



APLICAÇÃO DE CONTROLE ROBUSTO PARA O pH DO CALDO DE CANA DE AÇÚCAR

A. N. SILVA FILHO^{1,2}, A. M. B. SILVA^{1,2}, E. P. TEIXEIRA^{1,2,3}

¹ Universidade de Uberaba - Mestrado Profissional em Engenharia Química

² Universidade de Uberaba - Curso Graduação em Engenharia Elétrica

³SIC - Sistemas Inteligentes de Controle LTDA

RESUMO – No processo de produção de açúcar, o controle de pH do caldo é de fundamental importância para a qualidade do produto, posto que, durante o processo ocorrem perturbações que, se não controladas, certamente inviabilizariam a produção. Associado a esse contexto, tem-se como propósito, neste trabalho, a análise para aplicação de técnicas de controle robusto para o controle do pH do caldo da cana, utilizando um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) para controlar o processo ao ser ajustado e analisado segundo a norma H^∞ .

1. INTRODUÇÃO

Numa usina sucroalcooleira, a cana-de-açúcar carrega uma série de partículas, oriundas da colheita, do transporte e da moenda. Em virtude disso, a cana de açúcar deve ser preparada antes de se prosseguir com o processo. Então, a cana é esmagada e o seu caldo é depurado e durante este processo, o pH do caldo deve ser controlado. Este controle tem por finalidade: reduzir a viscosidade do caldo, remover proteínas, evitar a formação de outras formas indesejáveis de açúcar, eliminar microorganismos e evitar que o açúcar fique amarelado. O processo de controle de pH divide-se nas seguintes etapas: caleação, carbonização, filtração, sulfitação, concentração, cristalização e secagem, sendo que nas etapas de caleação, carbonização e sulfitação, o controle do pH deve ser rigoroso e contínuo.

Via de regra, o controle automático de pH é bastante complexo (Karthik, 2010). De fato, devido às características não lineares, associadas às dificuldades de manutenção dos sensores de pH, tanto na instalação da acidificação, como nas refinarias de açúcar, o controle de pH nem sempre é satisfatório (Elfatni e Bounahmidi, 2006).

A proposta deste trabalho é apresentar uma análise preambular da robustez de um controlador proporcional, integral e derivativo (PID), a ser utilizado no controle de pH do caldo da cana em uma usina sucroalcooleira. A importância dessa análise, reside no fato de que existem perturbações inerentes ao processo que, certamente, fariam com que o pH do caldo inviabilizasse a produção de açúcar.



2. CONTROLE ROBUSTO

A especificação de sistemas de controle que sejam eminentemente precisos, perante incertezas expressivas de um processo a controlar, é um problema clássico dos projetos de sistemas de controle com realimentação. Neste tipo de projeto, busca-se obter um mecanismo que se comporte de forma desejada dentro de uma grande faixa de incerteza dos parâmetros. O sistema é considerado robusto se for estável sobre a faixa de variação dos parâmetros, se tiver baixa sensibilidade e se, mesmo em presença de mudanças nos parâmetros do sistema, apresenta desempenho que atende às especificações previamente estabelecidas. Destarte, “robustez é a sensibilidade aos efeitos como: as perturbações, o ruído nas medições e a dinâmica não modelada, que não são considerados na fase de análise e de projeto do sistema de controle, mas que o sistema deve ser capaz de suportar” (DORF e BISHOP, 2001). Enfim, “a essência do controle robusto é modelar as incertezas e incorporá-las no projeto do sistema de controle, com o propósito de garantir estabilidade e desempenho em todos os pontos de trabalho” Tadeo et al. (2000). A valer, “o controle do processo de pH é um problema desafiador devido à forte não-linearidade e extrema sensibilidade a perturbações do processo” Wan et al. (2006).

De fato, na planta real de uma indústria ocorrem diversas perturbações durante um processo, sendo que estas perturbações podem comprometer a qualidade do produto, ou até interromper o processo. Para que isso não ocorra, o modelo matemático a ser implantado na construção do controlador deve ser o mais próximo possível da planta real, contemplando os principais aspectos físicos do processo. É importante observar que modelos não lineares podem conter parâmetros distribuídos, o que aumenta consideravelmente a complexidade do sistema. Uma solução para esse caso, é fazer uma aproximação para um modelo matemático linear de coeficientes constantes, sem que ele deixe de vislumbrar as características essenciais do objeto real. obtido esse modelo, o compensador utilizado no controlador, deve ter a menor ordem possível.

As incertezas decorrentes das divergências entre o modelo adotado e a planta real podem ser classificadas em: incertezas estruturadas, por exemplo, variação de polos e zeros na função de transferência e incertezas não estruturadas, por exemplo, a diferença decorrente da linearização de uma planta não linear. A incerteza não estruturada será representada por $\Delta(s)$ e será estimada quanto à sua magnitude e característica de fase para o dimensionamento do controlador que estabilizará o sistema de controle. Utiliza-se para isso, o teorema do ganho pequeno associado à norma H_∞ . O teorema do ganho pequeno é uma extensão do critério de estabilidade de Nyquist e é suficiente para garantir a estabilidade de um sistema. Ou seja, se um sistema obedece ao teorema do ganho pequeno, então ele é, certamente, estável. Sabendo disso, pode-se adotá-lo como critério de robustez.

Não se pode modelar com precisão, a incerteza Δ_m . Por isso, será utilizada uma função de transferência escalar $W_m(j\omega)$, cujo módulo é maior do que o maior valor singular da



incerteza $\bar{\sigma}\{\Delta_m(j\omega)\}$. Portanto: $\|W_m T\|_\infty < 1 \Rightarrow \|\Delta_m T\|_\infty < 1$. Assim, fazendo $\|\Delta_m T\|_\infty < 1$, obtém-se um controlador que garantirá a estabilidade do sistema.

3. RESULTADOS DA ANÁLISE

Nesta seção são apresentados: a estrutura do processo a ser controlado, os tipos de perturbações, o modelo matemático do processo e o arranjo esquemático do controlador, além da própria análise da robustez.

3.1 CONTROLE DO pH DO CALDO EM SUCROALCOLEIRAS

A figura 1 ilustra, esquematicamente, o controle de pH em um processo de produção de açúcar. Neste processo, características de perturbações e tempos mortos interferem substancialmente na performance do controlador. Uma variação de pressão na válvula é altamente danosa à ação de controle e, por isso, ela deve ser tratada como uma perturbação $p_1(t)$. Outra perturbação a ser considerada é a preparação manual da solução de cal, $p_2(t)$, o que produz importantes distorções na sua concentração. Esta perturbação tem periodicidade distinta de $p_1(t)$. As variações de pH do caldo que entra no processo, também devem ser tratadas como perturbação, $p_3(t)$. Esta perturbação tem ação direta na variável final do processo.

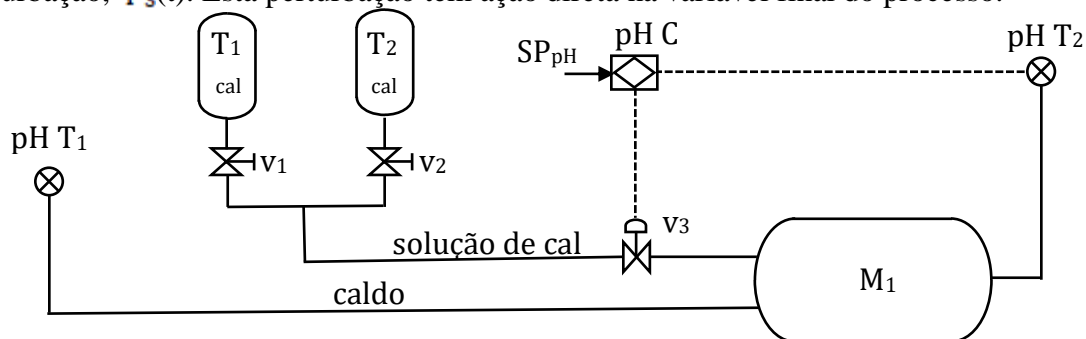


Figura 1. Diagrama de processo de instrumentação (P&I) do controle de pH do caldo.

Pode-se utilizar uma função de transferência de primeira ordem com atraso, para simplificar a modelagem do processo, que é não linear. Este modelo é proposto por Sunori et al. (2016). A incompressibilidade do líquido faz com que não haja um tempo morto na equação, entretanto, neste trabalho, o atraso de transporte pode ser representado, como mostrado na equação 1.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$



Onde $G(s)$, é a função de transferência, $Y(s)$ é a variável de saída (o pH do caldo depois da adição de cal), $F(s)$ é a abertura da válvula, em porcentagem, k é o ganho do sistema, θ é o tempo morto e τ é a constante de tempo do processo.

Caso os ranges estabelecidos estejam corretamente implantados nos transmissores pode-se considerar o ganho adimensional $k = 1$. O tempo morto e a constante de tempo são estimados em 30s e 2 minutos, respectivamente. Esses valores são compatíveis com aqueles das usinas visitadas ou seja, esses são valores obtidos por meio da experiência prática de operadores do processo em usinas de açúcar.

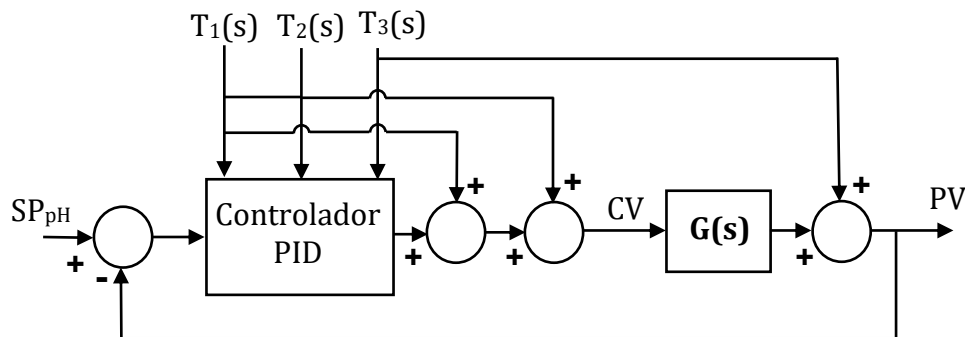


Figura 2. Diagrama de controle de pH do caldo.

Um processo em que a solução de cal é adicionada por gravidade é ilustrado na figura 2, por meio de uma válvula, utilizada como elemento final de controle. São consideradas perturbações: o nível do reservatório, pois a vazão é determinada pelo nível do reservatório e pode-se ter diferentes valores de vazão para uma mesma abertura de válvula e a variação do pH do caldo na entrada. Por isso, é imprescindível a instalação de um transmissor de pH na entrada do processo. Estas duas perturbações são inseridas no controlador na forma de derivada para que, com a sua variação, influenciem apenas no elemento final de controle. Quando estiverem em repouso, a abertura da válvula é controlada pelo integrador do controlador, que eliminará o erro de regime permanente. O aspecto preventivo da derivada das perturbações, praticamente elimina as influências negativas dessas duas perturbações.

Simulações computacionais, que farão parte da próxima etapa deste projeto, deverão ajudar a comprovar que o controlador em questão é capaz de responder, de forma segura, às perturbações, mantendo a variável controlada dentro das especificações de desempenho. Essas simulações podem ser realizadas fazendo-se uso do sistema de software Matlab/Simulink. Na



simulação, podem ser utilizadas funções de transferência de primeira ordem com constantes de tempo compatíveis com o que se verifica nas usinas de açúcar. Sendo $G_{p_1}(S)$, o nível do reservatório de cal; $G_{p_2}(S)$, o pH do caldo na entrada e $G_{p_3}(S)$ a concentração da solução de cal no reservatório.

$$G_{p_1}(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (2)$$

$$G_{p_2}(s) = \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} \quad (3)$$

$$G_{p_3}(s) = \frac{k_3}{\tau_3 s + 1} \quad (4)$$

3.2 ANÁLISE DA ROBUTEZ DO CONTROLE pH DO CALDO

A robustez de um sistema controlado é evidenciada quando, ao ser “perturbado”, ou seja, quando ocorre uma variação dos seus parâmetros no intervalo para os quais o sistema foi projetado, ele não perde a sua estabilidade e mantém o seu desempenho dentro de suas especificações. Para o controle do pH, são consideradas as seguintes perturbações: a variação de pressão na válvula devido à falta de um reservatório intermediário; a preparação manual da solução de cal e o pH variável da cana que entra no processo. A análise da robustez desse controlador pode ser realizada segundo a norma H_∞ , associada ao teorema do ganho pequeno, suficiente (de acordo com o teorema de Nyquist) para garantir a estabilidade do sistema. Também se sabe que, existem divergências entre o modelo da planta e o modelo adotado e como eles não são desprezados, pode-se obter um controle robusto do sistema.

4. DISCUSSÃO

A cana de açúcar, tal qual ela é extraída, necessita de um tratamento para a retirada de impurezas, antes do esmagamento para a extração do seu caldo. Logo na entrada do caldo no processo, verifica-se o primeiro problema, os pH's das remessas de cana são diferentes entre si, promovendo assim, uma perturbação ao processo a ser controlada. Durante o processo de tratamento do caldo, adiciona-se, manualmente, hidróxido de cálcio (cal) ao caldo, estabelecendo aí uma nova perturbação considerada. Outra perturbação observada ocorre devido à ausência de um reservatório intermediário, provocando uma variação de pressão na válvula. É importante lembrar que, por motivos já elucidados anteriormente, deve-se manter o pH estável e próximo do



valor de setpoint. O controle desse processo frequentemente enfrenta muitos problemas que são derivados da não-linearidade e do tempo, variando características de processo e por isso, “é muito árduo para obter uma resposta satisfatória, adequada ao desempenho e controle robusto com o uso de controladores comuns” Hosseini et al. (2013).

Dessa forma, para efetuar esse controle, optou-se por um controlador PID, que apresenta desempenho robusto, uma vez que ele pode responder muito bem diante de transitórios e em regime permanente, através das ações: proporcional (aumenta a velocidade de resposta do sistema), integral (elimina o erro de regime permanente) e derivativa (provoca o amortecimento e permite o aumento do ganho proporcional).

O PID é de fácil operação, pois pode ser implementado nas situações em que se tem o modelo matemático da planta, ou nas situações em que não se tem esse modelo, pois, é possível, experimentalmente, ajustar os seus parâmetros. E, além de tudo isso esse controlador apresenta um custo bastante viável.

Mesmo quando exposto a oscilações decorrentes das perturbações analisadas, se o sistema apresentar baixa sensibilidade, manter-se-á estável mediante variação de seus parâmetros, na sua faixa de operação e apresenta um desempenho compatível com as suas especificações. Nesse caso, dir-se-á que o sistema é robusto. Para a análise de robustez do controlador, a norma H_{∞} pode ser utilizada, associada ao teorema do ganho pequeno.

Dentre as possíveis dificuldades, pode-se citar, a obtenção de um modelo matemático linear de coeficientes constantes que contemple as características essenciais da planta. Pois, por ser simplificado, este modelo agrega erros de modelagem. Para ter-se um sistema de controle robusto, não se pode desprezar a diferença entre o modelo matemático adotado e a planta real. Essas diferenças são tratadas como incertezas a serem avaliadas pelo teorema do ganho pequeno, que acordo com a teoria de Nyquist, é suficiente para garantir estabilidade ao sistema.

5. CONCLUSÕES

Após realizadas as simulações, espera-se que o desempenho do sistema seja tal que:

1. O pH de saída do processo possa ser mantido estável e próximo do valor de referência.



2. O controlador PID operando com base na teoria da norma H_∞ apresente desempenho robusto por satisfatoriamente responder, diante de transitórios e em regime permanente.
3. E por certo, o controle deverá ser robusto devido à baixa sensibilidade e mantendo-se estável e com desempenho compatível com as especificações estabelecidas mediante variações de seus parâmetros na faixa de operação.

6. REFERÊNCIAS

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

AHMED, M.; HAERI, M. *An Integrated Performance and Robust Stability Based Multi-Model Control of Nonlinear Systems: A pH neutralization reactor*. 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2017), Tehran, Iran, 20 July 2017.

DOLATABADI, M. H.; MONFARED, M. N.; FAKHARIA, A. *Robust H-infinity Control for the pH Neutralization Process Based on Fuzzy Models*. 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC2013), Qazvin, Iran, August 2013.

TADEO, F.; LOPES, O. P.; ALVAREZ, T. **Control of Neutralization Processes by Robust Loopshaping**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 2, March 2000.

MERCADER, P.; SOTESZ, K.; BAÑOS, A. **Autotuning of an In-Line pH Control System**. IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, Germany, September 2016.

WAN, F.; SHANG, H.; WANG, L. **Adaptive Fuzzy Control of A pH Process**. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vancouver, Canada, July 2006.