



# MODELAGEM DA INTERFACE DE LICOR CLARIFICADO DOS DECANTADORES DE LAMA DO PROCESSO BAYER COM AJUSTE DE PARÂMETROS USANDO SOMA ACUMULADA (CUSUM)

R. R. C. POJO<sup>1</sup>, J. L. DOS SANTOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química

<sup>2</sup> Norsk Hydro Brasil S.A., Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

E-mail para contato: rayssacpojo@gmail.com

**RESUMO** – Na indústria da alumina, uma etapa crucial é a separação da lama vermelha (resíduo) do licor com alta concentração de alumina, feita no circuito de lavagem de lama, inicialmente composto por decantadores. Esse processo de separação se dá (ou se potencializa) com o uso de flocculantes sintéticos e suas dosagens são feitas dependente da massa de sólidos suspensos na corrente de alimentação dos tanques. Com a utilização de instrumentos que medem claridade do licor no overflow, pode-se gerar modelo de altura da zona de interface de licor clarificado em conjunto com técnica estatística de soma acumulada, obtendo um modelo ajustado que representa a resposta do processo de floculação.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo Bayer, desenvolvido por Dr. Karl Joseph Bayer, é largamente utilizado nas indústrias, a partir do minério de bauxita, para a obtenção da alumina. Esse processo tem como etapa, resumidamente, as fases de moagem da matéria prima, digestão, clarificação, precipitação e calcinação. Dentre essas etapas, destaca-se para esse estudo a clarificação que, após receber a bauxita digerida da primeira etapa, separa as fases sólida, em forma de resíduo (lama vermelha) e líquida (licor clarificado) (HABASHI, 1988).

A separação da lama, que é área de objeto desse estudo, é de extrema importância, uma vez que pode ser uma das principais dificuldades do processo, como impurezas finas e insolúveis presentes no licor clarificado. Esse processo ocorre em decantadores de alto rendimento (DAR), dispostos em circuitos, em que a lama e o licor saem, respectivamente, no *underflow* e *overflow*. Um dos avanços nessa área foi a utilização de flocculantes sintéticos, como o polyacrilato, hidroximato e outros copolímeros, que auxiliam na sedimentação da lama, obtendo de uma maior pureza do licor (BALLENTINE, 2011).

A partir da adição de flocculantes no processo de clarificação, a sedimentação da lama forma um gradiente de concentração no decantador, obtendo zonas com diferentes concentrações de sólidos, como a zona de lama, turva e de licor. Para controlar os parâmetros e a qualidade do licor, a dosagem de flocculante é feita com base nos níveis de lama presentes nos DAR, analisando também a claridade no mesmo, além de considerar a vazão e concentração de sólidos do material advindo da digestão.



Tendo em vista a importância dessa etapa para o processo Bayer, percebe-se uma necessidade de melhoria constante no controle da interface de lama no decantadores, de maneira a racionalizar o consumo químicos e a obtenção do produto seja cada vez mais refinada. Baseado nas correlações dos parâmetros envolvidos na clarificação, esse estudo propõe uma modelagem utilizando soma acumulada (CUSUM) para ajuste de parâmetro.

## 2. MODELAGEM

Nas diversas indústrias modernas são utilizados uma gama de instrumentos e sensores para medir diferentes parâmetros de processo, possibilitando o controle e monitoramento em tempo real destas variáveis. Com o advento do aumento exponencial das capacidades computacionais, os desenvolvedores de aplicações de controles inteligentes baseados em modelos têm recursos quase que ilimitado de criar algoritmos nesse campo (JONAS, 2018).

Controles baseados em modelos para uso em controles são ferramentas desenvolvidas por engenheiros conhecedores do processo, que utilizara da experiência para relacionar as influências de cada variável de *input* e variáveis *output* para modelamentos. E para ter um bom modelo é precisa uma excelente instrumentação, de forma a garantir que todas as medições estão confiáveis. Instrumentação mal instalada e/ou com incertezas em sua aferição, incrementa erros no processo de modelagem. (DOOLEY, 1996).

### 2.1. Instrumentação Utilizada

No controle da dosagem de floculantes em decantadores de lama é utilizado uma sonda de interface composta por um sistema acionador de descida, instalado no topo do tanque, e um sensor ultrassônico realiza medições de concentrações de sólidos suspenso em meio líquido, que é a sonda propriamente dita. O equipamento é ajustado para, a cada intervalo de tempo pré-definido, desça e realize a medição de altura da interface de lama dentro do tanque, registrando esse valor em um ponto de monitoramento. (DOOLEY, 1996). As medições são realizadas a cada 10 minutos.

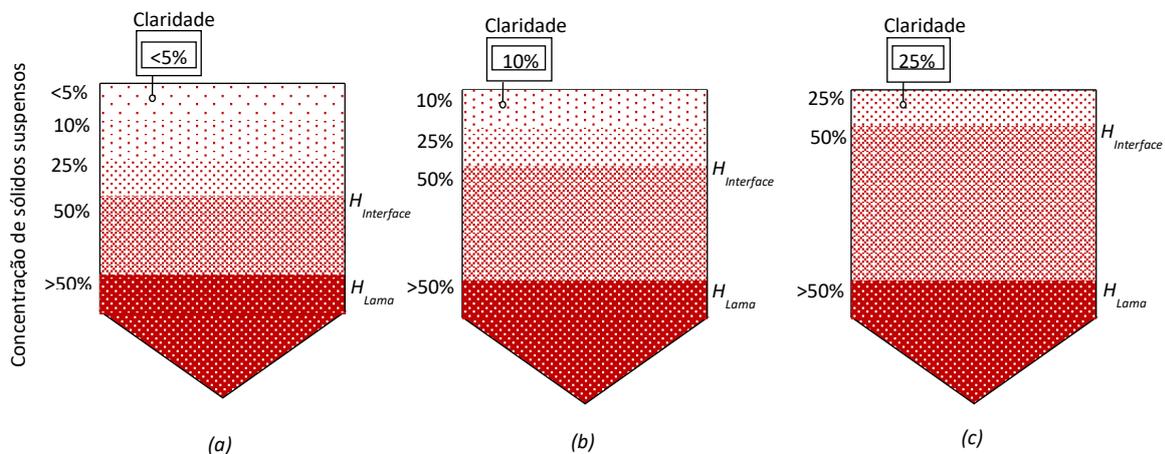
Outro recurso para monitoramento é a sonda de claridade de licor, esta, sendo o mesmo tipo da sonda de interface, fica fixa imersa no licor no topo, próximo ao transbordo do tanque (*overflow*).

### 2.2. Modelagem da Interface de Licor

Para o desenvolvimento do modelo de interface, utilizou-se os instrumentos de medições da claridade e da altura de interface de lama. Na Figura 1 é exemplificado o comportamento desses parâmetros, demonstrando um gradiente de concentração que se forma no decantador a partir da altura de interface de lama até o topo do tanque, onde é feita a medição de claridade, perpassando pela interface e uma zona turva.

Como a hipótese de que o sensor de claridade está relacionado com a da dosagem de floculantes, a altura de interface é dependente da dosagem de floculante e da concentração de sólidos na alimentação do tanque.

Figura 1 – Zonas de Concentração de Sólidos e Medição da Claridade do *Overflow*.

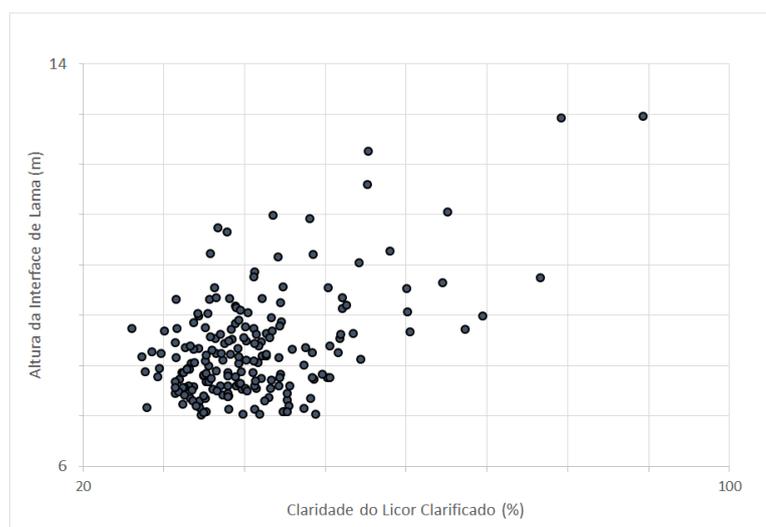


A correlação utilizará somente os valores das medições da sonda de claridade. E, para o sistema de calibração automática do modelo, se faz uso das medições periódicas da sonda de interface. A Equação 1 descreve o modelo de interface:

$$y(t) = a x(t - n) + b_0 \quad (1)$$

Onde  $y(t)$  é a interface de lama modelada em metros,  $m$  e  $b_0$  são os parâmetros ajustado da regressão e  $x(t-n)$  são as medições da claridade do licor, em %, sendo  $n$  o tempo passado para a resposta do valor de saída da variável modelada  $y(t)$ . Na Figura 2 são plotados os valores de interface de lama versus a claridade medida no transbordo do decantador.

Figura 2 –Interface de lama medida *versus* claridade do *overflow*.

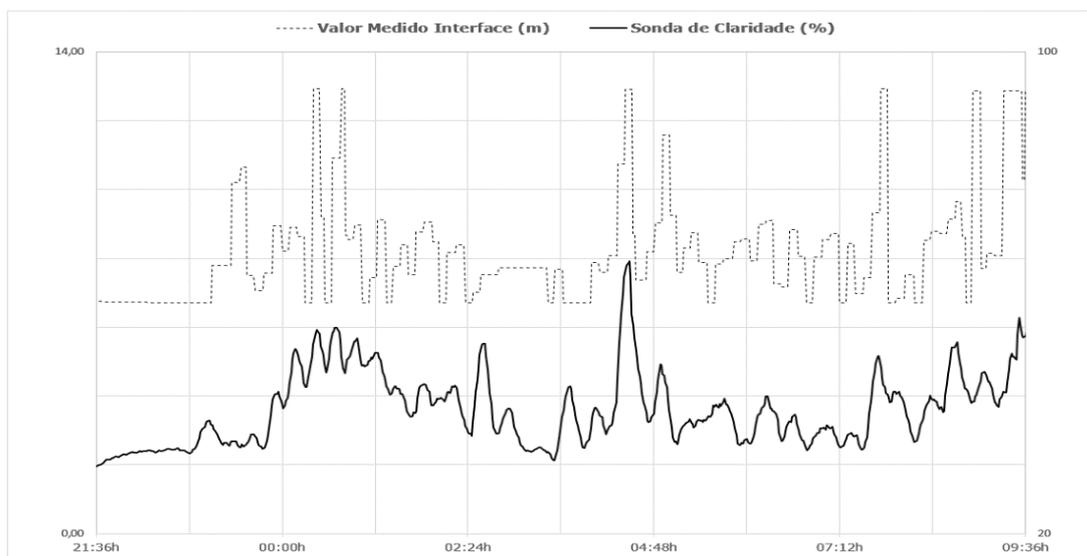


A Figura 3 apresenta os inputs para a geração dos parâmetros do modelo. A relação direta de claridade e interface de lama pôde ser estabelecida. As informações obtidas com os ajustes foram usadas para auxiliar a determinação dos virtual sensors de interface de lama para cada

DAR. Por conseguinte, comprova-se a possibilidade de projetar o controle de dosagem de floculante baseado em modelos que adotam essas relações.

Por conta de a medição ser feita em períodos de 10 minutos, pode-se afirmar que se trata de uma variável discreta. Assim, não seria adequado um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).

Figura 3 – Inputs do Modelo: Interface de lama medida e claridade do *overflow*.



Para uma melhor correlação, pode-se usar uma nova variável de influência. Além disso, sugere-se a utilização de outro método, como Machine Learning, para obter modelos mais precisos.

### 3. MODELO COM AJUSTE AUTOMÁTICO

De forma geral, utilização de métodos de reconciliação de dados para aplicação de filtros em modelos de regressão, esta é uma técnica vastamente utilizada para ajusta-los automaticamente. Assim, faz-se uso dos controles estatístico de processo, uma técnica eficiente para auxiliar na resolução e monitoramento de problemas no processo. (MONTGOMERY, 2004). Farias, 2009, descreve erros de medição de processo são inevitáveis pela imprecisão das medições feitas por instrumentos, podendo ser classificados como erros aleatórios ( $\varepsilon$ ) e erros grosseiros ( $\delta$ ).

$$e = x_i - y_i = \varepsilon - \delta \quad (2)$$

Nesse conceito, baseando-se em histórico de dados, o método de soma acumulada (CUSUM) pode ser indicado. Essa técnica é considerada que esses erros se mantem em todas as medições do modelo, conceituando como *bias*, que se observa em gráficos de controle avançados (SAMOHYL, 2009). Por detectarem essas mudanças, melhoram a qualidade do modelo, dando uma estimativa do novo nível do processo.

Segundo Montgomery (2004), essa técnica trabalha analisando as informações históricas e acumulando os desvios da média  $\mu_0$  que estão acima do valor alvo, por meio de uma estatística  $C^+$ . Isso é feito igualmente para valores abaixo do alvo, com estatística  $C^-$ . As Equações 3 e 4 abaixo demonstra como são calculadas essas estatísticas.

$$C_i^+ = \max[0, C_i^+ + x_i - (\mu_0 + k)] \quad (3)$$

$$C_i^\pm = \min[0, C_i^- + x_i - (\mu_0 - k)] \quad (4)$$

Sendo  $k$  um valor de referência e  $x_i$  a  $i$ -ésima observação do processo.

Nesse estudo, aplicou-se o método de soma acumulada nos resultados obtidos na Equação 1, baseado na comparação com os dados históricos de interface de lama dos decantadores. Assim, em caso de variações dos valores, a estatística o CUSUM crescerá ou decrescerá, de acordo com o processo. Caso não, os desvios positivos e negativos serão compensados um pelo outro, tornando o valor da estatística zero. Assim, os ajustes atuam acumulando os *bias* positivos e negativos e os corrigindo no ponto em questão. A equação final do modelo é mostrada na Equação 5 abaixo. Temos:

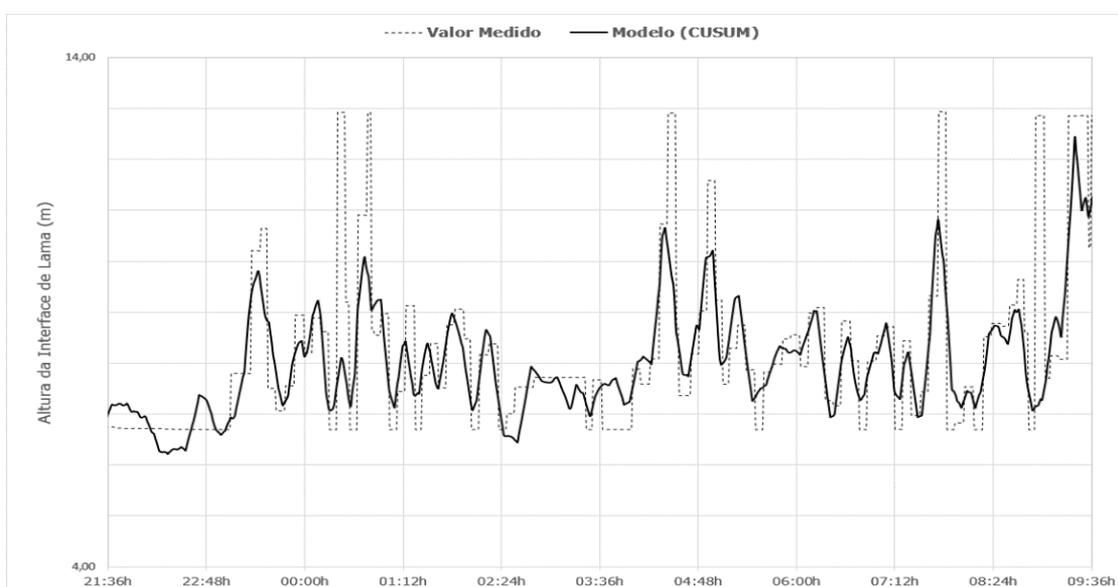
$$y_k = m x(t) + b_0 + b_k \quad (5)$$

Onde  $b_k$  é o *bias* que assume os valores de  $C_i^+$  ou  $C_i^-$ .

## 4. RESULTADOS

Utilizando valores reais de planta obtidos pela instrumentação instaladas no tanque decantador da refinaria (dados históricos, sem o ajuste), a Figura 4 mostra os resultados do modelo obtido pela regressão criada com o uso do MS Excel®, após ajustes aplicados pelo CUSUM e as medições de interface.

Figura 4 – Modelo de Interface de Lama com o ajuste CUSUM.





Com um banco de dados de 350 medições, a técnica de ajuste adotada apresentou uma redução de 33,21% no erro relativo médio do modelo. Esse, obteve um erro quadrático médio 1,814 com o modelo ajustado.

## 5. CONCLUSÃO

Como parte do desenvolvimento de controles de processos mais precisos, a modelagem matemática é de longe a melhor opção para obtermos controles automáticos mais robustos. O desafio para os profissionais da indústria e estudiosos nesse ramo é determinar quais os métodos de modelagem e técnicas ajustes que melhor se adequa ao processo em desenvolvimento.

A utilização do modelo online reduz a frequência de medição do instrumento, aumentando a vida útil do mesmo, reduzindo o número de substituições e aumentando a disponibilidade e confiabilidade das medições.

Em nosso estudo de desenvolvimento de modelo de interface de lama pelo método de regressão, a partir das medições de concentração de sólidos no *overflow* do decantador, combinada como a técnica de ajuste estatístico de soma acumulada (CUSUM), possibilitou-se a representação da altura de interface de lama calculada em tempo real, com regular precisão. O modelo desenvolvido não foi implementado na planta.

É sugerido utilização do modelo criado para futuros projetos de controles em decantadores no processo Bayer com uso de floculantes. E em paralelo a isso, que seja testado outros métodos de modelagem com o objetivo de comparar e aumentar a acurácia do modelo.

## 6. REFERÊNCIAS

- BALLENTINE, F.; LEWELLYN, M. E.; MOFFATT, S. A. Red Mud flocculants used in the bayer process. **TMS Light Metals**. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 425-450.
- DOOLEY, V. Mud Level Gauges – A Comparison of Techniques, **AQW**. 1996. p. 375-381.
- HABASHI, F. A Hundred Years of the Bayer Process for Alumina Production, **Light Metals**. 1988. p. 3-11.
- HENNING, E. **Aperfeiçoamento e desenvolvimento dos gráficos combinados Shewhart-CUSUM binomiais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2010. p. 251.
- JONAS, R. K. Digital Transformation in Alumina Refining. **TMS**, Arizona, USA, 2018.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. p. 513.
- SAMOHYL, R.W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. p. 275.