



MODELAGEM DE SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO EM UMA PLANTA CERVEJEIRA

Aline Rodrigues Batista, Cesar Augusto Coelho Junior, Felipe Samuel Albuquerque Cavalcante,
Gabriel Antonio Tavares da Silva, Matheus Soares da Ressurreição, Nicolas Gabriel Alves Lima,

Victor Augusto Pires Ferreira

Dennis Lozano Toufen, Rodrigo Sislian

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS GUARULHOS

Resumo

O presente trabalho descreve o desenvolvimento analítico-formal e a arquitetura lógico-sistêmica de um aparato de controle térmico aplicado a uma unidade cervejeira piloto com capacidade nominal de 500 litros. A metodologia adotada fundamenta-se em procedimentos de modelagem matemática determinística, direcionados à caracterização dinâmica e ao equacionamento do subsistema de mosturação, materializado no equipamento do tipo Mash/Lauter Tun. A relevância do referido reator decorre de sua centralidade técnico-operacional e bioquímica no processo de brassagem, no qual ocorre a extração de açúcares fermentescíveis a partir da interação entre água aquecida e malte moído. Em virtude da elevada inércia térmica do sistema e da inexistência de mecanismos ativos de remoção de calor nesta etapa, o controle térmico demanda elevada precisão operacional, visando assegurar resposta superamortecida e eliminação de sobressinais potencialmente danosos à atividade enzimática.

Palavras-chave: controle térmico; Mash/Lauter Tun; modelagem matemática; brassagem; automação cervejeira.

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório consubstancia a descrição pormenorizada do desenvolvimento analítico-formal e da subsequente arquitetura lógico-sistêmica de um aparato de controle térmico aplicado a uma unidade cervejeira piloto com capacidade nominal de 500 litros. A abordagem metodológica adotada ancora-se em procedimentos de modelagem matemática de natureza determinística, orientando-se, de modo preponderante, à caracterização dinâmica e ao equacionamento do subsistema de mosturação, materializado fisicamente no equipamento do tipo



Mash/Lauter Tun.

A eleição deste reator como objeto nuclear de investigação fundamenta-se em sua elevada relevância técnico-operacional e bioquímica no contexto das operações unitárias que compõem a etapa de brassagem. É neste domínio físico que se processa a interação heterogênea entre a fase aquosa aquecida e a matriz particulada de malte moído, viabilizando a solubilização e subsequente extração de açúcares fermentescíveis. Tal fenômeno impõe a necessidade de implementação de perfis térmicos transientes rigorosamente definidos, cuja execução automatizada deve observar restrições estritas de precisão e rastreabilidade.

Para além de sua centralidade bioquímica, a seleção do referido subsistema encontra respaldo em sua expressiva complexidade sob a perspectiva da Engenharia de Controle. O Mash/Lauter Tun exhibe comportamento dinâmico fortemente dominado por elevada inércia térmica, associado à inexistência de mecanismos de remoção de calor por via ativa durante esta etapa. Nesse cenário, o dimensionamento e a parametrização do sistema de controle termodinâmico demandam calibração refinada, de modo a assegurar resposta em malha fechada caracterizada por regime estritamente superamortecido, eliminando a ocorrência de sobressinais potencialmente capazes de induzir processos irreversíveis de desnaturação térmica das enzimas cataliticamente ativas.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

A modelagem fenomenológica apoia-se na conservação de energia, assumindo mistura perfeitamente homogênea (*well-mixed system*) e ausência de gradientes espaciais (modelo de parâmetros concentrados). O balanço global de energia térmica é regido por:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = P(t) - U \cdot A \cdot [T(t) - T_{amb}] \quad (1)$$

Onde:

- $T(t)$: Temperatura do mosto.
- $P(t)$: Potência térmica inserida pelas resistências.
- m : Massa do fluido.
- c_p : Calor específico do fluido.
- $U \cdot A$: Coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área (perdas térmicas).



Sob a hipótese de invariância temporal da temperatura ambiente e mediante a adoção de variáveis de desvio com vistas à linearização do sistema em torno de um ponto de operação previamente definido, procedeu-se à aplicação da Transformada de Laplace ao modelo diferencial obtido. Tal operação viabiliza a transposição da descrição no domínio do tempo para o domínio complexo de frequência, permitindo a derivação da correspondente função de transferência em sua forma canônica padrão:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2)$$

Para o volume nominal de 500 L, os parâmetros físico-termodinâmicos foram estimados mediante a adoção de propriedades termofísicas aproximadas às da água líquida, sob condições operacionais típicas, bem como pela consideração de um regime de isolamento térmico compatível com padrões correntemente empregados na indústria cervejeira:

- **Massa (m):** 500 kg
- **Calor Específico (c_p):** 4184 J/(kg · K)
- **Perdas Térmicas ($U \cdot A$):** 20 W/K
- **Atraso de Transporte (θ):** 45 s (referente ao tempo de homogeneização da bomba e leitura do sensor PT100).

O ganho estático (K) e a constante de tempo térmica (τ) resultaram na seguinte função de transferência:

Ganho Estático do Processo (K):

$$K = \frac{1}{U \cdot A} \quad (3)$$

Substituindo em (3), tem-se:

$$K = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ K/W}$$

Constante de Tempo (τ): Representa a inércia térmica do volume de 500L.

$$\tau = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \quad (4)$$

Substituindo em (4):



$$\tau = \frac{500 \cdot 4184}{20} = 104600 \text{ s}$$

Dessa forma, substituindo K e τ em (2):

$$G(s) = \frac{0.05}{104600s + 1} e^{-45s}$$

Restrições Físicas e Não-Linearidades

Com o intuito de mitigar as restrições inerentes às abordagens de modelagem puramente teóricas e promover maior aderência entre a representação simulada e o comportamento observado em contexto industrial, procedeu-se à incorporação de duas não linearidades estruturais ao arcabouço do modelo:

1. **Saturação do Atuador:** A potência térmica de excitação constitui uma grandeza fisicamente limitada, não admitindo crescimento irrestrito. Nesse contexto, o modelo em malha fechada foi formalmente constrangido pelos limites operacionais impostos pelos relés de estado sólido (SSR) e pelos elementos resistivos de aquecimento, de modo que a variável de controle permanece confinada ao intervalo delimitado entre a condição de inatividade (estado desligado) e o patamar máximo de potência admissível em projeto.
2. **Anti-Windup (Clamping):** A coexistência de restrições de saturação do atuador com a elevada inércia térmica intrínseca ao sistema configura um ambiente dinâmico altamente suscetível à ocorrência do fenômeno de *integral windup*. Para mitigar tal efeito deletério, implementou-se um mecanismo de integração condicional (clamping), cujo propósito é interromper o acúmulo da ação integral sempre que a variável de controle atinge seus limites de saturação. Tal estratégia assegura uma recuperação mais célere da resposta em malha fechada e previne a ocorrência de sobressinais associados à ultrapassagem do valor de referência (*setpoint*).

Sintonia do Controlador (Método IMC)

A adoção da estratégia de Controle por Modelo Interno (IMC) fundamenta-se na necessidade intrínseca ao processo cervejeiro de se obter uma resposta estritamente superamortecida e sem sobressinais. O formalismo IMC baseia-se na compensação do polo dominante da planta, utilizando um parâmetro de sintonia (λ) que governa o compromisso entre rapidez de resposta e robustez.

Adotou-se o parâmetro $\lambda = 155 \text{ s}$ (aproximadamente 3,5 vezes o atraso de transporte). As relações analíticas do IMC estabelecem que a constante de tempo integral (τ_i) cancele a inércia térmica do sistema ($\tau_i = \tau = 104600 \text{ s}$), definindo o ganho proporcional (K_p):

Cálculo do Ganho Proporcional:



$$K_p = \frac{\tau}{K \cdot (\lambda + \theta)} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{104600}{0.05 \cdot (155 + 45)} = 10460$$

Para a implementação na arquitetura padrão do Simulink (forma paralela), a ação integral analítica foi convertida para o ganho integral direto (K_i)

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (6)$$

$$K_i = \frac{10460}{104600} = 0.1$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

- Modelagem fenomenológica do sistema térmico do Mash/Lauter Tun por meio de balanço global de energia, assumindo regime de mistura perfeitamente homogênea.
- Representação dinâmica da planta utilizando modelo concentrado (lumped parameter) de primeira ordem com atraso de transporte incorporado.
- Linearização do modelo em torno do ponto nominal de operação e obtenção da função de transferência mediante aplicação da Transformada de Laplace.
- Estimativa dos parâmetros termodinâmicos a partir de propriedades aproximadas da água líquida sob condições típicas de operação cervejeira industrial.
- Implementação computacional do sistema em MATLAB Simulink para análise da dinâmica térmica em malha fechada.
- Inserção de não linearidades físicas no modelo, incluindo saturação do atuador térmico e mecanismo de anti-windup por integração condicional (clamping).
- Sintonia analítica do controlador PI pelo método IMC (Internal Model Control), visando resposta estritamente superamortecida e ausência de sobressinal térmico.
- Validação do desempenho dinâmico mediante simulações numéricas submetidas a referências térmicas do tipo rampa, avaliando estabilidade, esforço de controle e comportamento transitório do sistema

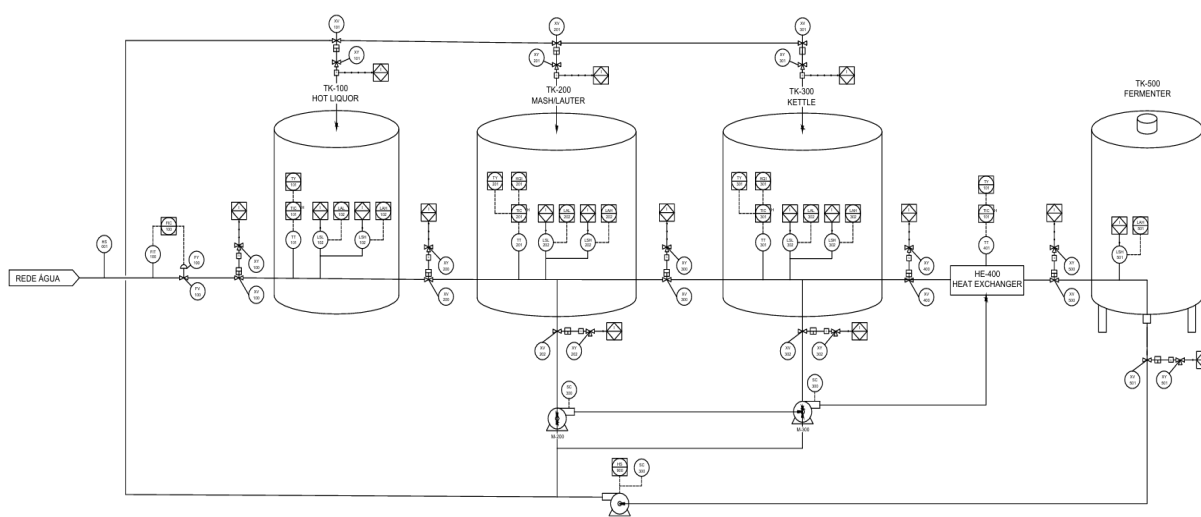
Diagrama de Tubulação e Instrumentação (P&ID)

O Diagrama de Tubulação e Instrumentação (P&ID) do skid de brassagem foi concebido em conformidade estrita com a ISA 5.1, representando a configuração físico-funcional dos principais equipamentos, **TK-100**, **TK-200**, **TK-300**, **TK-500** e sistema **CIP**. A fim de evitar ambiguidade na interpretação do sistema de automação, estabeleceu-se uma separação gráfica

rígida entre infraestrutura física e sinais de controle: linhas contínuas correspondem às rotas de processo e capilares de instrumentação, ao passo que linhas tracejadas denotam circuitos elétricos e enlaces lógicos internos ao CLP, responsáveis por vincular transmissores em campo aos blocos funcionais parametrizados na IHM.

O diferencial técnico do projeto reside na adoção de uma lógica distribuída de intertravamento, estruturada para atuar autonomamente na mitigação de riscos operacionais. Sensores de nível alto (LSH) intertravam diretamente os solenoides (XY) das válvulas de admissão, interrompendo instantaneamente o fluxo em condição de sobreenchimento. Em paralelo, sensores de nível baixo (LSL) foram associados aos relés do sistema de aquecimento (TY), prevenindo acionamento a seco das resistências e cavitação das bombas centrífugas quando o volume disponível se encontra abaixo do limite operacional seguro.

Figura 1 - Diagrama P&ID da planta completa



Fonte: Elaboração própria. (2026)

Lista de Entradas e Saídas (I/O)

Complementando o P&ID, a Lista de Entradas e Saídas (I/O) foi estruturada como documento de interface entre o processo físico e o hardware do CLP, subsidiando o dimensionamento dos módulos de aquisição, o projeto do painel elétrico e a lógica de controle. Nela consolidam-se todos os instrumentos do sistema, categorizados conforme natureza elétrica e função operacional.

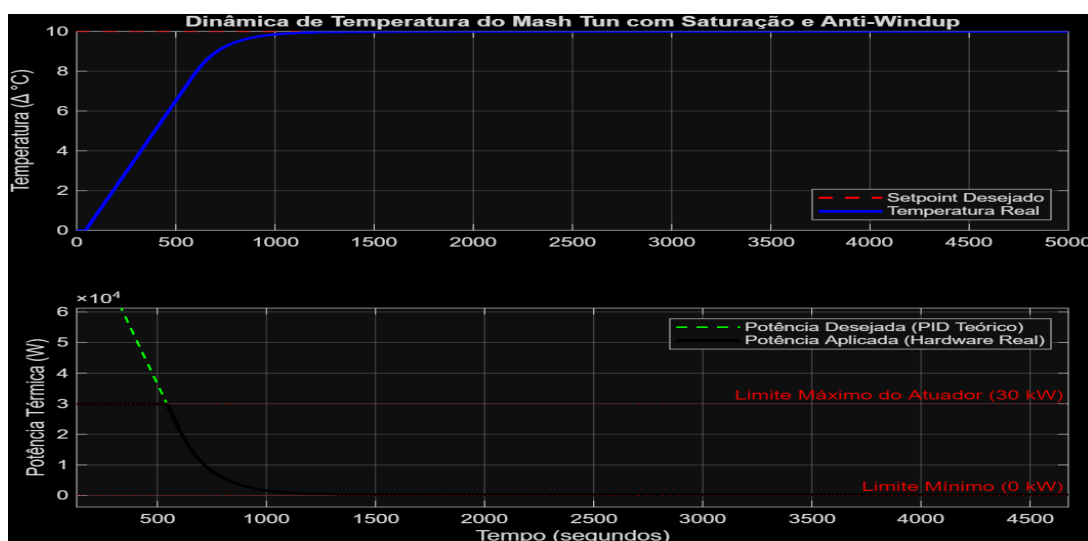
As Entradas Digitais (DI) registram estados provenientes de dispositivos de monitoramento e segurança, como as chaves de nível. As saídas digitais (DO) emitem comandos em 24 Vcc para elementos finais, incluindo contadores de bombas, relés de estado sólido de aquecimento e solenoides das válvulas automáticas (XV). Já as Entradas Analógicas (AI), no

padrão 4–20 mA, adquirem variáveis contínuas críticas, temperatura (TT) e vazão (FIT), essenciais para o controle PID. O fechamento das malhas ocorre por meio das saídas analógicas (AO), que modulam, por exemplo, a abertura da válvula de controle (FV), garantindo dosagem precisa ao longo do processo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação explícita das restrições físicas de atuação no modelo dinâmico evidenciou que a adoção de ganhos integrais elevados, ainda que formalmente compatíveis com critérios de estabilidade em sistemas estritamente lineares, conduz, em condições operacionais reais, à manifestação de sobressinais indesejáveis e potencialmente prejudiciais ao processo. A aplicação do arcabouço de Controle por Modelo Interno (IMC), parametrizado por meio dos coeficientes de sintonia correspondentes, em conjugação com a implementação do mecanismo de Anti-Windup, culminou em um perfil de esforço de controle caracterizado pela saturação deliberada no limiar seguro de operação do equipamento durante a fase transitória ascendente, seguida de uma modulação antecipatória e suavizada da injeção de energia térmica. Como consequência, obtém-se um regime de assentamento térmico de elevada precisão no entorno do valor de referência (*setpoint*), assegurando simultaneamente a preservação da atividade enzimática e a reprodutibilidade industrial requerida para a operação da planta com capacidade nominal de 500 L.

Figura 2 - Gráfico resultante aplicando o método IMC ($k_p = 10460$, $k_i = 0.1$)



Fonte: Elaboração própria. (2026)

A representação gráfica oriunda da simulação numérica demonstra o desempenho dinâmico do sistema de controle concebido quando submetido a uma referência do tipo rampa térmica de magnitude predefinida 10°C ($\Delta T = 10$). No gráfico superior, observa-se que a variável de processo (Temperatura Real) acomoda-se no *setpoint* de forma estritamente



superamortecida. A ausência total de sobressinal (*overshoot*) comprova a eficácia da sintonia analítica pelo método IMC, garantindo que as limitações bioquímicas da mosturação sejam respeitadas. O gráfico inferior evidencia a importância fundamental das restrições não-lineares inseridas no modelo: face ao erro inicial elevado, o cálculo teórico do controlador (linha tracejada verde) exige uma potência superior a 60 kW. Contudo, o hardware limitador entra em ação instantaneamente, cravando a potência aplicada (linha preta contínua) no limite real do equipamento de 30 kW. Em virtude da atuação do algoritmo de *anti-windup*, o termo associado à ação integral é formalmente restringido, sendo impedido de acumular o erro não realizável durante o regime de saturação contínua do atuador. Em decorrência dessa limitação imposta à dinâmica integrativa, nas proximidades do instante considerado, observa-se uma transição no comportamento do sinal de controle, condicionada pela mitigação dos efeitos de integração excessiva. $t = 500$ s, o sinal de controle passa a incorporar um comportamento antecipatório em relação à proximidade do valor de referência, desacoplando-se progressivamente do limite superior de saturação e ingressando em sua região de operação linear, na qual a modulação da ação de controle ocorre de forma contínua e proporcional. Por conseguinte, observa-se que o sistema converge para o regime permanente de maneira assintoticamente estável, no qual a potência térmica não é anulada, mas sim estabilizada em um patamar residual não nulo, estritamente requerido para a compensação das perdas de calor do tanque em direção ao meio ambiente circundante.

Em virtude da magnitude deste projeto, foi alcançado apenas um resultado parcial do sistema como um todo. O levantamento de materiais, tais como controladores lógicos programáveis, tubulações, sensores adicionais e tanques de processamento serão revisados em uma versão futura deste projeto, assim como a modelagem matemática completa.

5. REFERÊNCIAS

JOHNSTON, Barry S. **Lesson 5: Heated Tank**. Process Dynamics, Operations, and Control. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT OpenCourseWare), 2006.

INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA. ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992): Instrumentation symbols and identification. Research Triangle Park: ISA, 1992.

NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.