

Modelação e Controlo de um Sistema de Nível de Líquido para o Ensino de Controlo de Sistemas em Engenharia Electrotécnica

Joaquim Soares , Luis Encarnação e José Ribeiro
 Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação
 Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
 Av. Cons. Emídio Navarro 1, 1950-062 Lisboa, Portugal

E-mail: joaquimsoares@deea.isel.ipl.pt, luisrocha@deea.isel.ipl.pt, jribeiro@deea.isel.ipl.pt

Resumo

Neste trabalho descreve-se a metodologia que foi implementada de forma a tornar a aprendizagem de controlo de sistemas mais simples e atractiva através da realização de trabalhos experimentais. Descrevem-se as etapas de trabalho em que os alunos efectuem a modelação, a síntese do controlador, a simulação do sistema, os ensaios experimentais de um processo constituído por um sistema de nível de líquido com 2 tanques e a análise de resultados.

Desenvolveu-se um software que permite a realização de ensaios experimentais, acompanhar a evolução do ensaio em tempo real e a recolha de dados para posterior análise.

Finalmente analisam-se os resultados obtidos com a implementação desta metodologia de ensino.

Palavras-chave: Ensino assistido por computador, controladores analógicos e digitais, modelos matemáticos, sistemas de nível de líquido.

1. Introdução

A realização de trabalhos experimentais é uma componente muito importante no ensino de engenharia. Os sistemas de nível de líquido são muito usados em processos industriais e bastante adequados ao ensino da teoria de controlo.

Neste trabalho um sistema comercial de nível de líquido para o ensino (coupled tank, ref^a CE105 da Tequipment) foi modelado de forma a ser usado com maior versatilidade. Foi desenvolvido o programa CSNIVEL com uma interface simples e intuitiva que permite o ajuste dos parâmetros do sistema, a monitorização de experiências em tempo real e a aquisição e gravação dos dados para posterior análise.

Descreve-se a metodologia utilizada no ensino de controlo de sistemas que compreende a modelação, simulação, ensaio experimental e análise de resultados.

2. Descrição do Sistema

O sistema de controlo para o ensino é constituído por 3 blocos principais: controlador, processo e sensor conforme mostra a fig. 1.

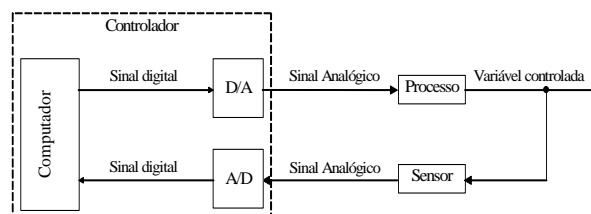


Fig 1. Blocos principais do sistema

A. Controlador

Para o controlo do sistema pode usar-se um controlador analógico ou um controlador digital.

- 1) *Controlador analógico.* É composto principalmente por uma montagem electrónica onde podem ser implementadas as acções de controlo P, I, PI e PID, com ganhos que podem variar entre 0.01 e 10. Os sinais são na gama entre -10 V e 10 V. É dotado ainda de uma interface digital que permite efectuar a aquisição de sinais e a sua monitorização no computador.

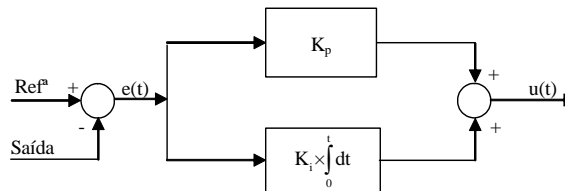


Fig. 2. Controlador PI analógico

$$u(t) = e(t) \cdot K_p + K_i \int_0^t e(t) \times dt \quad (1)$$

- 2) *Controlador digital.* O controlador digital é composto por uma interface digital e por um computador onde corre o programa CSNIVEL. A interface converte os sinais analógicos do

processo em sinais digitais e o sinal digital de comando em analógico. O programa CSNIVEL foi desenvolvido na linguagem C++ e permite a introdução dos parâmetros da experiência a realizar através do quadro de parâmetros da figura 3.

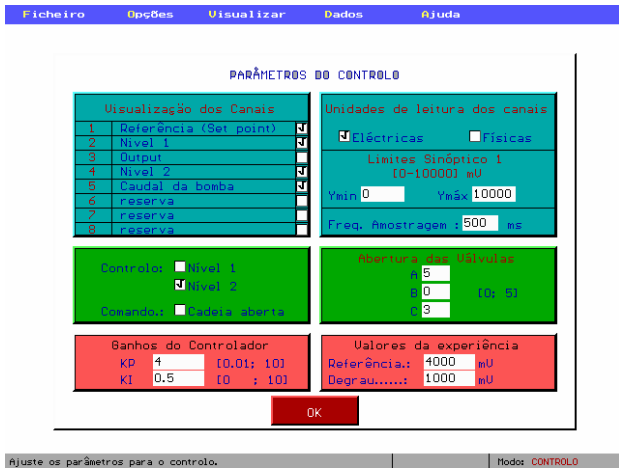


Fig. 3. Quadro de introdução de parâmetros

O programa permite efectuar 3 tipos de experiências:

- Comando em cadeia aberta em que se define o caudal de entrada nos tanques. Através desta experiência podem obter-se alguns parâmetros do sistema como a resistência e a capacitância hidráulicas do sistema.
- Controlo em cadeia fechada, do nível do tanque 1 ou do nível do tanque 2, usando um controlador PI digital.

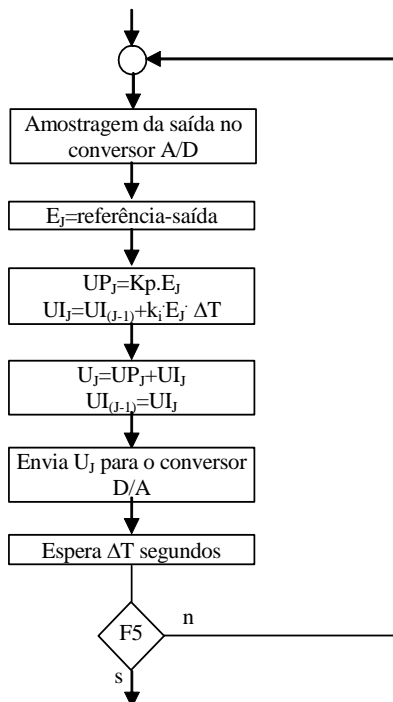


Fig. 4. Algoritmo do controlador PI digital

$$U_j = UP_j + UI_j \quad (2)$$

$$\begin{cases} UP_j = K_p \cdot E_j \\ UI_j = UI_{j-1} + k_i \cdot E_j \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

B. Processo

O processo é composto por dois tanques interligados, abastecidos por um reservatório através de uma bomba que bombeia o líquido deste reservatório para o 1º tanque. Entre os dois tanques existe a válvula A, do 1º tanque para o reservatório existe a válvula B e do 2º tanque para o reservatório existe a válvula C. As válvulas têm características semelhantes e foram modeladas para as posições de 0 a 5 da sua escala.

C. Sensores

Cada um dos tanques está provido de um sensor de nível do tipo resistivo cujo valor óhmico é proporcional ao comprimento de resistência imersa no líquido.

Entre a bomba e o tanque existe um caudalímetro do tipo rotâmetro constituído por um tubo cónico transparente e um flutuador que tem um deslocamento na vertical proporcional à pressão exercida pelo fluxo do líquido e, portanto, ao caudal.

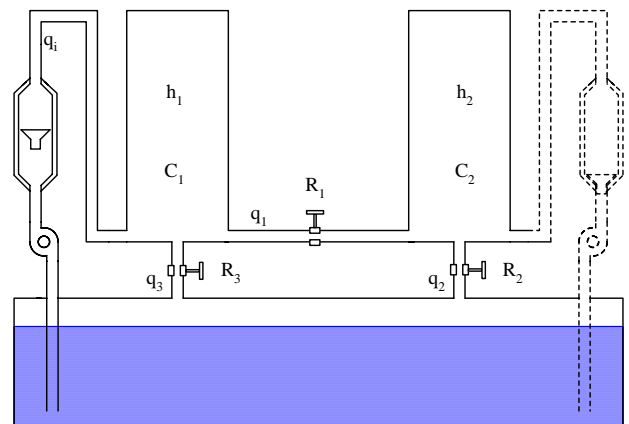


Fig. 5. Diagrama do sistema de tanques

3. Modelação do Sistema

O sistema é constituído por vários elementos: tanque 1 e tanque 2, sensores de nível, sensor de caudal, bomba e controlador linear PID.

Para a modelação recorreu-se a ensaios experimentais tendo-se obtido o que se apresenta a seguir.

A. Tanques

Os parâmetros característicos dos tanques são as resistências R associadas às válvulas e as capacitâncias C associadas aos tanques conforme se indica na fig. 5.

A resistência que a válvula A oferece ao caudal q_1 é dada pela relação

$$R_1 = \frac{h_1 - h_2}{q_1} \quad (4)$$

Enquanto que a válvula C oferece ao caudal q_2 uma resistência dada por

$$R_2 = \frac{h_2}{q_2} \quad (5)$$

Para diferentes caudais de entrada na válvula A, com esta na sua posição 5 (toda aberta), a válvula C na posição 3, ganho do controlador PI em $K_p=10$ e $K_i=0.1$, através do ensaio em cadeia fechada mediram-se h_1 , h_2 e q_1 . Com estes valores traçou-se a curva $\Delta h = h_1 - h_2 = f(q_1)$ da qual se obteve a relação

$$\Delta h = 0.09q_1 - 1.04 \quad (6)$$

Comparando as expressões (4) e (6) obtém-se para a resistência R_1 o valor 0.09 s.cm^{-2} .

Tal como referido para a válvula A, mediram-se também h_2 e q_2 . Com estes valores traçou-se a curva $h_2=f(q_2)$ da qual se obteve a relação

$$h_2 = 1.450q_2 - 30 \quad (7)$$

Comparando as expressões (5) e (7) obtém-se para a resistência R_2 o valor 1.45 s.cm^{-2} .

As capacitâncias C_1 e C_2 correspondem às áreas das secções rectas dos tanques 1 e 2, ao nível das cargas hidrostáticas h_1 e h_2 , respectivamente. Como os tanques são iguais e essa secção é a área de um trapézio de valor igual para qualquer carga hidrostática, obteve-se por medição o valor 102.2 cm^2 para as capacitâncias C_1 e C_2 .

A função de transferência que relaciona a carga hidrostática H_2 com o caudal Q_i tem a seguinte expressão

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_2}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) s + 1} \quad (8)$$

Substituindo as resistências e as capacitâncias hidráulicas pelos seus valores numéricos tem-se a seguinte função de transferência para os tanques

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{1.45}{(4.52s + 1)(301.5s + 1)} \quad (9)$$

B. Bomba

A bomba possui no seu modelo as constantes do motor (k_m), do binário (k_t) e do caudal (k_q) que origina para a função de transferência da bomba a expressão (10).

$$K_B = K_m \cdot K_t \cdot K_q \quad (10)$$

ou

$$q = K_B \cdot v \quad (11)$$

Para diferentes tensões de entrada obteve-se

$$q = 8.061v - 11.761 \text{ cm}^3/\text{s} \quad (12)$$

Comparando as expressões (11) e (12) obtém-se $K_B = 8.061 \text{ cm}^3/\text{s.V}$. Deste modo a função de transferência da bomba é

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = 8.061 \quad (13)$$

C. Sensores de nível

Os sensores de nível fornecem uma diferença de potencial proporcional ao nível a medir. Para 10V de tensão à saída do sensor e 25 cm para o nível no tanque obtém-se um $k_n = 0.4 \text{ V/cm}$.

A função de transferência para os sensores de nível é

$$\frac{V(s)}{H(s)} = 0.4 \quad (14)$$

D. Sensores de caudal

Para diferentes caudais de entrada tem-se: $k_c=0.156 \text{ V/s.cm}^{-3}$

A função de transferência do sensor de caudal é

$$\frac{V(s)}{Q(s)} = 0.156 \quad (15)$$

E. Controlador analógico PID

O controlador PID possui potenciômetros de ajuste de ganho de 0 a 10, um selector de 3 posições discretas de ganho e 3 interruptores para seleccionar os modos de controlo P, I e D.

Seleccionando o modo de controlo PI a função de transferência do controlador é

$$\frac{V(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_i \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{s} \quad (16)$$

sendo $\tau_1 = \frac{K_p}{K_i}$ vem

$$\frac{V(s)}{E(s)} = \frac{K_i (\tau_1 s + 1)}{s} \quad (17)$$

Com as funções de transferência de (9), (13), (14) e (17) obtém-se o diagrama de blocos da fig. 6

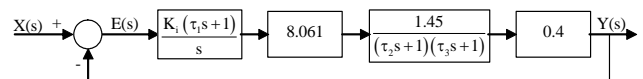


Fig. 6. Diagrama de blocos do sistema

F. Dimensionamento do controlador

O valor dos parâmetros K_p e K_i do controlador pode obter-se a partir do critério ITAE. Assim o sistema terá uma resposta óptima se o zero $-1/\tau_1$ do controlador anular o polo $-1/\tau_3$ dos tanques. A função de transferência de cadeia fechada do sistema será nesse caso a seguinte

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{4.676K_i}{s^2 + \frac{s}{\tau_2} + \frac{4.676K_i}{\tau_2}} \quad (18)$$

A função de transferência de um sistema óptimo segundo o critério ITAE é

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 1.41\omega_0s + \omega_0^2} \quad (19)$$

Comparando as expressões (18) e (19) obtém-se os parâmetros do controlador:

$$\begin{cases} K_p = 7.15 \\ K_i = 0.02376 \end{cases} \quad (20)$$

Com os valores de τ_1 , τ_2 , τ_3 , K_p e K_i , o sistema de nível de líquido com 2 tanques pode ser estudado a partir das seguintes funções:

Função de transferência de cadeia fechada

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.0246}{s^2 + 0.221s + 0.0246} \quad (21)$$

Função de transferência de cadeia aberta

$$GH(s) = \frac{0.111}{s(s + 0.221)} \quad (22)$$

Para outras posições das válvulas e outros modos no controlador PID com 1 ou 2 tanques a modelação é semelhante.

4. Método de Ensino

O método de ensino usado para o estudo do sistema descrito consiste em 4 etapas.

A. Elaboração e simulação do modelo do sistema.

Inicialmente é construído o modelo do sistema numa ferramenta de simulação, de acordo com os valores da modelação descrita no capítulo 3. Em seguida é efectuada a simulação do modelo.

Na figura 7 apresenta-se um exemplo de um diagrama com o modelo do sistema em Matlab/Simulink.

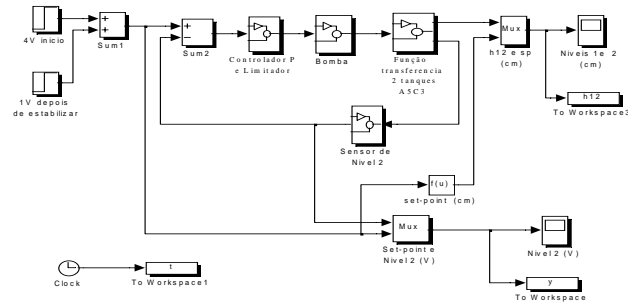


Fig. 7. Diagrama de simulação do sistema

B. Ensaios experimentais.

Os ensaios experimentais são realizados com recurso ao programa CSNIVEL. Os parâmetros do ensaio são introduzidos no quadro apresentado na fig. 3. No decurso da experiência é apresentado um sinóptico do sistema de tanques e um gráfico com os valores em tempo real das grandezas previamente seleccionadas conforme se ilustra na figura 8. Quando é usado o controlador analógico o programa efectua a monitorização do ensaio. Enquanto os ensaios decorrem os valores das grandezas são guardados em ficheiro para posterior análise.



Fig. 8. Programa CSNIVEL no decurso de um ensaio

C. Comparação entre resultados experimentais e de simulação.

A partir dos valores do ensaio guardados num ficheiro, podem ser elaborados os gráficos temporais das grandezas do processo.

Estes gráficos são comparados com os obtidos através da simulação a fim de testar a validade do modelo elaborado. Nas fig. 9 e fig. 10 apresentam-se os gráficos das variações temporais do nível do tanque 2 obtidos por simulação e por ensaio experimental.

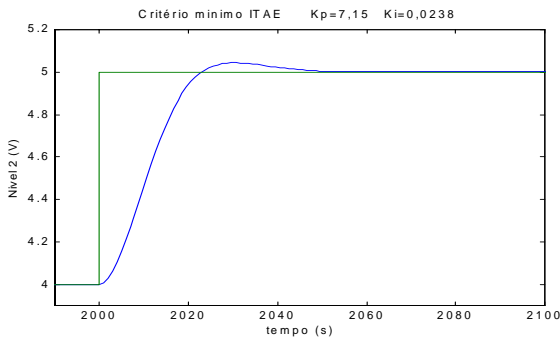


Fig. 9. Resposta de simulação do nível do tanque 2 a uma entrada escalão de posição

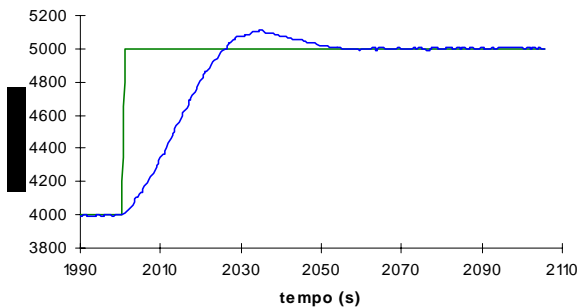


Fig. 10. Resposta experimental do nível do tanque 2 a uma entrada escalão de posição

D. Análise de estabilidade e exactidão.

Para a conclusão do estudo do sistema é efectuada uma análise de estabilidade e de exactidão.

A exactidão é analisada através das representações temporais das respostas (experimentais e simuladas) ou analiticamente através da função de transferência de cadeia aberta e da entrada.

A estabilidade do sistema é analisada através do critério de estabilidade de Nyquist ou do critério do lugar geométrico das raízes. Em ambos pode usar-se uma ferramenta de análise (por ex. Matlab), ou analiticamente através da função de transferência de cadeia aberta. Na fig. 11 apresenta-se um diagrama de Nyquist obtido em Matlab para o exemplo em estudo.

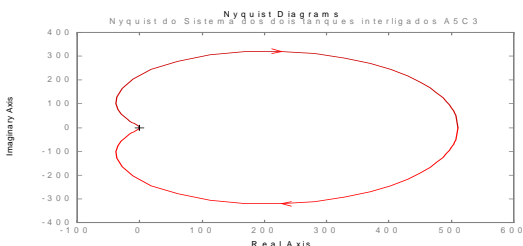


Fig. 11. Diagrama de Nyquist

5. Conclusões

A metodologia descrita neste trabalho é presentemente usada no ensino da disciplina de Controlo de Sistemas. A partir da sua introdução tem-se notado uma maior

motivação e sucesso na aprendizagem da teoria de controlo.

Perspectiva-se a aquisição de uma 2ª bomba para introduzir no sistema de tanques descrito de forma a ser possível a realização de ensaios experimentais de sistemas multivariáveis.

Referências

- [1] Ogata, K., "Modern Control Engineering", Prentice Hall International, 2001.
- [2] Kuo, B.C., "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, 2002.
- [3] Ogata, K., "Designing Linear Control Systems with Matlab", Prentice Hall, 1994.
- [4] Schildt, H., "C/C++ Programmer's reference", McGraw-Hill, 2000.