



OTIMIZAÇÃO E CONTROLE PREDITIVO NA UNIDADE DE FERMENTAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE CANA DE AÇÚCAR

Palavras-Chave: Controle Preditivo, Fermentação Contínua, Produção de Etanol.

Autores(as):

Rodolfo Gomes Pereira Filho, FEQ – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Luz Adriana Alvarez Toro (orientadora), FEQ - UNICAMP

INTRODUÇÃO

Segundo a Renewable Fuels Association (2024), o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, com aproximadamente 33 bilhões de litros produzidos em 2024. Ele é usado como combustível automotivo sendo uma alternativa sustentável frente aos combustíveis fósseis como forma de mitigar a emissão de gases do efeito estufa.

Este trabalho busca simular o controle de uma planta de etanol por meio do uso de uma técnica de controle avançado, o controle preditivo baseado em modelo. Esse tipo de estratégia calcula a previsão de saída do processo para instantes futuros (SEBORG, 2004), num intervalo conhecido como horizonte de predição (N_p). A cada instante, o algoritmo determina os valores futuros das variáveis de entrada que minimizam uma função objetivo, considerando as restrições fornecidas. Finalizado esse cálculo, somente o primeiro sinal de controle da sequência obtido é aplicado ao sistema, e o procedimento é repetido para uma nova predição até atingir o valor de tempo desejado (CAMACHO, 2007).

A utilização deste tipo de controle tem como vantagens a fácil implementação de sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) e de restrições, além de ser versátil a uma variedade de processos (CAMACHO, 2007). O objetivo geral deste projeto é desenvolver e simular uma estratégia de controle preditivo na unidade de fermentação de uma planta de etanol a partir de cana de açúcar. Os quatro objetivos específicos são: estudar o processo de fermentação no contexto da produção de etanol, estudar as formulações matemáticas dos controladores preditivos MPC, simular o processo de fermentação em malha fechada com o controlador MPC, testando diferentes sintonias, e simular o processo considerando dois objetivos diferentes: produtividade e rendimento.

METODOLOGIA

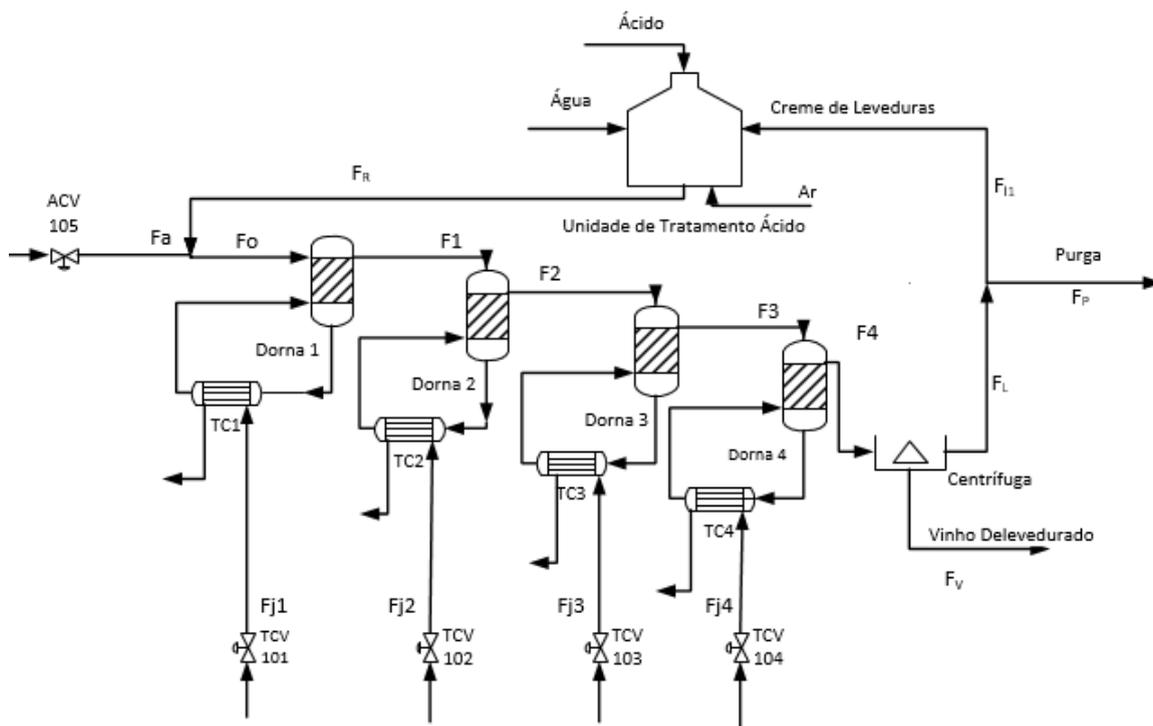
Estudo e Implementação da Simulação

Foi feita uma revisão dos principais conceitos relacionados ao controle de processos e do processo produtivo do etanol. A simulação foi realizada no software MATLAB, adaptando o código utilizado por Violaro (2019) em sua tese de mestrado.

Processo de Fermentação

A simulação consistiu num processo de fermentação contínua de etanol, constituída por 4 reatores de tanque agitado (CSTR). Em cada um dos reatores, existe um sistema de refrigeração com uma válvula que controla o fluxo de água de resfriamento e um controlador. Além disso, há também um controlador na válvula de alimentação que controla o fluxo de alimentação do sistema, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Representação do processo de fermentação contínua.



Fonte: Violaro (2019).

O fluxo que sai do quarto reator passa por uma centrífuga, que separa a corrente rica em etanol, denominada vinho delevedurado, do fluxo rico em células. O vinho delevedurado é enviado para um tanque para posterior destilação, e o fluxo rico em células passa por uma unidade de tratamento ácido e é reciclado para o sistema.

A modelagem do processo é descrita por seis equações diferenciais (MELEIRO, 2002). São elas: o balanço de massa de substrato, de células e de etanol; de energia do caldo fermentativo no reator, do caldo fermentativo no trocador de calor e do fluido refrigerante no trocador de calor.

Cada uma das seis equações descreve a dinâmica de um dos reatores e seu respectivo sistema de refrigeração, totalizando 24 equações.

As variáveis manipuladas consideradas no processo foram: vazão de alimentação (F_a), vazões do fluido de resfriamento nos trocadores de calor F_{ji} , com $i = 1$ até $i = 4$. As variáveis controladas: concentração do substrato na quarta dorna (S_4), temperatura dos reator T_i , com $i = 1$ até $i = 4$.

Controle Preditivo e Otimização

O modelo estado de espaços no domínio de tempo discreto ($k = 0, 1, 2, \dots, N$) foi utilizado para descrever o processo.

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

Os vetores $x(k)$, $y(k)$ e $u(k)$ correspondem, respectivamente, aos estados, às saídas e às entradas do processo. O modelo foi adaptado para uma versão incremental considerando o incremento de controle $\Delta u(k)$, sendo definido como $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$.

A estratégia do MPC consiste na obtenção dos valores da sequência de controle $\Delta u(k/k)$, $\Delta u(k+1/k)$, ..., $\Delta u(k+m-1/k)$, que minimiza a função objetivo J_k .

$$J_k = \sum_{j=1}^{N_p} (y(k + j|k) - y_{sp}(k)) \begin{matrix} T \\ Q \end{matrix} (y(k + j|k) - y_{sp}(k)) + \sum_{j=0}^{N_{c-1}} (\Delta u(k + j|k)) \begin{matrix} T \\ R \end{matrix} (\Delta u(k + j|k)) \quad (3)$$

Sujeito às restrições:

$$y_{min} \leq y \leq y_{max} \quad (4)$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (5)$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{max} \quad (6)$$

Tem-se que, N_c é o horizonte de controle, y_{sp} é o setpoint da variável de saída e $\Delta u(k/k)$ é o esforço do controle; Q e R são os parâmetros do controlador que definem os pesos das ações de controle e erro em relação ao setpoint, respectivamente.

Perturbações e Objetivos Econômicos

Os pesos do parâmetro de sintonia do vetor Q do controlador foram adaptados para a testagem sob dois diferentes cenários de perturbações.

No primeiro cenário, a temperatura da alimentação é aumentada 0,5 °C em 1h, 50h e 150h de simulação. No segundo cenário, a concentração de substrato na alimentação é aumentada em 0,125 kg/m³ nos mesmos instantes de tempo.

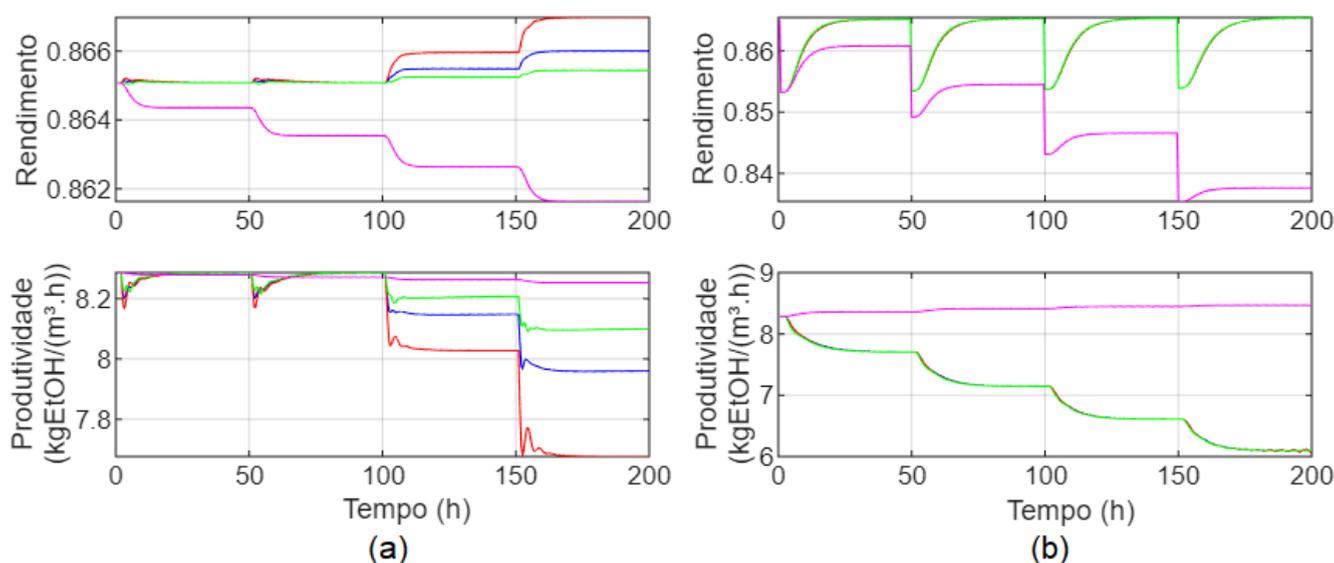
Em cada um dos cenários, foram testadas três estratégias de sintonia do vetor Q. A primeira corresponde à proposta por Violado (2019). A segunda utiliza o mesmo parâmetro, porém com penalidade da concentração do substrato multiplicada por três. E a terceira, com as penalidades relativas aos erros das temperaturas dos quatro reatores multiplicadas por três, resultando em seis simulações em malha fechada.

Foram calculados os valores de produtividade e de rendimento da produção, mas também a integral do erro quadrático (ISE) das variáveis controladas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para produtividade e rendimento são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - a) Cenário 1: aumento de temperatura, b) Cenário 2: aumento na concentração inicial de substrato.



Nos gráficos, tem-se: em azul, a sintonia padrão proposta por Violaro (2019); em vermelho, o caso com aumento das penalidades nas temperaturas; em verde, o com aumento da penalidade na concentração de substrato do reator 4; e em rosa, a simulação em malha aberta.

No primeiro cenário, o aumento da temperatura não ocasiona uma queda de produtividade na simulação em malha aberta. Entretanto, há uma queda no rendimento. Para os cenários em malha fechada, com o intuito de minimizar a perturbação aplicada, a vazão de alimentação é diminuída, causando uma queda na produtividade, mas com aumento do rendimento. Quanto maior a penalidade da temperatura em relação à do substrato, maior é a queda de vazão de alimentação.

No segundo cenário, o aumento de substrato na concentração inicial aumenta a produção de etanol e, conseqüentemente, a temperatura, devido a reação ser exotérmica. Nesse caso, há um aumento tanto da temperatura nos reatores, quanto da concentração de substrato no quarto reator, assim sendo, os controladores se comportam de maneira semelhante nas três sintonias.

Em relação às variáveis controladas, como foi esperado, o controle com sintonia de penalização aumentada no substrato controlou melhor a perturbação do mesmo na quarta dorna, e a com penalidade aumentada nas temperaturas dos reatores apresentou resultados melhores no controle de temperatura dos mesmos, com o controlador padrão apresentando valores intermediários, porém satisfatórios no controle das cinco variáveis.

CONCLUSÕES

O estudo da formulação matemática do controle preditivo baseado em modelo possibilitou o entendimento e a modificação do código em MATLAB das simulações. As simulações realizadas mostraram que nos controles de temperatura e substrato, a diminuição da vazão de alimentação possibilita a manutenção de temperatura ideal nos reatores. Apesar disso, embora o rendimento possa ser mantido ou até mesmo aumentado, temos uma perda inevitável de produtividade em troca do controle das variáveis. Desta forma, o controlador mais recomendado é o proposto por Violaro (2019) por ser o que apresenta benefícios mais equilibrados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

BIBLIOGRAFIA

Annual Ethanol Production. **Renewable Fuels Association**. 2024. Disponível em:

<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em 27 jul. 2025.

CAMACHO, E. F. **Model predictive control**. Coautoria de Carlos Bordons. London; New York, NY: Springer, c2007. 405 p., il.

MELEIRO, L. A. C. **Projeto e aplicação de controladores baseados em modelos lineares, neurais e nebulosos**. 2002. 304p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1593151>. Acesso em: 28 jul. 2025.

SEBORG, Dale E. **Process dynamics and control**. Coautoria de Thomas F Edgar, Duncan A Mellichamp. 2nd ed Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, c2004. 713p.

VIOLARO, F. **Controle preditivo multivariável de um processo de fermentação contínua para produção de etanol de primeira geração**. 2019. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.