



# Universidade Federal de Minas Gerais

## Departamento de Engenharia Eletrônica

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

Curso de Engenharia de Controle e Automação - 2o. semestre de 2014 - 01/10/2014

Prof. Guilherme V. Raffo

#### Prova 1 - 30 pontos

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

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

#### Problema (30 pontos)

Uma incubadora neonatal é um equipamento que proporciona a um recém-nascido um ambiente termo-neutro, controlado pelos fatores fluxo de ar interior, umidade e temperatura. Geralmente é utilizada em prematuros. Basicamente ela é composta de um habitáculo de material transparente (acrílico) com um colchonete onde o bebê deita de forma a ser constantemente monitorado, e de uma unidade de produção de calor e umidade que injeta ar no habitáculo, separada do mesmo por uma base metálica. A figura 1 apresenta um esquema simplificado da incubadora onde se observam:

- a. um depósito de água de base  $100 \text{ cm}^2$  e altura de 10 cm com sistema de alimentação por bomba e com uma resistência elétrica para aquecimento da água que produz;
- b. um aquecedor elétrico usado para aquecer o ar;
- c. um ventilador usado para circular o ar quente e úmido para o interior do habitáculo;
- d. sensores de temperatura  $T$  e umidade  $H$  do habitáculo, assim como da temperatura da água  $T_a$  e do nível  $L$  do reservatório.

O ventilador usado no sistema não possui controle de velocidade e apenas permite uma circulação do ar mínima no habitáculo.

Para o controle da umidade  $H$  se utiliza a unidade de geração de vapor, que funciona mantendo o nível do reservatório  $L$  entre 70% e 100% (para evitar a queima da resistência elétrica) e controlando a temperatura da água  $T_a$  próxima de 100 graus através do sinal  $U_1$ , que controla a potência dissipada na resistência  $R_1$ .

Já a temperatura da incubadora é controlada através do sinal  $U_2$  que controla a potência dissipada na resistência  $R_2$  do aquecedor elétrico. Por causa do acoplamento entre a umidade e temperatura dentro do habitáculo, variações de  $U_1$  também afetam  $T$  e variações de  $U_2$  também afetam  $H$ . As principais perturbações do sistema são a temperatura  $T_b$  e umidade  $H_b$  do ambiente, as trocas térmicas entre o bebê e o ar do interior da incubadora assim como as aberturas eventuais de pequenas portas instaladas no habitáculo (nenhuma das perturbações é medida).

O modelo do processo foi levantado por ensaios experimentais nas vizinhanças do ponto de operação (temperatura de 32 graus e umidade de 60%) e estimando os efeitos de  $T_b$  e  $H_b$ , obtendo-

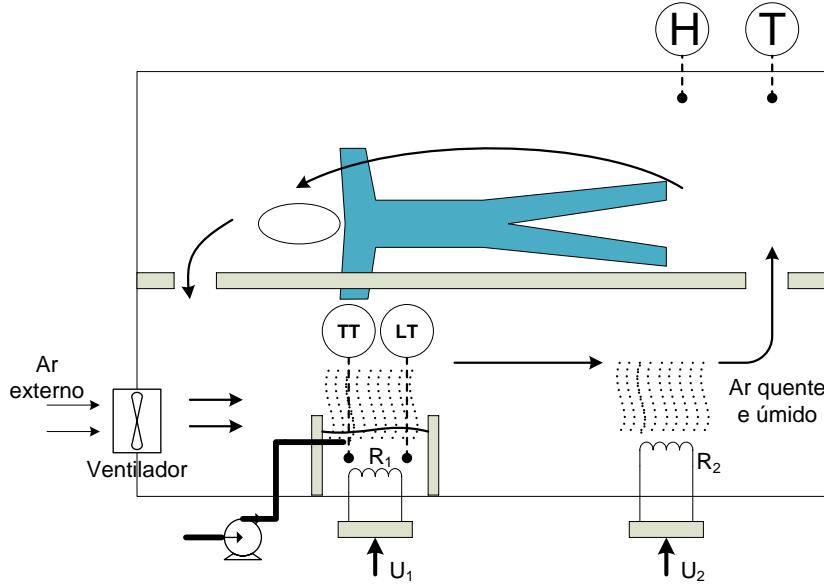


Figura 1: Incubadora neonatal para prematuros.

se os seguintes modelos (os tempos estão todos em segundos):

$$H(s) = \frac{10}{20s+1}[H_b(s) + 5T_a(s)] - \frac{7}{15s+1}U_2(s),$$

$$T_a(s) = \frac{2}{s+1}U_1(s),$$

$$T(s) = \frac{8}{(50s+1)(70s+1)}[4U_2(s) + T_b(s)] + \frac{3}{30s+1}U_1(s)$$

O objetivo do sistema de controle é manter a temperatura e umidade do habitáculo no ponto de operação rejeitando as perturbações causadas pelas variações de temperatura  $T_b$  e umidade  $H_b$  do ambiente (que são modeladas por sinais do tipo degrau). As especificações para projeto do sistema de controle em malha fechada são as seguintes:

- i) Controlar o sistema de forma a “minimizar” os acoplamentos entre temperatura e umidade do habitáculo.
- ii) Ter respostas transitórias em malha-fechada de  $T$  com  $t_{5\%} \leq 3$  minutos, sem pico nem oscilações para seguimento de mudanças de SP de  $T$  e também para a rejeição de perturbações de  $T_b$ .
- iii) Ter respostas transitórias em malha-fechada de  $H$  com  $t_{5\%} \leq 30$  segundos, sem pico nem oscilações para seguimento de mudanças de SP de  $H$  e também para a rejeição de perturbações de  $H_b$ .
- iv) Rejeição das perturbações de  $H_b$  e  $T_b$  do tipo degrau em regime permanente.

Portanto, projete e sintonize o sistema de controle considerando as especificações e as restrições impostas pelos sinais disponíveis. A escolha do método de projeto de controle fica a cargo do projetista, salvo o caso que a técnica seja especificada no problema. Para isso leve em consideração as seguintes etapas:

1. Analise o sistema de controle de nível na geração de vapor. Considere as seguintes possibilidades: controle *on-off* e controle P. Explique como se define os controladores em cada caso. Compare as soluções em termos da instrumentação requerida e do desempenho do sistema. Aponte vantagens e desvantagens. **(5 pontos)**
2. Projeto da malha de controle de umidade: **(12.5 pontos)**
  - a) Defina uma estrutura completa para o sistema de controle de  $H$  justificando todas as escolhas, isto é, explicando claramente quais os objetivos de cada controlador proposto. Desenhe o diagrama completo da estrutura de controle detalhando as conexões de planta com os controladores projetados. **(5 pontos)**
  - a) Ajuste os controladores e analise a solução no domínio do tempo e usando diagramas pôlo-zero. Analise detalhadamente o efeito das perturbações na saída do sistema. **(7.5 pontos)**
3. Projeto da malha de controle de temperatura: **(12.5 pontos)**
  - a) Defina a estrutura completa do sistema de controle de  $T$  para atender as especificações justificando todas as escolhas, isto é, explicando claramente quais os objetivos de cada controlador proposto. Desenhe o diagrama completo da estrutura de controle detalhando as conexões de planta com os controles projetados. **(5 pontos)**
  - b) Projete o controlador da malha de realimentação utilizando uma estrutura de controle PID acadêmica e ajuste-o através da técnica de controle por modelo interno (IMC). Encontre a FTMF do set-point para a temperatura  $T/T_r$  e da perturbação para a temperatura  $T/T_b$ , tanto no caso nominal ( $P = P_n$ ) como no caso real ( $P \neq P_n$ ). Com um ajuste adequado o controle proposto permitiria atender no caso nominal a todas as especificações definidas? Justifique. **(5 pontos)**
  - d) Analise a solução no domínio do tempo e usando diagramas pôlo-zero. Analise detalhadamente o efeito das perturbações na saída do sistema. **(2.5 pontos)**
4. **Bonus** Defina o período de amostragem para cada malha do sistema de controle de umidade e discretize os controladores propostos utilizando a aproximação de Euler ( $s = \frac{z-1}{T_s}$ , sendo  $T_s$  o período de amostragem). Baseado nos controladores discretizados, escreva o código completo, isto é, definindo todos os passos e cálculos a serem realizados com todas as variáveis. **(5 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  $t_{5\%}$ .
- Um sistema de terceira ordem com pólos 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 pólos 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 contante de tempo.
- Um sistema de terceira ordem com dois pólos complexos ( $s = -\xi w + jw\sqrt{1-\xi^2}$ ) e um real mais lento ( $p = -1/\tau$ ) tem  $t_{5\%}$  aproximado por  $3\tau + 0.25(3/(\xi w))$ .









