

APLICAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS NO AQUECIMENTO DE LICOR CÁUSTICO NA VOTORANTIM METAIS-CBA*

Sayonara Soares de Freitas Carneiro¹

Danilo Lavigne Halla²

Thiago Teixeira Franco³

Roberto Seno Júnior⁴

Anderson Rodrigo Klassen Dück⁵

Resumo

A extração de alumina por digestão ocorre em meio reacional entre a pasta de bauxita e licor cáustico aquecido. Este aquecimento ocorre em uma série de trocadores de calor, que utilizam vapor saturado produzido em caldeiras de gás natural. Aproximadamente vinte minutos após a passagem pelos trocadores, o licor alimenta o reator e a mistura entre este fluido quente e a pasta fria deve atingir uma temperatura pré-definida de digestão. O controlador tradicional não era capaz de integrar o circuito entre os produtores e consumidores de vapor, por causa do *deadtime* do processo que gera a necessidade de um modelo robusto para ser acoplado à lógica de PID, mais a questão da não-linearidade do processo de transferência de calor. Este artigo apresenta a metodologia e os resultados de uma aplicação de tecnologia baseada em lógica Fuzzy em trocadores de calor para controle da temperatura reacional. A ferramenta do projeto é uma plataforma de controle avançado que não necessita de modelos fenomenológicos e é capaz de lidar com sistemas não-lineares. A média da temperatura de digestão ficou 0,4°C mais próxima do setpoint e a variabilidade reduziu em 61%, o que permitiu a redução em 3,2% no consumo específico de vapor.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Transferência de calor; Controle avançado de processos; Economia de vapor.

ADVANCED PROCESS CONTROL APPLICATION IN VOTORANTIM METAIS – CBA CAUSTIC LIQUOR HEATING

Abstract

Alumina extraction by digestion is a reaction between bauxite slurry and heated caustic liquor. This heating happens in a series of heat exchangers, fed with saturated steam produced by natural gas boilers. Twenty minutes later, the heated liquor reaches the reactor and the mixture between the hot fluid with cold bauxite slurry must reach a pre-defined temperature reaction. The PID controller wasn't adequate to integrate steam producers and consumers, because of the considerable dead time, which requires a robust model to be solved by the traditional controller, and the process non-linearity. This article focuses on Fuzzy technology application in heating exchangers to control digestion temperature inside the subsequent reactors. The project tool is a Fuzzy logic based platform, which doesn't need phenomenological models and is capable of dealing with highly non-linear systems, such as heat transfer. As results, the average digestion temperature got 0.4°C closer to the setpoint and the variability reduced by 61%, which allowed a 3.2% reduction in steam consumption.

Keywords: Fuzzy logic; Heat transfer; Advanced process control; Steam saving.

¹ Graduação em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas, Engenheira de Aplicação na I.Systems Automação Industrial, Campinas, São Paulo - Brasil.

² Graduação em Engenharia de Computação pela Universidade Estadual de Campinas, Diretor de Engenharia na I.Systems Automação Industrial, Campinas, São Paulo - Brasil.

³ Graduação em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo, Engenheiro de Processos, Votorantim Metais/Cia. Brasileira de Alumínio, Alumínio, São Paulo - Brasil.

⁴ Graduação em Engenharia Química pela Universidade de São Carlos, Gerente de Tecnologia, Votorantim Metais/Cia. Brasileira de Alumínio, Alumínio, São Paulo - Brasil.

⁵ Graduação em Engenharia Química pela PUC-Paraná, Engenheiro de Processos, Votorantim Metais/Cia. Brasileira de Alumínio, Alumínio, São Paulo - Brasil

1 INTRODUÇÃO

1.1 Informações sobre a unidade

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) está localizada a 74 km de São Paulo e é a maior planta integrada de alumínio do mundo. Ela começou a operar em 1955 e atualmente faz parte da Votorantim Metais, posicionando-se no mercado como a maior produtora de alumínio primário do Brasil. Em 2014, a capacidade produtiva do grupo foi de 0,413 Mton de alumínio, cuja extração é realizada através do método de Bayer.

1.2 Informações sobre o processo

O processo de Bayer corresponde a uma série de operações unitárias com objetivo de transformar o minério de bauxita em alumina [1]. Com relação ao conjunto destas operações, destaca-se a etapa de extração da alumina do minério em reatores do tipo autoclave. A alumina hidratada é extraída da bauxita por reação química com soda cáustica, que necessita de pressão elevada e temperaturas próximas de 418 K. A Figura 1 abaixo ilustra o processo de preparação da pasta de bauxita e do aquecimento de licor cáustico, até a etapa de reação.

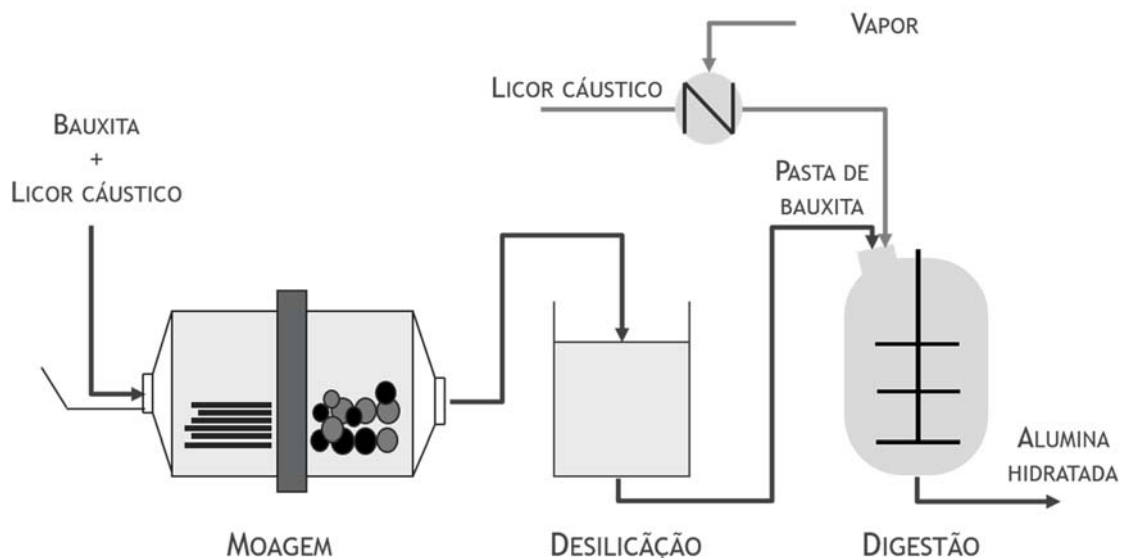


Figura 1. Fluxograma de processo da unidade de extração de alumina.

Para obter a maior taxa de conversão dos reagentes, existe um valor ideal de temperatura reacional, que é resultante da mistura entre a pasta de bauxita e o licor cáustico aquecido. Temperaturas abaixo deste valor ideal não garantem a melhor taxa de reação, enquanto que temperaturas acima do objetivo indicam consumo adicional de vapor.

A adição de pasta no reator segue uma metodologia com objetivo de atingir determinadas concentrações de alumina/cáustico (ou razão A/C) na saída do equipamento. A vazão de licor cáustico é determinada de acordo com a produção desejada da fábrica. A qualidade do vapor gerado nas caldeiras a gás natural também interfere na eficiência da troca térmica.

Devido aos graus de liberdade existentes do sistema, o controle de temperatura da autoclave passa a depender com maior intensidade do controle de temperatura do

licor cáustico nos trocadores primários de calor. Entretanto, existe um tempo morto de aproximadamente 20 minutos a partir da saída do trocador de calor e a medição de temperatura no reator, tempo este que corresponde ao deslocamento do fluido e à dinâmica de mistura reacional.

1.3 Controle de processo tradicional (PID)

O controlador tradicional do tipo Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID) não consegue incorporar tempo morto nas lógicas de sintonia por ter poucos graus de liberdade para configuração, sendo necessário o uso de preditores de Smith, por exemplo, para compensar este parâmetro. O preditor de Smith, por sua vez, necessita de modelos de processo para ser acoplado à lógica do PID.

O PID também apresenta perdas de performance em processos não-lineares, pelo fato de ele ser inerentemente linear, simétrico e com parâmetros constantes. A distribuição de temperatura em trocadores de calor indica a não-linearidade no processo de troca térmica. Mesmo com o uso da técnica de *gain scheduling* em PIDs para compensar esta característica, é necessário um conhecimento detalhado do processo para que o controle tradicional se torne funcional.

Além dos desafios citados, deve-se destacar que estes trocadores de calor possuem tempo de campanha em função do acúmulo de resíduo na tubulação interna. A eficiência de aquecimento da soda diminui ao longo do tempo em função deste fenômeno e o controle deve compensar esta tendência para que a temperatura do meio reacional permaneça inalterada. Neste caso, o uso de uma lógica de controle avançado permite a integração entre as principais correntes do sistema de forma a incorporar as questões apresentadas anteriormente.

1.4 Controle de processos por lógica Fuzzy

A lógica humana de como tratar estados indeterminados usada por operadores e engenheiros de processo pode ser matematicamente incorporada ao controlador através da lógica Fuzzy. Ela permite que estados indeterminados, como “muito baixo”, “frio”, “morno”, etc., possam ser quantificados e processados por um computador. Quando se lida com problemas de categorização de conceitos, surge a dificuldade em ver distinções claras entre os estados ou as qualificações, gerando os problemas de classificação. [2]

Por exemplo, considera-se a existência de um tanque e a informação humana sobre o nível. Dentre os estados possíveis (baixo, alto, médio, etc.), existe um gradiente no qual não é possível afirmar com certeza onde um estado termina e onde outro começa. Entretanto, é possível categorizar um valor numérico de nível como algo que pertence a mais de um estado ao mesmo tempo. Supondo que o nível esteja em 1m em um tanque de 4m de altura, a variável “nível” pode ser classificada como 75% baixa e 25% alta, por exemplo. Estas porcentagens são chamadas de funções de pertinência e a partir delas são construídas lógicas computacionais capazes de mapear funções que descrevem processos. Para que o mapeamento seja razoável, é necessário utilizar um número considerável de funções de pertinência. [2]

Em controle de processos químicos, uma malha de controle fechada monitora as variáveis de processo e calcula o erro destas variáveis a partir dos valores setados como objetivo (*setpoint*) do controlador. Essa diferença numérica gera um sinal para o atuador, que irá gerar uma mudança no processo de forma que o erro seja reduzido ao longo do tempo.

Para desenvolver um controlador utilizando lógica Fuzzy, é necessário classificar as variáveis de processo (PV), manipuláveis (MV) e de distúrbio (DV) em rótulos em função da intensidade e da direção com relação ao setpoint de processo. Estes rótulos irão definir intervalos de valores de resposta para atuadores e são representadas por triângulos em um plano cartesiano. [2]

O controlador Fuzzy irá acionar rótulos de saída a partir das variações da PV em relação ao setpoint, em um processo chamado de fuzzyficação. Cada associação entre o rótulo de entrada e de saída é chamado de regra Fuzzy e mais de uma regra pode ser acionada ao mesmo tempo. Dessa forma, a saída para o atuador tem diferentes rótulos com diferentes intensidades e passa por um processo chamado de defuzzyficação, no qual o centro de massa da união da área dos triângulos acionados resulta em uma saída de controle de valor único. [2]

O controlador se torna mais preciso na medida em que mais regras Fuzzy são utilizadas, permitindo a descrição de comportamentos de processos mais complexos. [2]

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Processo de aplicação

Para aplicação do controle avançado *fuzzy* no aquecimento do licor cáustico, utilizou-se a plataforma de controle avançado Leaf, da I.Systems. Ela se utiliza de técnicas de inteligência artificial e de algoritmos de geração automática de regras de controle através de informações de processo. Esse método de geração automática provê velocidade à implantação e facilidade de manutenção e *retuning*.

O Leaf é executado em PC/Windows, onde são realizados todos os cálculos utilizados no controle. A leitura dos sensores e escrita nos atuadores do processo são realizadas através de conexão à rede industrial, via protocolo OPC, uma vez a cada 5 segundos. Foram seguidas as seguintes fases da implantação do sistema de controle.

- 1) Avaliação dos instrumentos do processo;
- 2) Entrevistas com os operadores e engenheiros de processo para definição da estratégia de controle;
- 3) Criação da lógica de *fallback* no SDCD, para retorno automático dos controles em caso de falha de comunicação do Leaf com a rede industrial;
- 4) Criação dos botões de acionamento do Leaf na tela de operação, para que o controle avançado possa ser habilitado/desabilitado;
- 5) Desenvolvimento das estratégias de controle;
- 6) Testes do controle em malha aberta;
- 7) Testes do controle em malha fechada;
- 8) Ativação do Leaf e operação assistida, e;
- 9) Treinamento da operação.

As etapas 1 a 8 duraram uma semana, enquanto que a etapa 9 ocorria em paralelo com as demais e durou mais por causa da dependência com relação aos horários e turnos dos funcionários a serem treinados.

As variáveis do processo encontram-se na Tabela 1 abaixo. Elas fazem parte do balanço energético das correntes de entrada do processo. Devido às limitações de sensores, não existem informações online sobre a saída de produto do reator, então o balanço torna-se limitado.

O controle passou a agir conforme fluxograma da Figura 2 abaixo. O Leaf atuou diretamente na abertura da válvula de vapor vivo que alimenta os trocadores de calor e aquecem a soda de ataque. Dada a dimensão dos equipamentos envolvidos e o fluxo de energia do processo, a alta inércia do sistema deve ser considerada pela estratégia de controle durante sua atuação. Também devem ser levadas em conta as variáveis de influência que impactam a temperatura da autoclave de forma significativa presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Lista de variáveis que alimentam o Leaf.

Nome da variável	Unidade
Temperatura do meio do autoclave	°C
Temperatura de saída dos trocadores primários	°C
Vazão de licor cáustico	m ³ /h
Vazão de pasta de bauxita	m ³ /h
Temperatura da pasta de bauxita	°C
Vazão de vapor	ton/h
Pressão do vapor	kgf/cm ²
Temperatura do vapor	°C

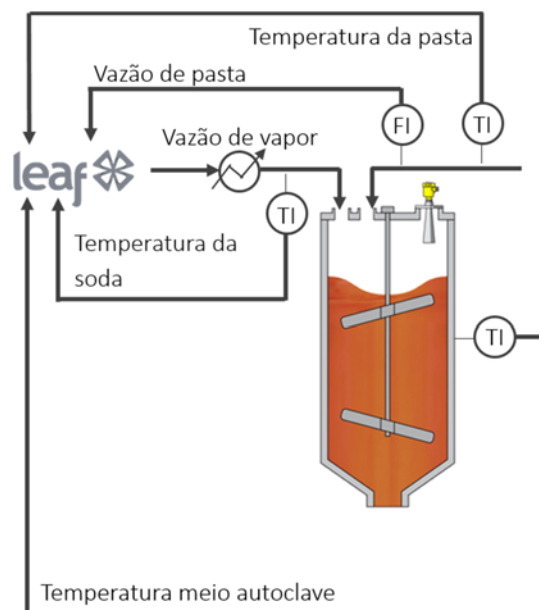


Figura 2. Fluxograma do controle do aquecimento de licor.

Para evitar que ruídos de alguns instrumentos afetassem a dinâmica do controle, filtros de *outliers* foram criados para amenizar os ruídos identificados em alguns sensores. Da mesma forma o grande tamanho da válvula de vapor exigiu a implementação de um filtro de delta máximo para limitação temporal de sua abertura. Após as etapas descritas acima, o controle avançado foi comissionado. Sua performance e utilização foram monitoradas para análise dos ganhos. Para análise comparativa entre os controles avançado e PID utilizou-se a alternância entre ambos os sistemas em período semanal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados em tempo real mostram melhoria significativa na temperatura da digestão, conforme Figura 3 abaixo.

Na Figura 3, os períodos sem dados correspondem a operações realizadas com *setpoints* diferentes do usual. Estes dados não são adequados para comparação, independente do cenário de sistema de controle escolhido, porque a análise deve ser feita diante das mesmas condições operacionais.

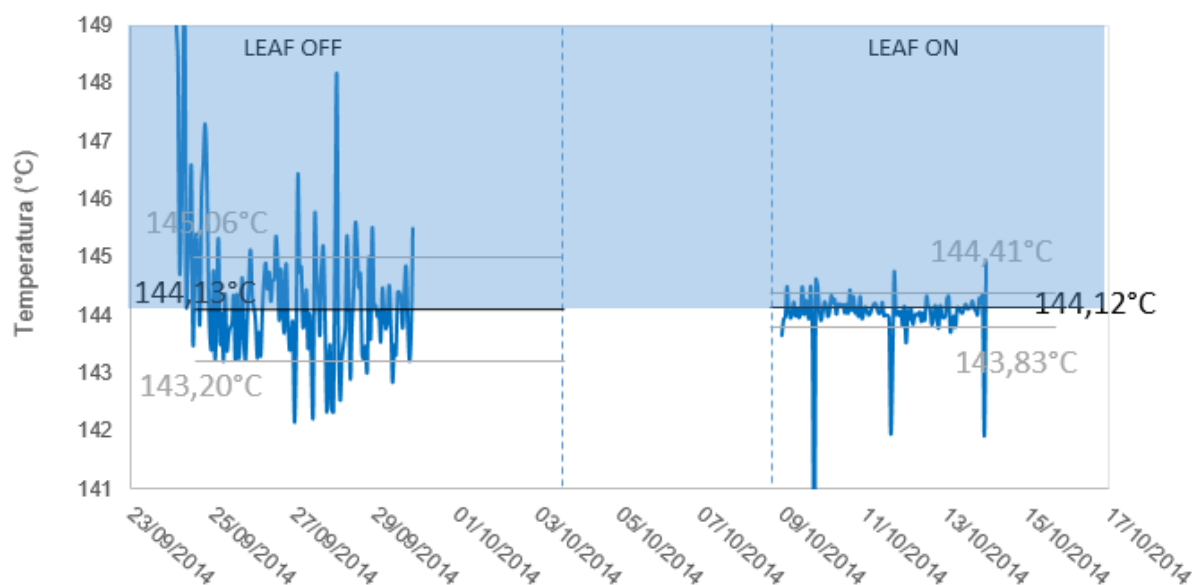


Figura 3. Dados reais de temperatura da digestão com controle tradicional (Leaf OFF) x com controle pelo Leaf (Leaf ON), durante um período de 24 dias.

Ainda na Figura 2, a área destacada de azul acima ressalta os instantes em que a temperatura da digestão esteve acima do *setpoint*, resultante de um consumo adicional de vapor no trocador primário de calor. Visualmente é possível notar que a frequência de pontos nesta faixa diminuiu com o uso da estratégia de controle do Leaf. Abaixo na Tabela 2 é possível observar a média e o desvio padrão da temperatura da digestão, para cada cenário de controle, sob os mesmos *setpoints* de operação (144°C).

Tabela 2. Resultados da comparação entre as estratégias de controle.

	Leaf OFF	Leaf ON
Média (°C)	144,41	144,01
Desvio padrão (°C)	1,43	0,56

Dada a estabilidade atingida na temperatura através da redução de aproximadamente 61% no desvio padrão, o controlador realizou a otimização energética do sistema e permitiu a redução do consumo de vapor em 3,2%, ao trazer a média da temperatura para um valor 0,4 °C mais baixo, dentro dos limites operacionais que garantem a reação de extração de alumina.

4 CONCLUSÃO

A integração entre a troca térmica e a temperatura do meio reacional foi satisfatória graças ao uso de uma ferramenta que fosse capaz de absorver o tempo morto do processo, não acumular erro e lidar com a não-linearidade do sistema. Por reduzir a variabilidade do indicador chave em aproximadamente 61% e trabalhar com uma temperatura mais economicamente favorável e dentro dos limites desejados, o Leaf foi capaz de otimizar o consumo de vapor na etapa anterior à digestão em 3,2%.

REFERÊNCIAS

- 1 Hind, A. R., Bhargava, S. K., Grocott, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1999; 146: pp 359 – 374.
- 2 Gomes, R. Pereira, L. Baião, P. Seara et al. Redução do consumo de vapor na operação de torres de recuperação de amônia utilizando controle avançado baseado em lógica fuzzy. *ABM Week*. 2015.