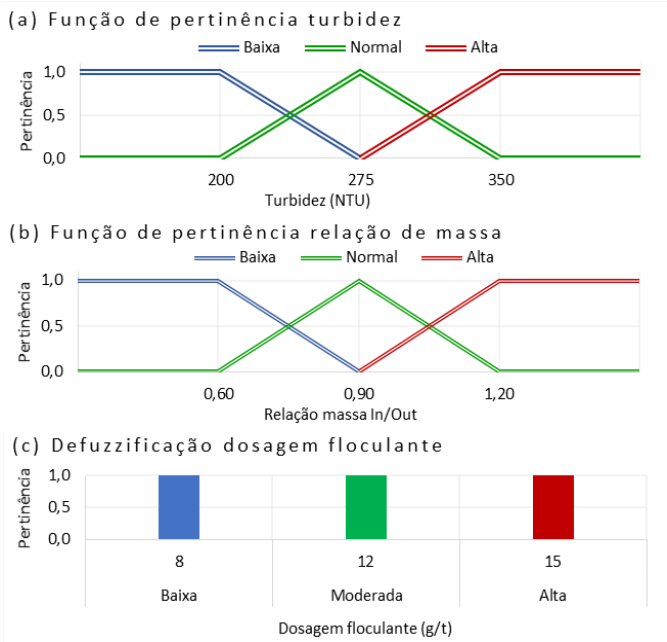

Figura 10. Estrutura fuzzy: (a) e (b) funções de pertinências variáveis de entrada e (c) defuzzificação função singleton da saída.

O conjunto de regras estabelecidas para a inferição da saída do controlador fuzzy, baseada nos dados adaptados dos ensaios em bancada, é representado conforme Tabela 3.

A simulação da superfície de soluções do sistema especialista desenvolvido, com todas as faixas praticadas pelo processo, é representada conforme Figura 11. Observa-se na superfície da solução uma tendência de dosar mais floculante com turbidez maior e relação entre as massas maior. Uma relação entre massas maior mostra que houve um aumento de massa na entrada em relação a massa do *underflow*. Este desvio pode indicar um tempo de residência menor da polpa dentro do espessador. Nesse cenário, faz-se necessário aumentar a dosagem de floculante, acelerando a velocidade de sedimentação e reduzindo possíveis efeitos no aumento da turbidez.

Tabela 3. Inferição das regras para controlador fuzzy.

Entradas		Saída Controlador
Relação Massa	Turbidez	Dosagem Floculante
Baixa	Baixa	Baixa
Baixa	Normal	Baixa
Baixa	Alta	Moderada
Normal	Baixa	Baixa
Normal	Normal	Moderada
Normal	Alta	Moderada
Alta	Baixa	Moderada
Alta	Normal	Alta
Alta	Alta	Alta

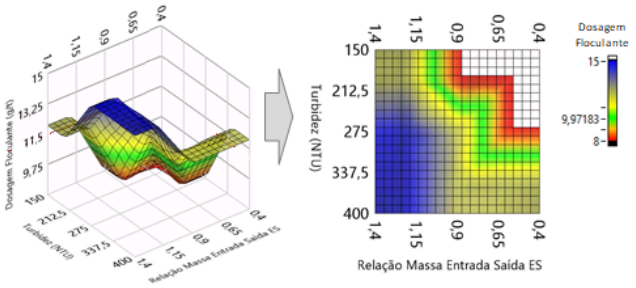

Figura 11. Superfície simulação do sistema especialista fuzzy de dosagem de floculante.

5. RESULTADOS

A aplicação do controlador Fuzzy no processo apresentou um comportamento adequado para resultados do consumo de floculante, qualidade da água recuperada e estabilidade do processo.

Verfica-se na tabela 4 um consolidado estatístico de algumas das variáveis de processos para o sistema especialista de dosagem de floculante desenvolvido, comparando o período do sistema Ligado (ON) vs Desligado (OFF).

Tabela 4. Consolidado estatístico para comparativo ON vs OFF do sistema de controle avançado (Período: 01/11/2019 a 18/05/2020).

Itens avaliados	OFF	ON	Variação
Tempo operação (dias)	63,37	68,13	-
Massa alimentada Usina (t/h)	2.401	2.380	-21,51
Dosagem específica (g/t)	11,67	9,65	-2,02
Turbidez (NTU)	298	192	-106
Densidade undeflow (t/m^3)	1,180	1,189	0,008
pH	8,13	8,02	-0,12
Relação Massa	0,83	0,79	-0,04

A operação do controle avançado obteve uma redução de 17,3% que representa em média 2,02 g/t de consumo específico de floculante. Houve também uma redução de 35,5% na turbidez atingindo um valor médio de 192 NTU. Todos os itens proporcionaram um aumento da capacidade de recuperação de água e com melhor qualidade, menos turva.

A Figura 12 mostra um comparativo da dosagem de floculante realizada pelo operador e pelo sistema especialista desenvolvido.

Um dos problemas deparados no decorrer do desenvolvimento do trabalho foi a definição do ponto mais adequado

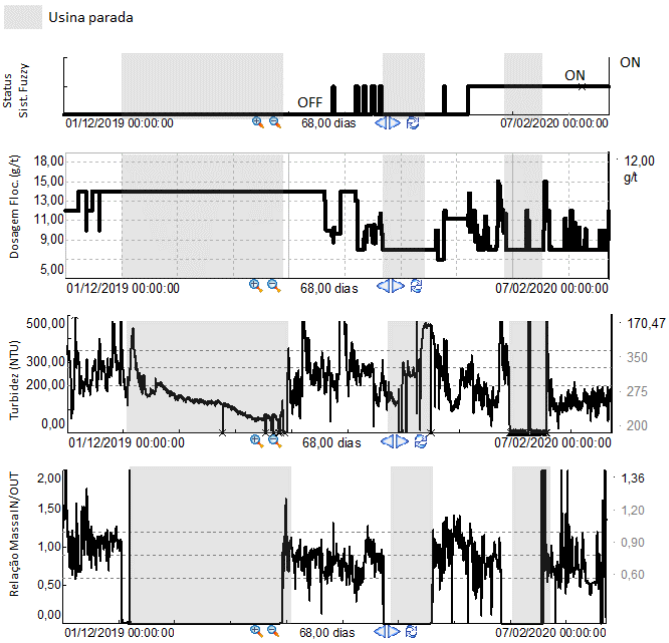

Figura 12. Comportamento das variáveis de processo com sistema de controle avançado Ligado (ON) vs Desligado (OFF).

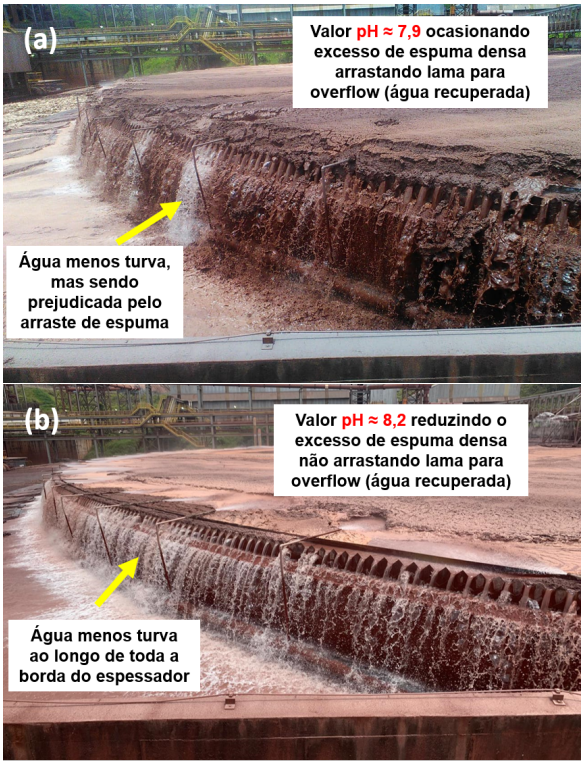

Figura 13. Efeito da variação do ponto de operação de pH ocassionando espuma densa sobrenadando no espessador de lamas.

de operação do controle de pH. A princípio foi definido um valor fixo em torno de 7,9. Contudo, observa-se em certos momentos o aparecimento de espumas densas sobrenadando no espessador. A espuma é gerada em decorrência de uma grande quantidade de amina residual, provinda do processo de flotação, não degradada na água recuperada.

A utilização de CO_2 para redução do pH pode ser benéfico para a redução da turbidez, mas gera em contrapartida uma maior quantidade de espuma sobrenadante no espessador.

A Figura 13 ilustra um comportamento atípico onde ocorre a operação do pH em 7,9 com baixa turbidez e com deslocamento da espuma densa não contida pelos sprays de água até o anel de retenção, sendo arrastada para o *overflow* da caixa de água recuperada. Após a observação desse efeito, decidiu-se aumentar o ponto de operação do pH para 8,2, o que minimizou o efeito da espuma densa sobrenadante próximo ao anel de retenção, elevando um pouco a turbidez, mas em valores dentro da faixa esperada para o processo. Logo o ponto de operação fixo de pH proposto inicialmente nem sempre será suficiente para conter a situação relatada, sendo necessária para uma implementação futura uma reformulação do controlador fuzzy para a manipulação do setpoint de pH além da dosagem específica de floculante.

6. CONCLUSÃO

O sistema especialista desenvolvido apresentou um desempenho satisfatório para o controle do espessador de lamas. Os ensaios prévios realizados em laboratório e a instrumentação analítica adquirida para o projeto se mostraram fundamentais para garantir uma boa performance do controlador implementado.

No período avaliado com o sistema especialista habilitado, verificou-se uma operação mais estável na turbidez, possibilitando uma redução significativa no consumo específico de floculante, sem afetar a qualidade da água. Entretanto, a ocorrência de amina residual na água recuperada reduz a utilização do controle de pH com valor mais baixo. Foi observado que a utilização de CO_2 por um tempo prolongado propicia a formação de espuma sobrenadante no espessador. Uma proposta de solução para esse problema seria a instalação de sprays de água próximo à alimentação no *feed well*, o que possibilitaria um abatimento mecânico da espuma. Outra solução interessante seria o desenvolvimento de um controle avançado utilizando também o pH, mas sendo observado os efeitos positivos (maior facilidade na clarificação da água recuperada) e negativos (formação de espuma densa) no processo.

Sugere-se também, em trabalhos futuros, o desenvolvimento de controles preditivos multivariáveis utilizando modelos fenomenológicos em conjunto com as informações analíticas de forma a inferir o comportamento do processo de floculação e compactação de sólidos, visto que são processos com tempos longos de respostas.

REFERÊNCIAS

Andrade, L.S. e França, S.C.A. (2015). Estudo do efeito de floculantes rheomax no tratamento do rejeito de níquel.

Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., e Farås, S. (2014). Modeling and controlling clarifier–thickeners fed by suspensions with time-dependent properties. *Minerals Engineering*, 62, 91–101.

Bürger, R., Careaga, J., e Diehl, S. (2017). A simulation model for settling tanks with varying cross-sectional area. *Chemical Engineering Communications*, 204(11), 1270–1281.

Diehl, S. (2008). A regulator for continuous sedimentation in ideal clarifier–thickener units. *Journal of Engineering Mathematics*, 60(3-4), 265–291.

Gladman, B., Usher, S., e Scales, P. (2006). Understanding the thickening process. *Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia.*

Guimarães, F.A.V. (2010). Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais.

Gupta, A. e Yan, D.S. (2016). *Mineral processing design and operations: an introduction.* Elsevier.

Karageorgos, J., Davies, S., Broers, E., e Goh, J. (2009). Current trends in countercurrent decantation and thickener circuit operability and control. In *Preprints Tenth Mill Operators' Conference*, 255–260.

Luz, A.B.d., Sampaio, J.A., e França, S.C.A. (2010). Tratamento de minérios.

Schoenbrun, F., Hales, L., e Bedell, D. (2002). Mineral processing plant design, practice and control, volume 2, chapter strategies for instrumentation and control of thickeners and other solid-liquid separation circuits, 2164–2173.

Segovia, J.P., Concha, F., e Sbarbaro, D. (2011). On the control of sludge level and underflow concentration in industrial thickeners. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 8571–8576.

Shaw, D.J. (1980). *Introduction to colloid and surface chemistry.* Butterworths.

Sorsamäki, L. e Nappa, M. (2015). Design and selection of separation processes. Technical report, VTT Research report.

Torquato, N.C. e Luz, J.A.M.d. (2011). Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. *Rem: Revista Escola de Minas*, 64(1), 91–96.

Vaz, L.G.d.L., Klen, M.R.F., Veit, M.T., Silva, E.A.d., Barbiero, T.A., e Bergamasco, R. (2010). Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. *Eclética Química*, 35(4), 45–54.

Wang, H.F., Hu, H., Wang, H.J., e Zeng, R.J. (2018). Impact of dosing order of the coagulant and flocculant on sludge dewatering performance during the conditioning process. *Science of the total environment*, 643, 1065–1073.