



## Universidade Federal de Minas Gerais Departamento de Engenharia Eletrônica

### ELT130 Técnicas de Controle de Processos Industriais

1o. semestre de 2023 - 06/05/2023

Professores Guilherme V. Raffo e Marcelo A. dos Santos

#### Prova 1 - 30 pontos

Nome: \_\_\_\_\_

Nota: \_\_\_\_\_

#### PARTE 1 - Problema (Com consulta) (22,5 pontos)

A Figura 1 mostra um esquema de fermentação em batelada usando um reator. O reator é alimentado com o produto A e o fermento D para produzir o produto C na saída do reator. Sendo um sistema em batelada, começa com o reator vazio e, ao final do processo, todo o produto é retirado. O objetivo do sistema é controlar a concentração,  $X$ , do produto C na saída do reator, que se mede com um sensor de concentração e deve seguir um degrau para que, ao final do tempo de processamento, chegue-se num valor desejado  $X_d$ .

Para conseguir uma fermentação adequada, as proporções de produto A e fermento D devem ser mantidas na proporção 10% de D e 90% de A. As vazões de A e D são controladas, respectivamente, pelas aberturas  $a_A$  e  $a_D$  das válvulas instaladas no reator, como mostra a Figura 1. A vazão de A,  $V_A$ , é a que define, basicamente, a alimentação do reator, já que a vazão de D,  $V_D$ , é muito menor que a de A. Assim,  $V_A$  se usa para controlar a concentração  $X$ . As vazões de A e D que efetivamente entram no reator, medidas com dois sensores de vazão, dependem também das pressões nas linhas de alimentação,  $p_A$  e  $p_D$  respectivamente, dado que vários reatores podem ser conectados simultaneamente na fábrica, o que pode causar variações de pressão nas linhas.

Outra variável importante é a temperatura dentro do reator  $T$ , que deve ser mantida constante para que a fermentação se realize corretamente. Assim, um líquido refrigerante circula pela camisa do reator, impulsionado por uma bomba  $B$ , permitindo alterar a temperatura dentro do reator  $T$ .

Resumindo, o sistema possui medidores de vazão de produto A e D, de concentração  $X$  na saída do reator e de temperatura  $T$  dentro do reator. Os atuadores são as duas válvulas e a bomba usadas para o controle das vazões de A e D e do refrigerante, respectivamente.

O modelo do processo foi levantado a partir de modelos fenomenológicos e linearizado nas vizinhanças do ponto de operação, obtendo-se os seguintes modelos incrementais (os tempos estão todos em segundos):

$$X(s) = \frac{2}{(20s+1)(2s+1)}V_A(s) - \frac{0.5}{(20s+1)}T(s), \quad T(s) = \frac{1}{2s+1}[T_A(s) - \frac{2}{0.1s+1}U(s)]$$

,

$$V_A(s) = \frac{5}{s+1}[a_A(s) + 0.7p_A(s)], \quad V_D(s) = \frac{3}{0.5s+1}[a_D(s) + 0.8p_D(s)],$$

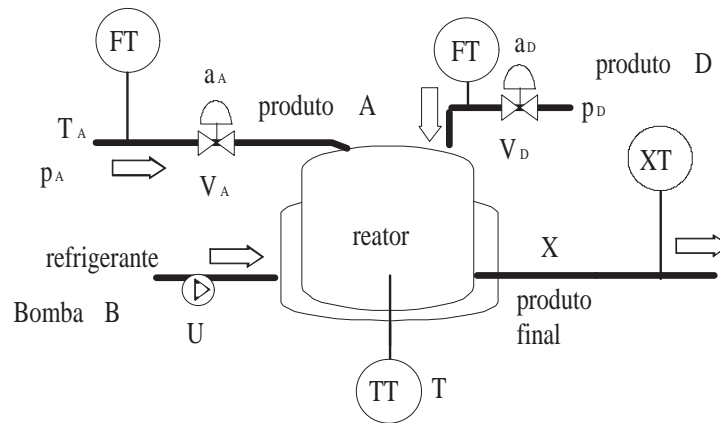


Figura 1: Sistema de fermentação batelada.

onde  $T_A(s)$  é a temperatura de entrada do produto A e  $U(s)$  representa o sinal de controle enviado ao acionamento da bomba.

As especificações de controle são as seguintes:

- o tempo de 5% de resposta de malha fechada para seguimento de referência de degraus de  $X$  deve ser menor ou igual a 30 segundos;
- as respostas não devem apresentar sobre-oscilação;
- as perturbações de tipo degrau de  $T_A$ ,  $p_A$ ,  $p_D$  devem ser rejeitadas de forma rápida e eficiente;
- os efeitos de  $T$  sobre  $X$  devem ser atenuados no regime transitório da melhor maneira possível;
- a mistura de A e D dentro do reator deve ser mantida na proporção correta especificada.

Projete e ajuste o sistema de controle de concentração,  $X$ , utilizando somente as variáveis disponíveis para medição e atuação e considerando as especificações e as restrições impostas pelos sinais disponíveis. A escolha do método de projeto e sintonia dos controladores fica a cargo do projetista, salvo o caso que a técnica seja especificada no problema. **Quando possível, utilize modelos simplificados para o projeto dos controladores.**

Para isso leve em consideração as seguintes etapas:

1. Defina uma estrutura para o sistema de controle utilizando somente as variáveis disponíveis para medição e atuação e que atenda a todas as especificações. Indique a configuração de cada controlador a ser usado e justifique as escolhas, isto é, explique claramente quais os objetivos de cada controlador proposto. Desenhe o diagrama completo da estrutura de controle detalhando as conexões de planta com os controladores a serem projetados. **(9 pontos)**
2. Ajuste os controladores definidos em (1.) para atender as especificações. **(9 pontos)**
3. Analise a resposta obtida, principalmente no que diz respeito à velocidade de rejeição das perturbações do sistema. **(2 pontos)**
4. O controle obtido em (1.) deve ser implementado em um PC conectado ao processo por uma placa AD/DA. Portanto, defina o período de amostragem para cada malha do sistema de controle. **(2,5 pontos)**

5. **Bonus** Baseado nos períodos de amostragem definidos no item (c), escreva um pseudo código de controle a ser implementado, incluindo todos os passos e cálculos a serem realizados com todas as variáveis. Não precisa discretizar detalhadamente as leis de controle, apenas escreva a forma geral de cada uma para saber quais variáveis são usadas e organize a sequência de cálculo das mesmas. Caso queira discretizar os controladores, utilize a aproximação de Euler ( $s = \frac{z-1}{T_s}$ , sendo  $T_s$  o período de amostragem). **(3 pontos)**

**Notas:**

- Um sistema de segunda ordem com polos complexos não apresenta pico real na resposta se o amortecimento  $\xi$  for maior que 0.9. Pode ser analisado como tendo uma resposta com polos duplos, inclusive para o cálculo do  $t_{5\%}$ .
  - O tempo de acomodação de um sistema de segunda ordem com polos reais e iguais ( $\zeta = 1$ ) pode ser calculado por  $t_{5\%} = \frac{4,8}{\omega_n}$
  - O tempo de acomodação de um sistema de segunda ordem com polos complexos ( $0 < \zeta \leq 0,7$ ) pode ser calculado por  $t_{5\%} = \frac{3}{\zeta \omega_n}$
  - O tempo de acomodação de um sistema de segunda ordem com dois polos reais e diferentes ( $\zeta > 1$ ) pode ser calculado por  $t_{5\%} = 3\tau_{lento} + 1,5\tau_{rapido}$
- Um sistema de terceira ordem com polos reais iguais em  $p = -1/\tau$  tem  $t_{5\%}$  aproximado por  $6.3\tau$  (isto também vale para quando os pólos estão bem próximos).
- Um sistema de terceira ordem com polos reais diferentes em  $p_i = -1/\tau_i$  tem  $t_{5\%}$  aproximado por  $3\tau_1 + 1.5(\tau_2 + \tau_3)$  sendo  $\tau_1$  a maior constante de tempo.
- Um sistema de terceira ordem com dois polos complexos ( $s = -\xi w + jw\sqrt{1-\xi^2}$ ) e um real mais lento ( $p = -1/\tau$ ) tem  $t_{5\%}$  aproximado por  $3\tau + 0.25(3/(\xi w))$ .

**ATENÇÃO: GUARDE O ENUNCIADO DA PARTE 1 PARA A SEGUNDA PARTE DA PROVA, POIS PODE PRECISAR DOS DADOS DO PROCESSO**

## ELT-039/130 Técnicas de Controle de Processos Industriais

1o. semestre de 2019 - 13/04/2019

Prof. Guilherme V. Raffo

### Prova 1 - 30 pontos

Nome: \_\_\_\_\_

Nota: \_\_\_\_\_

#### **PARTE 2 - Questões de verdadeiro ou falso (Vetado o uso de celular e tablet ) (7,5 pontos)**

O engenheiro responsável do projeto precisa adaptar o sistema de controle já projetado na parte 1 a um segundo reator que possui a mesma estrutura de camisa e alimentação, mas que processa outro produto. Assim, ele aproveita o controle de temperatura e de vazão, mas deve reprojeter o controle de concentração (malhas de FF de temperatura e de realimentação de  $X$ ).

O novo modelo do processo levantado a partir de modelos fenomenológicos e linearizado nas vizinhanças do ponto de operação é:

$$X(s) = \frac{2(1-s)}{(25s+1)(1+s)}V_A(s) - \frac{1}{(25s+1)}T(s)$$

Os objetivos de controle são, praticamente, os mesmos da parte 1. No entanto, agora, requer-se-á que o sistema de controle em malha fechada siga referências do tipo rampa de  $X$ .

1. Portanto, supondo que o engenheiro é capaz de projetar o controle de realimentação de  $X$  com ação dupla integradora de forma a atender as especificações de malha fechada, indique das alternativas abaixo quais são verdadeiras (V) e quais são falsas (F).

**Neste item, cada questão assinalada de forma correta vale 1,5 ponto. Uma questão assinalada errada vale -1,5 ponto e uma não assinalada não vale nada**

- ( ) Rampas de perturbação de  $T$  serão rejeitadas em regime permanente (com erro zero) independente do uso ou não do controle FF.
- ( ) Caso o FF não seja ideal, rampas serão rejeitadas com erro, o valor do erro em regime permanente será calculado como o  $2/K_v$  sendo  $K_v$  o ganho de velocidade do controle de realimentação de  $X$  projetado.
- ( ) Para o projeto do controle realimentado de  $X$  usando o LR, o ganho do LR será negativo, pois o ganho da planta neste reator é negativo.
- ( ) Para o projeto do controle realimentado de  $X$  usando o LR, o ganho do LR será negativo, pois o ganho da planta neste reator é positivo mas a planta tem resposta inversa.
- ( ) Se o ganho do processo for estimado com erro de 10% (pode supor que a FT de  $V_A(s)$  para  $X(s)$  real tem ganho 10% maior que o modelo calculado para usar no controle) e não tem erro na estimação do ganho da FT de  $T(s)$  para  $X(s)$ , e apenas o controle FF está operando, então o efeito de uma perturbação degrau de valor 5 de temperatura causará uma variação da concentração de  $-0.5$  em regime permanente.