



Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Eletrônica

ELT-039/130 Técnicas de Controle de Processos Industriais

1o. semestre de 2021 - 21/07/2021

Prof. Guilherme V. Raffo

Problema 3 - 10 pontos

Entrega via Moodle até o dia 04/08/2021 às 23h59

Problema 4 - 20 pontos

Entrega via Moodle até o dia 18/08/2021 às 23h59

Nome: _____

Problema 3. (10 pontos)

Considere um sistema de tanques interconectados usado em um processo de aquecimento de água apresentado na Figura 1.

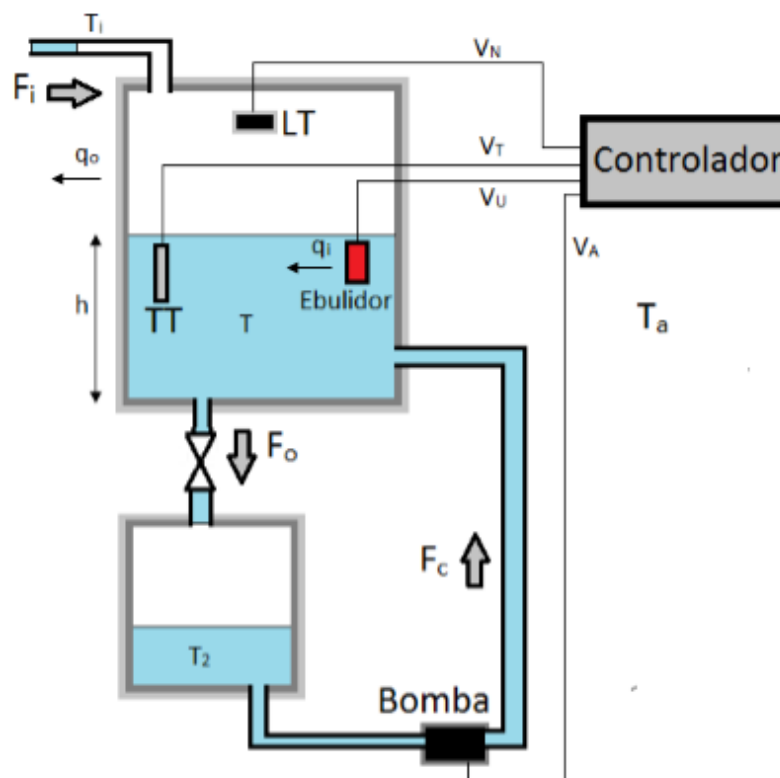


Figura 1: Sistema de aquecimento de água.

As variáveis controladas são o nível, h , e a temperatura do líquido no interior do tanque, T , cujas medidas são obtidas através de um ultrassom e de um sensor de temperatura, respectivamente. As variáveis manipuladas são o fluxo de saída da bomba hidráulica, F_c , e calor fornecido pelo ebulidor, q_i .

Através do balanço de massas para o sistema apresentado na Figura 1, tem-se a variação de nível, h , do tanque principal (T_1) sendo a soma dos fluxos de líquido que entram e que saem do sistema:

$$C_h \frac{dh(t)}{dt} = F_c(t) + F_i(t) - F_o(t), \quad (1)$$

onde C_h é a capacitância hidráulica que relaciona a variação de vazão de um fluido pela variação de nível em um intervalo de tempo, F_c é o fluxo de saída da bomba hidráulica, F_i é o fluxo de entrada de líquido externo e F_o é o fluxo de saída do tanque principal para o reservatório T_2 . Através da resistência hidráulica, R_h , que relaciona a vazão de determinado líquido em uma tubulação de um reservatório com um dado desnível, e considerando escoamento laminar, a relação obtida é linear e, portanto, tem-se:

$$F_o(t) = \frac{h(t)}{R_h}. \quad (2)$$

Para modelar a dinâmica de temperatura do líquido no tanque T_1 , faz-se o balanço de energia. Tem-se que a variação de temperatura do líquido é proporcional a soma de todo calor que entra e sai do sistema:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_i}{C_T} + Q_{F_i} + Q_{F_c} - \frac{q_o}{C_T}, \quad (3)$$

onde Q_{F_i} e Q_{F_c} são as parcelas de calor que chegam ao sistema pelas vazões F_i e F_c , respectivamente, q_i é o calor fornecido pelo ebulidor, q_o o calor que se perde para o meio externo e C_T é a capacitância térmica que relaciona a variação do fluxo de calor de um corpo pela taxa de variação de sua temperatura em um intervalo de tempo.

Os termos Q_{F_i} e Q_{F_c} são dados por:

$$Q_{F_i} = \frac{1}{Ah(t)} F_i(t) [T_i(t) - T(t)], \quad (4)$$

$$Q_{F_c} = \frac{1}{Ah(t)} F_c(t) [T_2(t) - T(t)]. \quad (5)$$

O termo q_o é modelado como segue:

$$q_o = \frac{T_i(t) - T(t)}{R_T}, \quad (6)$$

onde R_T é a resistência térmica que relaciona o fluxo de calor que passa através de determinado corpo devido a um gradiente de temperatura.

Linearizando o sistema representado pelas equações de (1)-(6) em torno de um ponto de equilíbrio ($h^*, F_c^*, F_i^*, T^*, T_i^*, T_2^*, q_i^*$), obteve-se o seguinte sistemas de equações diferenciais lineares:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{h}(t) &= \frac{1}{C_h} (\Delta F_c(t) + \Delta F_i(t) - \frac{\Delta h(t)}{R_h}), \\ \Delta \dot{T}(t) &= a \Delta T(t) + b \Delta h(t) + c \Delta q_i(t) + d \Delta F_c(t) + e \Delta F_i(t) + f \Delta T_i(t) + g \Delta T_2(t), \end{aligned} \quad (7)$$

onde:

$$\begin{aligned} a &= - \left(\frac{F_i^* + F_c^*}{Ah^*} - \frac{1}{C_T R_T} \right), \\ b &= - \left(\frac{F_i^*(T_i^* - T^*) + F_c^*(T_2^* - T^*)}{A(h^*)^2} \right), \\ c &= \frac{1}{C_T}, \\ d &= \frac{T_2^* - T^*}{Ah^*}, \\ e &= \frac{T_i^* - T^*}{Ah^*}, \\ f &= \left(\frac{F_i^*}{Ah^*} - \frac{1}{C_T R_T} \right), \\ g &= \frac{F_c^*}{Ah^*}. \end{aligned}$$

Os parâmetros da processo multivariável são obtidos através da função `parametrosProblema34.p`. **Deve ser inserido o número de matrícula do aluno SEM OS DOIS PRIMEIROS ALGARISMOS.** Como exemplo, apresenta-se o resultado obtido ao executar a ordem:

```
>> parametrosProblema34(12111111)
```

```
A matrícula introduzida é XX12111111
```

```
PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES
```

```
=====
```

```
Rh      : 6.600000e+00.
Ch      : 1.500000e-01.
CT      : 3.600000e+00.
RT      : 2.250000e-01.
A       : 1.250000e-02.
h*      : 1.250000e-01.
T*      : 2.700000e+01.
Ti*     : 1.700000e+01.
T2*     : 2.200000e+01.
Fc*     : 1.500000e-09.
Fi*     : 1.250000e-09.
qi*     : 4.000000e-09.
```

Pede-se os seguintes itens:

- (2 pontos)** Escreva o sistema linearizado utilizando a representação de matriz de transferência. Considere como saídas $\Delta H(s)$ e $\Delta T(s)$, como entradas $\Delta F_c(s)$ e $\Delta Q_i(s)$ e o como perturbações não mensuráveis $\Delta F_i(t)$, $\Delta T_i(t)$ e $\Delta T_2(t)$. Calcule os polos e zeros da matriz de transferência considerando os parâmetros obtidos através da função `parametrosProblema34.p`. Defina o emparelhamento das variáveis de entrada e saída do processo e análise a viabilidade do emparelhamento.
- (4 pontos)** Realize o projeto do sistema de **controle multi-loop** do processo para que cumpra as especificações abaixo. Simule em Matlab/Simulink o sistema de controle projetado (a escolha do método de sintonia dos controladores fica a cargo do projetista).:

- Rejeição das entradas de perturbação do tipo degrau;
- Seguimento de referência do tipo degrau das variáveis controladas (nível e temperatura);
- Em malha fechada, deseja-se obter respostas transitórias: (i) com tempo de acomodação de 5%, 2 vezes menor que em malha aberta, tanto no seguimento de referência, quanto na rejeição de perturbação; (ii) quando possível, sem pico nem oscilações para seguimento de mudanças de SP.

c) **(4 pontos extras)** Projete um sistema de **controle multivariável com desacoplamento** de forma a atenuar os acoplamentos entre as variáveis controladas e que cumpra as especificações dadas no item b). Simule em Matlab/Simulink o sistema de controle projetado

Problema 4. (20 pontos +10 pontos Extras)

No problema de controle 4, focaremos nossa atenção ao sistema controle multivariável projetado no item c) do Problema 3, onde se requer o controle das variáveis de nível e temperatura do tanque (T1). Devem-se projetar dois controladores para fins de comparação:

1. Controle multivariável de nível e temperatura do tanque (T1) através da técnica de controle preditivo denominada *Dynamic Matrix Control* (DMC), considerando no projeto do controlador as variáveis que perturbam o processo, quando disponíveis.
2. Controle multivariável de nível e temperatura do tanque (T1) através da técnica de controle preditivo denominada *Generalized Predictive Control* (GP).

Para o projeto dos controladores, considere a matriz de transferência do processo obtida no Problema 3, que relaciona as saídas de nível e temperatura do tanque (T1) com entradas do sistema. Portanto, os seguintes passos devem ser atendidos.

- a) **(2,5 pontos)** Defina o período de amostragem, T_s , do sistema multivariável em Malha-Fechada e discretize a matriz de transferência do processo em Malha-Aberta usando o método de Sustentador de Ordem Zero (do inglês *Zero-Order-Hold*). (Dica: usem o comando `c2d` do Matlab)
- b) **(10 pontos)** Baseado na matriz de transferência no domínio Z obtidas no item a), projete um controlador preditivo **DMC** multivariável para garantir erro nulo ao problema de seguimento de referência do tipo degrau e rejeição de perturbações constantes. Ademais, ajuste os parâmetros do DMC para que as especificações de tempo de acomodação em malha fechada, apresentadas no Problema 3, sejam atendidas.
- c) **(7,5 pontos)** Simule o comportamento do sistema controlado pelo DMC considerando o efeito da saturação das entradas de controle (definir valores aceitáveis para entradas de controle de acordo com os valores alcançados em regime permanente). Compare o comportamento do sistemas de controle utilizando e sem utilizar restrições na formulação do controlador preditivo. Dica: Implementar os problemas de otimização do DMC utilizando a função `quadprog` do Matlab.
- d) **(EXTRA: 5 pontos)** Baseado na matriz de transferência no domínio Z obtidas no item a), projete um controlador preditivo **GPC** multivariável para garantir erro nulo ao problema de seguimento de referência do tipo degrau e rejeição de perturbações constantes. Ademais, ajuste os parâmetros do GPC para que as especificações de tempo de acomodação em malha fechada, apresentadas no Problema 3, sejam atendidas.
- e) **(EXTRA: 5 pontos)** Simule o comportamento do sistema controlado pelo GPC considerando o efeito da saturação das entradas de controle (definir valores aceitáveis para entradas de controle de acordo com os valores alcançados em regime permanente). Compare o comportamento do sistemas de controle utilizando e sem utilizar restrições na formulação do controlador preditivo. Dica: Implementar os problemas de otimização do GPC utilizando a função `quadprog` do Matlab.