

ELT-039/130 Técnicas de Controle de Processos Industriais

Prof. Guilherme V. Raffo e Prof. Víctor C. S. Campos

Problema 2 - 10 pontos (Entrega via Moodle até o dia 07/10/2020)

Problema 3 - 10 pontos (Entrega via Moodle até o dia 14/10/2020)

Nome: _____

Nota: _____

Definição do Processo

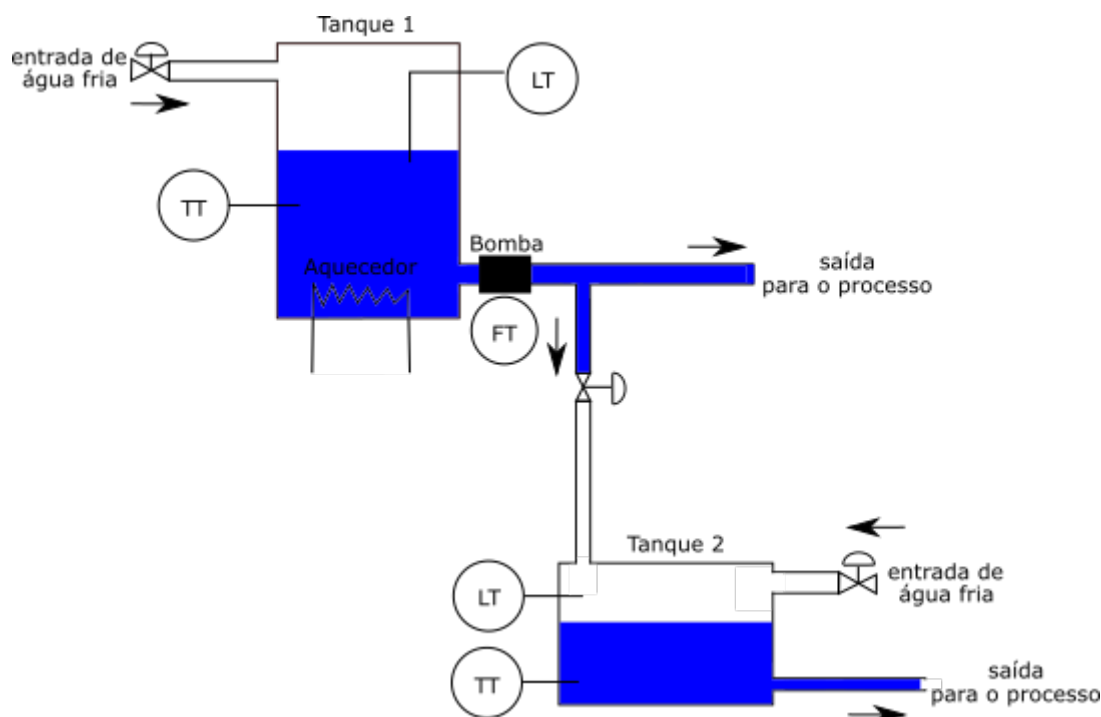


Figura 1. Processo de aquecimento de água para duas temperaturas diferentes

A figura acima ilustra um processo de aquecimento de água para dois valores diferentes de temperatura, composto por um tanque de aquecimento (Tanque 1) e um tanque de mistura (Tanque 2).

O tanque de aquecimento é equipado com uma válvula de controle (para a entrada de água fria no tanque), um aquecedor (responsável por injetar energia no sistema e aquecer a água) e uma bomba na saída do tanque (responsável por controlar a vazão de saída do tanque de aquecimento). Além disso, possui um sensor capacitivo para a medição do nível (LT), uma termorresistência para a medição da temperatura (TT) e a bomba é equipada com um sensor de vazão (FT).

O tanque de mistura é equipado com uma válvula de controle para a entrada de água quente (vinda do tanque de aquecimento) e uma válvula de controle para a entrada de água fria. Além disso, possui um sensor capacitivo para a medição do nível (LT) e uma termorresistência para a medição da temperatura (TT).

Para descrever a dinâmica do sistema, podemos considerar os balanços de massa e energia nos dois tanques.

Balanco de massa:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= q_{\text{in}} - q_{\text{o1}} \\ A_2 \frac{dh_2}{dt} &= q_{\text{q}} + q_{\text{f}} - q_{\text{o2}} \end{aligned}$$

Balanco de energia (com algumas simplificações):

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= \frac{1}{A_1 h_1} \left(q_{\text{in}} (T_{\text{f}} - T_1) + \frac{1}{\rho c} p \right) \\ \frac{dT_2}{dt} &= \frac{1}{A_2 h_2} (q_{\text{q}} (T_1 - T_2) + q_{\text{f}} (T_{\text{f}} - T_2)) \end{aligned}$$

Considerando as relações (simplificadas) para as válvulas de controle

$$\begin{aligned} q_{\text{in1}} &= \delta_1 \bar{q}_{\text{in}} \\ q_{\text{q}} &= \delta_q \bar{q}_{\text{q}} \\ q_{\text{f}} &= \delta_f \bar{q}_{\text{f}} \end{aligned}$$

e a relação linear da vazão de saída do tanque 2 (que não possui uma bomba na saída)

$$q_{\text{o2}} = \frac{h_2}{R_{\text{o2}}}$$

podemos descrever o comportamento do sistema com h_1 o nível no tanque 1, h_2 o nível no tanque 2, T_1 a temperatura no tanque 1, T_2 a temperatura no tanque 2, T_{f} a temperatura da água fria entrando no processo, A_1 a área da seção do tanque 1, A_2 a área da seção do tanque 2, q_{in} a vazão de entrada de água fria no tanque 1, q_{o1} a vazão de saída do tanque 1 (comandada pela bomba na saída do tanque), q_{q} a vazão de entrada de água quente no tanque 2, q_{f} a vazão de entrada de água fria no tanque 2, q_{o2} a vazão de saída do tanque 2, p a potência instantânea de aquecimento do tanque 1, ρ a densidade da água, c o calor específico da água, δ_1 a abertura da válvula de água fria no tanque 1, δ_q a abertura da válvula de água quente no tanque 2, δ_f a abertura da válvula de água fria no tanque 2, R_{o2} a resistência de saída que relaciona a vazão de saída do tanque 2 com o seu nível.

Considerando um comportamento em torno de um ponto de operação, temos que o comportamento do primeiro tanque pode ser descrito por

$$\begin{aligned} H_1(s) &= \frac{\bar{q}_{\text{in}}}{A_1 s} \delta_1(s) - \frac{1}{A_1 s} Q_{\text{o1}}(s) \\ T_1(s) &= \frac{\bar{q}_{\text{in}} (T_{\text{f0}} - T_{10})}{A_1 h_{10} s + \delta_{10} \bar{q}_{\text{in}}} \delta_1(s) + \frac{\frac{1}{\rho c}}{A_1 h_{10} s + \delta_{10} \bar{q}_{\text{in}}} T_{\text{f}}(s) + \frac{\delta_{10} \bar{q}_{\text{in}}}{A_1 h_{10} s + \delta_{10} \bar{q}_{\text{in}}} P(s) \end{aligned}$$

Considerando um comportamento em torno de um ponto de equilíbrio, temos que o comportamento do segundo tanque pode ser descrito por

$$\begin{aligned} H_2(s) &= \frac{R_{\text{o2}} \bar{q}_{\text{q}}}{R_{\text{o2}} A_2 s + 1} \delta_q(s) + \frac{R_{\text{o2}} \bar{q}_{\text{f}}}{R_{\text{o2}} A_2 s + 1} \delta_f(s) \\ T_2(s) &= \frac{(T_{10} - T_{20}) \bar{q}_{\text{q}}}{A_2 h_{20} s + \bar{q}_{\text{q}} \delta_{q0} + \bar{q}_{\text{f}} \delta_{f0}} \delta_q(s) + \frac{(T_{\text{f0}} - T_{20}) \bar{q}_{\text{f}}}{A_2 h_{20} s + \bar{q}_{\text{q}} \delta_{q0} + \bar{q}_{\text{f}} \delta_{f0}} \delta_f(s) \\ &\quad + \frac{\bar{q}_{\text{q}} \delta_{q0}}{A_2 h_{20} s + \bar{q}_{\text{q}} \delta_{q0} + \bar{q}_{\text{f}} \delta_{f0}} T_1(s) + \frac{\bar{q}_{\text{f}} \delta_{f0}}{A_2 h_{20} s + \bar{q}_{\text{q}} \delta_{q0} + \bar{q}_{\text{f}} \delta_{f0}} T_{\text{f}}(s) \end{aligned}$$

Problema de Controle 2

No problema de controle 2, focamos nossa atenção ao controle do tanque 1 do processo descrito acima. Devem-se projetar duas malhas de controle:

1. Controle do nível do tanque 1 (h_1) por meio da abertura da válvula de entrada fria (δ_1), considerando que não temos controle sobre a bomba de saída do tanque, mas temos acesso à sua vazão
2. Controle da temperatura no tanque 1 (T_1) por meio da potência fornecida ao aquecedor (sem acesso à temperatura da água entrando no processo)

Para o projeto dos controladores, considere que parâmetros do sistema e os valores de equilíbrio (definindo as funções de transferência do sistema) são fornecidos pela função *gera_params(matricula)*, disponível no arquivo *gera_params.p*, em que matrícula corresponde aos seis últimos dígitos de seu número de matrícula.

Tal função também retorna entre seus parâmetros a potência máxima permitida para o aquecedor.

A partir dos parâmetros, os seguintes passos devem ser atendidos.

1. Apresente um diagrama de blocos da estrutura de controle que será utilizada no controle do tanque 1 (para não ficar tão confuso, as malhas de nível e temperatura podem ser apresentadas separadamente).
2. Projete os controladores de forma que as respostas de seguimento de referência não possuam overshoot, com o tempo de acomodação em 5 por cento de *tempo_acomodacao_h1* para o nível e 0,8 do tempo de acomodação do comportamento em malha aberta para a temperatura.
3. Para o controle de nível, reprojete o controlador para o caso em que a abertura da válvula de água fria possui um tempo morto de valor igual à constante de tempo em malha fechada utilizada no item anterior.
4. Ainda considerando que a válvula de entrada de água possui um tempo morto, simule o comportamento com o controlador projetado (ignorando o atraso) com e sem um preditor de Smith (considerando diferentes variações da vazão de saída na mesma simulação)
5. Simule o comportamento de ambas as malhas de controle (nível e temperatura) considerando o efeito da saturação das entradas de controle (lembre que neste caso, os valores que servirão de limites para nossas variáveis de controle dependem do ponto de operação. *e.g.* Uma válvula pode ter abertura entre 0 e 1, entretanto para a obtenção da função de transferência considerou-se uma abertura de operação de 0,6 para a válvula. Dessa forma, seus limites de variação são entre -0,6 e 0,4). Compare o comportamento dos sistemas de controle utilizando e sem utilizar estratégias anti-windup para as ações integrais
6. O ganho e a constante de tempo da dinâmica da temperatura em relação à potência fornecida ao aquecedor variam de acordo com o nível do tanque. Tente propor uma estratégia de ganho escalonado para compensar este efeito.

Problema de Controle 3

No problema de controle 2, focamos nossa atenção ao controle do nível e temperatura do tanque 2 do processo descrito acima. Assim como para o problema de controle 2, para o projeto dos controladores, considere que parâmetros do sistema e os valores de equilíbrio (definindo as funções de transferência do sistema) são fornecidos pela função *gera_params(matricula)*, disponível no arquivo *gera_params.p*, em que matrícula corresponde aos seis últimos dígitos de seu número de matrícula.

A partir dos parâmetros, os seguintes passos devem ser atendidos.

1. Utilize a Matriz de Ganhos Relativos (*Relative Gain Array* - RGA) para definir um pareamento entre entradas de controle e saídas controladas. Como o foco maior do problema é em regular os valores em torno de um valor fixo, dê uma ênfase maior à análise da RGA em ganho estacionário.
2. Projete os controladores descentralizados (malhas de controle isoladas) de forma que o tempo de acomodação em 5 por cento seja 0,8 do tempo de acomodação do comportamento em malha aberta. Simule o comportamento do sistema multivariável.
3. Projete um desacoplador para desacoplar as malhas de temperatura e nível. Se não for possível/realizável proponha alguma aproximação. Apresente as funções de transferência do sistema desacoplado (ou aproximadamente desacoplado) e as respostas ao degrau (dica: se vocês utilizarem a função *step* do matlab em uma matriz de transferência, ela apresenta as respostas ao degrau de todos os pareamentos).
4. A partir das malhas desacopladas (aproximadamente desacopladas), projete os controladores de forma que o tempo de acomodação em 5 por cento seja 0,8 do tempo de acomodação do comportamento em malha aberta. Simule o comportamento do sistema multivariável.
5. Obtenha o controlador multivariável centralizado equivalente (aos controladores projetados e desacoplador) e simule o comportamento do sistema multivariável em malha fechada.