

SISTEMAS DE CONTROLE NO PROCESSO DE FLOTAÇÃO: TEORIA E CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS*

Thomás Vargas Barsante e Pinto¹
Thiago Antônio Melo Euzébio²

Resumo

O processo de flotação consiste na separação mineral baseada na diferença de características superficiais dos minérios. As principais variáveis que regem o desempenho da flotação são a recuperação e concentração mineral, essas variáveis possuem forte acoplamento entre si e, somado às variações externas do processo, como variação granulométrica do minério, percentual de sólidos, e tipo do minério, fazem com que a flotação seja considerada o processo mais complexo na mineração. Para que a ação de separação de minério seja eficiente na flotação, diversas estratégias de controle são propostas na literatura. Nesse artigo é feita uma revisão das principais técnicas de controle aplicadas a células e colunas de flotação, desde as abordagens consolidadas às mais eficientes propostas recentemente.

Palavras-chave: Flotação; Métodos de controle.

CONTROL SYSTEMS IN THE FLOTATION PROCESS: THEORY AND PRACTICAL CONSIDERATIONS

Abstract

The flotation process consists of the mineral separation based on the difference of surface characteristics of the ores. The main variables that govern flotation performance are mineral grade and recovery, these variables have a strong coupling between them, and in addition to the external variations of the process, such as ore grading, solids percentage, and ore type, flotation is considered the most complex process in mining. In order for the ore separation action to be efficient in flotation, several control strategies are proposed in the literature. In this paper, a review of the main control techniques applied to flotation cells and columns is made, from the most efficient to recently proposed consolidated approaches.

Keywords: Froth flotation; Control methods.

¹ Engenheiro de Controle e Automação, mestrando em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Eletricista, doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A flotação é hoje o principal método de separação e beneficiamento mineral aplicado na indústria. Isso é devido à alta seletividade e versatilidade do processo, que permite que ele seja aplicado a diferentes minérios, de diferentes teores e granulometrias. Além disso, a flotação é largamente difundida por gerar concentrados com elevado teor e proporcionar uma alta recuperação mineral

Apesar de muito utilizado, o processo de flotação ainda é, em muitos dos seus aspectos, ineficiente. O elevado número de variáveis envolvidas (aproximadamente 100), a forte correlação entre variáveis e a alta complexidade dos subprocessos em si, dificultam a aplicação da atividade de maneira eficaz [1].

Apesar disso, os esforços para melhorar a performance são justificados pelo alto retorno econômico obtido, mesmo para uma melhoria pequena do processo. A atividade é a última etapa do processamento do minério, dessa forma, o aperfeiçoamento do processo garante um produto final de melhor qualidade e com mais valor agregado.

Como forma de aprimorar o desempenho da flotação, diversas técnicas e estratégias de controle são utilizadas. Desde conceitos mais básicos, como controles regulatórios, a estratégias mais avançadas, como o controle fuzzy, são aplicados a subprocessos da flotação. Esses métodos de controle são essenciais para o sucesso da atividade, uma vez que uma planta de flotação que não conta com estratégias de controle, tem seu desempenho dependente da experiência do operador, uma prática que não é segura nem confiável.

Este trabalho busca assim, revisar os diversos estudos já realizados na área de controle da flotação, expondo os conceitos que envolvem o processo e as técnicas usadas para a otimização da atividade. Uma breve análise das variáveis que o processo envolve é apresentada, seguida de uma extensa discussão acerca das diferentes práticas de controle já empregadas na flotação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A flotação é um método de beneficiamento, no qual, a propriedade diferenciadora do minério é a reatividade superficial da partícula envolvida. O princípio fundamental sobre o qual ela se sustenta é o da hidrofobicidade, cujo conceito é, a tendência de uma determinada substância repelir a água, ou a ligação com a mesma. De forma contrária, o princípio da hidrofiliabilidade atribui a um elemento a tendência de criar ligações com o meio aquoso.

A separação dos materiais valiosos dentro do processo ocorre por meio de três fases (aquosa, sólida, gasosa). A polpa (aquosa) contendo as partículas (sólida), tanto as valiosas quanto a ganga, é inserida na máquina de flotação. Um aerador presente na parte inferior da máquina, gera um fluxo de ar que, devido a densidade mais baixa, flui através da polpa até a superfície em forma de bolhas (gasosa).

Durante o trajeto das bolhas, elas colidem tanto com as partículas hidrofóbicas quanto hidrofílicas, unindo-se porém, apenas às hidrofóbicas. A ligação acontece devido ao fato das partículas hidrofóbicas possuírem um *induction time* pequeno, menor do que o instante em que partícula e bolha se mantêm em contato [2]. Por definição, *induction time* é o tempo necessário para que o filme que recobre a bolha se afine, e a água que a recobre seja drenada, estabelecendo uma ligação estável bolha-partícula.

Uma vez que o agregado bolha-partícula atinge a superfície, sua aglomeração forma uma espuma. É importante que a espuma formada se mantenha estável, para evitar um rompimento das ligações entre bolha e partícula, e propiciar um maior tempo para ser retirada. Isso contribui diretamente na performance da recuperação mineral, que é um dos principais pontos de interesse do processo.

No que tange a seletividade das partículas, a flotação poderia ser crucialmente limitada, visto que, naturalmente, poucos minerais são hidrofóbicos. Para contornar essa restrição, reagentes químicos são usados para alterar as características das partículas e tornar o processo mais abrangente. Não limitados a atribuir seletividades às partículas, reagentes são adicionados à polpa para aperfeiçoamento de características físico-químicas da própria polpa e espuma, tornando-se componentes essenciais do processo.

Diferentes tipos de reagentes, com diferentes finalidades, são utilizados na flotação. Os coletores, são substâncias responsáveis por aumentar a hidrofobicidade de uma determinada partícula; depressores em contrapartida, são compostos que intensificam a hidrofiliabilidade de partículas; espumantes, alteram a constituição química do processo, melhorando a estabilidade e características da espuma; e reguladores, possuem variadas funções, como: controlar PH da polpa, controlar dispersão das partículas, etc.

Uma única etapa de flotação não é capaz de beneficiar o minério que abastece a máquina de flotação adequadamente. Por isso, o minério é beneficiado por um circuito de flotação, que comumente conta com as seções *rougher*, *scavenger* e *cleaner*. Cada planta possui uma configuração de circuito diferente, no entanto, é possível estabelecer um esquema padrão, que serve de base para os demais, como mostra a Figura 1. As diferentes configurações se devem principalmente às característicaspeculiares de cada minério, que necessitam de cuidados particulares, principalmente no que tange a adição de reagentes.

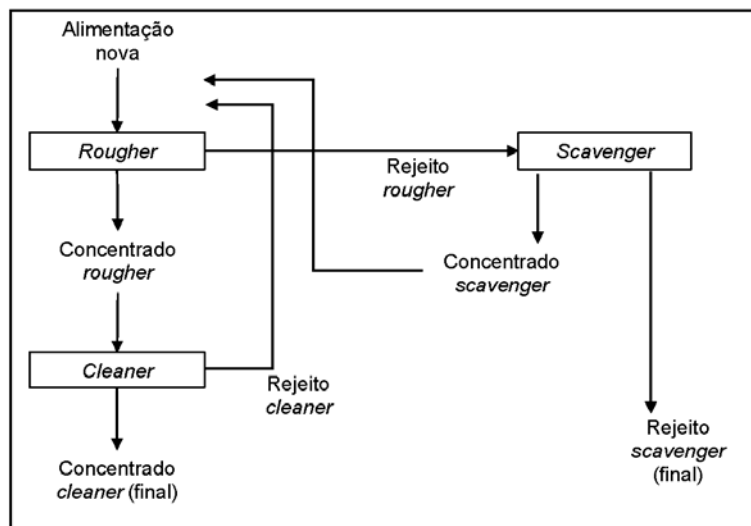


Figure 1. Configuração padrão de um circuito de flotação(Adaptado de[3]).

O minério de ferro, por possuir um alto valor comercial e ser um material em abundância na crosta terrestre, é um dos principais minérios beneficiados em diversos países, inclusive o Brasil. As pesquisas envolvendo o processo de flotação específico para o minério de ferro se iniciaram em 1931, levando a três possíveis formas de processo: flotação aniônica direta, aniônica reversa ou catiônica reversa. Ma et al. explora em [4] a diferença de performance entre flotação aniônica e

catiônica reversa para diferentes condições, e afirma que a flotação aniônica reversa apresenta melhores resultados para o tratamento de partículas ultrafinas (<10 μ m). Apesar disso, a flotação catiônica reversa é o método mais empregado no mundo para beneficiamento de minério de ferro. Isso não impede contudo, que pesquisas sejam feitas especificamente para o processo de flotação aniônica, como em [5].

No Brasil, os primeiros estudos sobre a técnica de flotação ocorreram na década de 60, e teve como principal estudioso o engenheiro Paulo Abib Andrey. Atualmente, a flotação é amplamente difundida e utilizada no país, tendo como principais minérios beneficiados o fosfato e o minério de ferro. Assim como em outras partes do mundo, diversas pesquisas têm sido feitas na indústria nacional para aprimorar os variados aspectos da flotação, como em [6–13].

3 VARIÁVEIS DE CONTROLE

Além do alto número de variáveis envolvidas na flotação, a complexidade inerente a elas é muito grande. Distúrbios em um determinado parâmetro podem acarretar efeitos em um conjunto de outros fatores, por exemplo, uma adição inadequada de espumante na polpa, pode comprometer a estabilidade da espuma, diminuindo a recuperação mineral ao fim do processo.

Um estudo feito por Hodouin em [14] classifica as variáveis de entrada da flotação como sendo manipuláveis ou distúrbios, e as variáveis de saída como controladas ou internas, como mostra o esquemático da Figura 2. As variáveis manipuláveis são, comumente predeterminadas, e elas serão manuseadas durante a execução do processo, de forma que as variáveis controladas mantenham-se estáveis no *set point* estabelecido, independente de distúrbios no sistema [15].

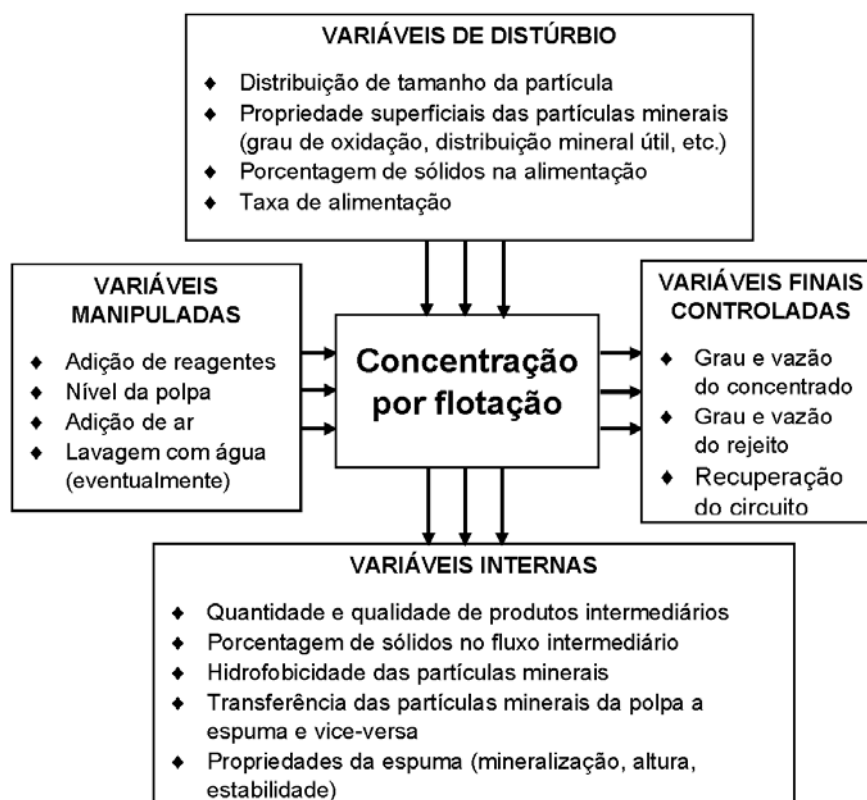


Figura 2. Variáveis pertinentes ao processo de flotação (Adaptado de [16]).

De todas as variáveis envolvidas na flotação, o teor e a recuperação mineral do concentrado são os principais parâmetros indicadores de desempenho [16,17]. Esses dois parâmetros são usualmente apresentados por meio de um gráfico, a curva de teor/recuperação. Ela indica que essas duas variáveis são inversamente proporcionais, representando um desafio aos controladores, por ser necessário buscar um ponto que otimize as duas variáveis. Devido a sua grande importância, pesquisas como [18–21] focam seus esforços especificamente no estudo desses parâmetros.

4 MÉTODOS DE CONTROLE

É comum encontrar na literatura, pesquisas que foquem seus esforços no estudo e controle de apenas uma ou um conjunto de variáveis no processo de flotação. Isso é uma forma de simplificar o controle desenvolvido, do mesmo modo que prioriza parâmetros mais significativos ao processo.

4.1 Controles regulatórios

Controladores regulatórios como o controle PI, PD e PID são largamente usados em atividades industriais. Isso se deve principalmente à simplicidade de uso, vasta gama de aplicação, funcionalidade clara e eficiência. Esses controladores englobam as funcionalidades Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D), sendo úteis para tratamento de respostas transientes ou estacionárias.

Na flotação, controladores PI são usualmente usados para controlar níveis de polpa em máquinas de flotação. No entanto, Kämpjärvi et al. afirma em [22] que eles são efetivos apenas quando controlam máquinas isoladas, perdendo eficiência em um circuito de flotação. Dessa forma, aplicou-se um estudo em [22] que testa diferentes controladores de múltipla entrada e múltipla saída (MIMO, do inglês - *multiple input multiple output*) e um controlador de única entrada e única saída (SISO, do inglês - *single input single output*) para o controle do nível de polpa de um circuito de flotação, sendo todas as estratégias escolhidas capazes de serem aplicadas por meio apenas de controladores PI. Ao final, observa uma vantagem dos controladores MIMO sobre o SISO, e indica que dentre os controladores MIMO avaliados, o controlador de desacoplamento apresentou uma leve melhora de performance.

Na usina de Timbopeba, em Ouro Preto (MG), Baeta et al. usa em [23] controladores PID para implementar um sistema de controle preferencial e um controle em cascata para o controle de nível e densidade da polpa. Resultados indicam uma melhora significativa na produção, assim como uma redução das perdas.

Os controladores regulatórios são, no entanto, mais adequados apenas aos níveis mais baixos de controle do processo de flotação [16]. Sendo assim, são usualmente aplicados em conjunto com estratégias mais avançadas de controle.

4.2 Controlador Fuzzy

O controlador fuzzy busca avaliar um sistema não de forma quantitativa, mas por meio da experiência humana. A estrutura do método é composta por 3 etapas: fuzzificação (definição das funções membro para cada variável), interface da lógica fuzzy (avaliação das regras) e defuzzificação (gera variáveis de saída). A elaboração

das regras é baseada em conhecimentos empíricos de operadores envolvidos no processo ou da avaliação de desempenho do sistema.

Assim como em [22,23], que aplicaram um controle sobre o nível de polpa em um sistema de flotação, Li et. al. controla o mesmo parâmetro em [24], por meio de um controlador de desacoplamento baseado em um controle fuzzy adaptativo. O estudo buscou superar os limites de performance do controlador PI, e apresenta resultados interessantes ao garantir a estabilidade e melhora da performance do processo de uma usina de beneficiamento na China.

A aparência e aspecto da espuma é tratado como um importante parâmetro para qualidade da flotação. Em plantas que não possuem um controle do processo, esse parâmetro é o principal aspecto avaliado pelos operadores para qualificação do processo. Por causa disso, trabalhos como [25,26] usam visão computacional para verificação do *status* da espuma integrado com métodos de controle. Jahedsaravani et al. aplica em [25] o controlador fuzzy baseada em estruturas de regras se-então adquiridas através da avaliação do sistema sob diferentes circunstâncias, para controle da velocidade da espuma e tamanho da bolha a partir da manipulação de um conjunto de variáveis. O estudo atesta a qualidade do controlador para lidar com distúrbios e manter o sistema estável. Do mesmo modo, Dawson e Koorts aliam em [27] a visão computacional com o controle fuzzy, dessa vez para o controle do teor e recuperação do concentrado. O estudo aponta que houve uma melhora de recuperação de 1%, enquanto o teor do concentrado teve um aumento de 1,3%.

O uso do controle fuzzy também é visto em [15], no qual Nogueira et al. aplicam o controlador no Concentrador 2 da empresa Samarco de forma a melhorar a recuperação metálica do processo e diminuir a variabilidade do teor do concentrado. Um sistema de análise de imagens também foi usado, aliado a um analisador de sílica desenvolvido pela empresa. Resultados indicam uma diminuição na quantidade do teor de ferro no rejeito e uma diminuição da variabilidade do processo devido à padronização do controle.

O trabalho de Rojas et al. em [28] inova ao aplicar uma estratégia de controle na produção intermediária do circuito de flotação, considerando assim, também, o teor do concentrado produzido durante essa etapa do processo. Eles usam um controlador fuzzy multivariável, afirmando que com essa técnica, a recuperação mineral pode ter um aumento de até 2,5% se comparado com a estratégia de controle que desconsidera a produção intermediária.

Alguns estudos buscam aliar diferentes estratégias de controle, em que cada uma delas é aplicada a um determinado subprocesso da flotação. Isso pode ser visto em [29], que entre outros métodos, utiliza um controlador fuzzy para otimização da recuperação mineral final, resultando em um aumento de 1,71% na recuperação após um ano de aplicação em uma usina da Anglo Platinum.

4.3 Controle preditivo por modelo (MPC)

O MPC prevê os estados futuros de um sistema a partir de modelos, e realiza uma ação de controle de forma a minimizar uma função de custo [30]. Ele considera o desempenho do sistema sobre horizontes móveis, que se alteram continuamente, permitindo que os efeitos de distúrbios sejam antecipados e tratados, tornando-o dessa forma, um controlador robusto. Sua aplicação em atividades industriais é difundida por não requerer intervenção de especialistas por longos períodos de tempo, e por apresentar alta capacidade de lidar com as restrições do processo [31].

O MPC também é uma técnica adequada para controles que se baseiam na aparência da espuma, como Liu e MacGregor afirmam em [26], em que usam um modelo de estado estável para obtenção de parâmetros de espuma estabelecidos, confirmando assim a viabilidade do uso de MPC. [32,33] desenvolveram um MPC para controle da velocidade da espuma de forma a otimizar a recuperação mineral do processo. O último porém, também aplica o método para manipulação de diferentes variáveis como altura da espuma, nível de polpa e taxa de aeração. Do mesmo modo, Maldonado et al. manipula em [17] um conjunto de variáveis (rejeito, lavagem da espuma e taxa de aeração) por meio de um MPC, para aplicação em colunas de flotação. A estratégia proposta se mostrou robusta para lidar com as várias restrições que envolvem as variáveis manipuláveis.

Rojas e Cipriano aplicam em [34] um controle da produção intermediária do circuito de flotação, por meio de um MPC multivariável. E evidenciam uma recuperação mineral 1,7% maior quando comparado a uma estratégia de controle que negligencia a seção intermediária do circuito.

Apesar do grande aplicação de MPC convencional na flotação, há um interesse grande na aplicação de MPC híbridos (HMPC), técnica de controle capaz de lidar melhor com a complexidade do processo. Os controladores híbridos são adequados para representação de sistemas não lineares e variáveis lógicas como eventos e regras, ponto falho do MPC convencional. Karelovic et al. comparam então em [35] os resultados de um HMPC e um MPC convencional para um processo de flotação submetido às mesmas condições de parâmetros e distúrbios. Os resultados mostram que as duas estratégias tiveram performances similares, embora tenha-se observado que o HMPC consegue minimizar melhor o desvio das restrições definidas. Putz e Cipriano utilizam em [36] HMPC para o controle do nível de polpa e teor do concentrado, tendo como objetivos principais minimizar a diferença entre o teor do minério final e seu *set point*, e minimizar alterações nas variáveis manipuladas. Concluiu-se que o método é adequado para a aplicação, tendo possibilidades de ser expandidos para o controle de outros subprocessos.

Assim como Muller et al. aplicou em [29] o controlador fuzzy para controle da recuperação mineral, o mesmo usou um MPC para controle do teor do concentrado final. A fim de atingir o *set point* desejado, o principal parâmetro manipulado foi a vazão de polpa de entrada nas máquina de flotação.

4.4 Outras técnicas

Por definição, o *air recovery* é a quantidade de ar que entra na máquina de flotação e transborda em forma de bolha, sem que tenha estourado. Esse parâmetro está diretamente ligado a taxa de aeração do processo. [37,38] expressam o efeito da taxa de aeração de ar no rendimento da flotação, sendo que o último ainda indica a relação entre o ponto de máxima recuperação de ar e performance do processo, afirmando que há uma melhora na recuperação mineral quando se trabalha no ponto de máxima recuperação de ar. Devido a essa importante relação, Neethling e Cilliers sugerem em [39] um modelo teórico para determinação da recuperação de ar e, Shean sugere em [40] o uso do método de busca direta *Generating Set Search* (GSS) como uma solução lenta, mas robusta, capaz de manter o processo atuante no ponto de PAR, mesmo sob variações na taxa de aeração.

O monitoramento da adição de reagentes à polpa é inevitavelmente, se não o principal, um dos principais parâmetros da flotação, devido a estarem diretamente ligados à estabilidade da polpa e da espuma. Li e Gui buscam controlar em [41] esse

parâmetro ao correlacioná-lo a distribuição do tamanho de bolhas por meio de uma função de distribuição cumulativa (CDF). Já [42,43] empregam um controlador feedback para a aplicação, enquanto o segundo ainda alia ao controlador o uso de visão computacional.

5 CONCLUSÃO

Muito já foi feito para aperfeiçoamento do processo de flotação, e avanços na tecnologia de controle de variáveis e parâmetros, têm levado a uma melhora de rendimento do processo. No entanto, ainda há campos a serem explorados, MPCs adaptativos e/ou não lineares se apresentam como uma alternativa ainda pouco exploradas. Além disso, o avanço de novas tecnologias como a visão computacional, tendem a ser um importante aliado na aplicação de métodos de controle, principalmente por fornecer resposta *online* mais confiáveis.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Tecnológico Vale — ITV pelo apoio ao projeto exposto por este trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Laurila H, Karesvuori J, Tiili O. Strategies for instrumentation and control of flotation circuits. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*. 2002 Feb;2:2174-95.
2. Wills BA, Finch J. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann; 2015.
3. Chaves A. *A Flotação no Brasil (Vol. 4)*. São Paulo: Oficina de Textos. 2013.
4. Ma X, Marques M, Gontijo C. Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of Vale iron ore. *International journal of mineral processing*. 2011 Sep 14;100(3-4):179-83.
5. Nanthakumar B, Grimm D, Pawlik M. Anionic flotation of high-iron phosphate ores— Control of process water chemistry and depression of iron minerals by starch and guar gum. *International Journal of Mineral Processing*. 2009 Jul 1;92(1-2):49-57.
6. Satini AWH, Coelho JPS, Moreira WR, Costa AB, Paulino W. ESTUDO PARA RECUPERAÇÃO DO REJEITO FINAL DA FLOTAÇÃO. 2015;279–85.
7. Silva AA, Peres AEC, Oliveira PS de, Silva JPM. REAVALIAÇÃO DE CIRCUITO DE FLOTAÇÃO CONVENCIONAL DE MINÉRIO DE FERRO. 2015;947-55.
8. Lopes M de M, Lopes LMC e, Martins EL de C, Metsavah V, Rezende LM, Bechir JLC, et al. INFLUÊNCIA DO DISPERSANTE AGLP NA FLOTAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO E FILTRAÇÃO DO CONCENTRADO DE ZINCO SILICATADO DE VAZANTE. 2016;289–97.
9. Martins MM, Mello MB de, Silva W, Bicalho LS, Filho LSL. FLOTAÇÃO ANIÔNICA DE REJEITO DO MINÉRIO DE FERRO DE CAUÊ. 2015;1007–15.
10. Bechir JLC, Metsavah V, Martins EL de C, Souza AD de, Lopes LMC e, Lima JRB de, et al. DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA IDEAL PARA A FLOTAÇÃO DE ZINCO DA USINA DE VAZANTE – VOTORANTIM METAIS. 2016;231–9.
11. Silva FL da, Santos RA dos. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA PARA REDUZIR O CONSUMO DE AMINA NA FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO. 2017;177–88.
12. Coelho JPS, Santos GG dos, Cândido LM, Costa AB, Moreira WR, Santini AWH. APLICAÇÃO DE ÓLEO DIESEL NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. 2015;273–8.

13. Costa LFP, Silva JPM, Oliveria PS de, Figueiredo ACL de. MELHORIAS NO CIRCUITO DE FLOTAÇÃO RECLENER. 2015;941-6.
14. Hodouin D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *Journal of Process Control*. 2011 Feb 1;21(2):211-25.
15. Nogueira A, Pires FA, Silva FT da, Gontijo MM. APLICAÇÃO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA CONTROLE DA FLOTAÇÃO CONVENCIONAL DO CONCENTRADOR 2 DA SAMARCO. 2015;737-42.
16. Jovanović I, Miljanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells—A review. *Minerals Engineering*. 2015 Jan 1;70:228-49.
17. Maldonado M, Desbiens A, Del Villar R. Potential use of model predictive control for optimizing the column flotation process. *International Journal of Mineral Processing*. 2009 Sep 1;93(1):26-33.
18. Neethling SJ, Cilliers JJ. Grade-recovery curves: a new approach for analysis of and predicting from plant data. *Minerals Engineering*. 2012 Oct 1;36:105-10.
19. Neethling SJ, Cilliers JJ. Predicting and correcting grade-recovery curves: theoretical aspects. *International Journal of Mineral Processing*. 2008 Dec 5;89(1-4):17-22.
20. Drzymala J, Kowalczyk PB, Oteng-Peprah M, Foszcz D, Muszer A, Henc T, Luszczkiewicz A. Application of the grade-recovery curve in the batch flotation of Polish copper ore. *Minerals Engineering*. 2013 Aug 1;49:17-23.
21. Nakhaei F, Mosavi MR, Sam A, Vaghei Y. Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: Neural network and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing*. 2012 Jul 18;110:140-54.
22. Kämpjärvi P, Jämsä-Jounela SL. Level control strategies for flotation cells. *IFAC Proceedings Volumes*. 2002 Jan 1;35(1):61-6.
23. Baeta ÉJ de S, Silva CG da, Silva M do C. ESTRATÉGIA DE CONTROLE PREFERENCIAL EM PLANTAS DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO: APLICAÇÕES PRÁTICAS E BENEFÍCIOS. 2015;52-61.
24. Li H, Chai T, Fu J, Wang H. Adaptive decoupling control of pulp levels in flotation cells. *Asian journal of control*. 2013 Sep 1;15(5):1434-47.
25. Jahedsaravani A, Marhaban MH, Massinaei M, Saripan MI, Noor SB. Froth-based modeling and control of a batch flotation process. *International Journal of Mineral Processing*. 2016 Jan 10;146:90-6.
26. Liu JJ, MacGregor JF. Froth-based modeling and control of flotation processes. *Minerals Engineering*. 2008 Aug 1;21(9):642-51.
27. Dawson P, Koorts R. Flotation Control Incorporating Fuzzy Logic and Image Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014 Jan 1;47(3):352-7.
28. Rojas D, Cáceres J, Cipriano A. Multivariable Expert Fuzzy Control for a Rougher Flotation Circuit, Considering Grade Estimation in Intermediate Cells. *IFAC Proceedings Volumes*. 2009 Jan 1;42(23):96-100.
29. Muller D, De Villiers PG, Humphries G. A holistic approach to flotation mass pull and grade control. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010 Jan 1;43(9):133-6.
30. Bergh LG, Yianatos JB. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes. *Journal of Process control*. 2011 Feb 1;21(2):226-34.
31. Afram A, Janabi-Sharifi F. Theory and applications of HVAC control systems—A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*. 2014 Feb 1;72:343-55.
32. Brooks K, Munalula W. Flotation Velocity and Grade Control Using Cascaded Model Predictive Controllers. *IFAC-PapersOnLine*. 2017 Dec 31;50(2):25-30.
33. Cortés G, Verdugo M, Fuenzalida R, Cerda J, Cubillos E. Rougher flotation multivariable predictive control: concentrator A-1 division CodelcoNorte. In *Proceedings of the V International Mineral Processing Seminar 2008* (Vol. 1, No. 6, pp. 316-325).
34. Rojas D, Cipriano A. Model based predictive control of a rougher flotation circuit considering grade estimation in intermediate cells. *Dyna*. 2011 Apr;78(166):29-37.
35. Karelavic P, Putz E, Cipriano A. A framework for hybrid model predictive control in mineral processing. *Control Engineering Practice*. 2015 Jul 1;40:1-2.

36. Putz E, Cipriano A. Hybrid model predictive control for flotation plants. *Minerals Engineering*. 2015 Jan 1;70:26-35.
37. Hadler K, Cilliers JJ. The relationship between the peak in air recovery and flotation bank performance. *Minerals Engineering*. 2009 Apr 1;22(5):451-5.
38. Hernandez-Aguilar JR, Reddick S. Gas Dispersion Management in a Copper/Molybdenum Separation Circuit, 2007. *Cu2007.*;2:173-84.
39. Neethling SJ, Cilliers JJ. Predicting air recovery in flotation cells. *Minerals Engineering*. 2008 Nov 1;21(12-14):937-43.
40. Shean B, Hadler K, Cilliers JJ. A flotation control system to optimise performance using peak air recovery. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017 Jan 1;117:57-65.
41. Li Z, Gui W. The Method of Reagent Control Based on Time Series Distribution of Bubble Size in a Gold-Antimony Flotation Process. *Asian Journal of Control*. 2018 Nov.
42. Xie Y, Wu J, Xu D, Yang C, Gui W. Reagent addition control for stibium rougher flotation based on sensitive froth image features. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017 May;64(5):4199-206.
43. Hodouin D, Bazin C, Gagnon E, Flament F. Feedforward–feedback predictive control of a simulated flotation bank. *Powder technology*. 2000 Mar 20;108(2-3):173-9.