

MODELAGEM E CONTROLE POR ESCALONAMENTO DE GANHOS DESCENTRALIZADO PARA UM SISTEMA DE TRÊS TANQUES ACOPLADOS

GABRIEL ALISSON COSTA QUEIROZ*, ARLLEM DE OLIVEIRA FARIAS*, RODRIGO FARIAS ARAÚJO†, RENAN LANDAU PAIVA DE MEDEIROS*, IURY VALENTE DE BESSA*

**Universidade Federal do Amazonas
Av. General Rodrigo Octávio, 6200, 69080-900
Manaus, Amazonas, Brasil*

*†Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

Emails: gbralisson@gmail.com, arllemfarias@ufam.edu.br, rodfaraujo@gmail.com, renanlandau@ufam.edu.br, iurybessa@ufam.edu.br

Abstract— This paper presents a strategy of modelling and control of a hybrid system known as a three-tank coupled system. The proposed mathematical description is based on a set of local linear models that is used for the design of a control system with decentralized state feedback gain scheduling. The control system is evaluated in simulations and on a test bench. For the test bench a cascade control strategy is implemented where an internal PID control loop of the servo valves is added. The experimental results showed that the control strategy is able to track references to the output flow of the system.

Keywords— Three-tank system, gain scheduling control, decentralized control, hybrid system.

Resumo— Esse artigo apresenta uma estratégia de modelagem e controle de um sistema híbrido conhecido como sistema de três-tanques acoplados. A descrição matemática proposta é baseada em uma rede de modelos lineares locais que é empregada para o projeto de um sistema de controle com escalonamento de ganhos de realimentação de estados descentralizado. O sistema de controle é avaliado em simulações e numa bancada de testes. Para a bancada de testes é implementada uma estratégia de controle em cascata onde é adicionada uma malha interna de controle PID das servo-válvulas. Os resultados experimentais mostraram que a estratégia de controle é capaz rastrear referências para o fluxo de saída do sistema.

Palavras-chave— Sistema de três tanques, escalonamento de ganhos, controle descentralizado, sistemas híbridos.

1 Introdução

Sistemas híbridos são aqueles cujos comportamentos não podem ser descritos apenas com o uso de variáveis contínuas nem como um sistema a eventos discretos (Lunze and Lamnabhi-Lagarigue, 2009).

Esses sistemas foram alvo de diversos estudos ao longo das últimas décadas, uma vez que apresentam grandes desafios para modelagem e controle de suas dinâmicas. Diversas estruturas matemáticas foram propostas para modelar esses sistemas, como os modelos gerais de sistemas híbridos (GHDS) (Branicky, 1996), grafos de ligação híbridos (Borutzky, 2014), e automatos híbridos (HA) (Henzinger, 2000).

O controle dinâmico de sistemas híbridos, por sua vez, é geralmente realizado por estratégias a partir de dois paradigmas: os sistemas de controle disparados por eventos, onde as variáveis discretas são tratadas como saltos de estados e a lei de controle é uma função capaz de lidar globalmente com esses sistemas (Lunze and Lamnabhi-Lagarigue, 2009); ou com rede de controladores locais, que lidam de maneira particular com cada região de continuidade dos sistemas híbridos, usando ferramentas como funções de Lyapunov lineares por partes (Branicky, 1998), leis de controles chaveadas (Yuan and Wu, 2015), controle nebuloso (Sun and Er, 2004), e modos deslizantes (Su et al., 2018).

Um estudo de caso muito usual na literatura rela-

tiva a sistemas híbridos é o sistemas de três tanques acoplados, descrito por Heiming and Lunze (1999). Este modelo é usado na literatura para desenvolvimento de estratégias de controle (Mahmoodabadi et al., 2017), modelagem (Sathishkumar et al., 2018), identificação (Schrodt and Kroll, 2017), diagnóstico de falhas (Chatterjee et al., 2017), e controle tolerante a falhas (Maalej et al., 2017). Neste sistema, as dinâmicas contínuas dos níveis e fluxos podem dar saltos durante a operação de uma das 7 válvulas ON/OFF do sistema, ou quando os estados assumem determinados valores.

Para lidar com a complexa dinâmica deste sistema, muitas das soluções na literatura optam por trabalhar em torno apenas de alguns pontos de operação, que perdem a validade diante de saltos discretos típicos de sistemas híbridos (He et al., 2017; Sarailoo et al., 2015; Sarailoo et al., 2013). Este artigo propõe um modelo matemático para o sistema de três tanques baseado em rede de modelos lineares locais, e desenvolve uma estratégia de controle em cascata descentralizada composta por um controlador baseado em escalonamento de ganhos e um controlador PID, responsáveis por controlar os níveis e fluxos, respectivamente. A estratégia de controle é avaliada por simulações e experimentos em uma bancada de testes.

O restante desse artigo é organizado como segue: a Seção 2 desenvolve a rede de modelos locais que descreve matematicamente o sistema de três tanques,

a Seção 3 descreve a estratégia de controle utilizada, a Seção 4 relata a avaliação experimental do sistema proposto e, finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 Representação do sistema de três tanques acoplados por modelos lineares locais

O sistema tratado neste artigo consiste de três tanques idênticos, conforme mostrado na Fig. 1, cujos tanques localizados nas extremidades recebem os fluxos de entrada do fluido (Q_1 e Q_2) fornecidos por bombas. Os tanques são conectados por meio de tubos, divididos entre tubos de conexão e transmissão, que possuem válvulas manuais ($K_{13}, K_{23}, K_{v1}, K_{v2}, K_1, K_2$) cujos comportamentos podem assumir a posição completamente fechada ou aberta. Cada tanque tem seu nível de fluido medido por meio de um sensor de nível localizado na parte superior dos mesmos. Os dois atuadores que irão atuar no sistema são servo-válvulas localizadas nos tanques 1 e 2, as quais são responsáveis por regular o fluxo de fluido de entrada para o sistema e consequentemente os níveis dos tanques.

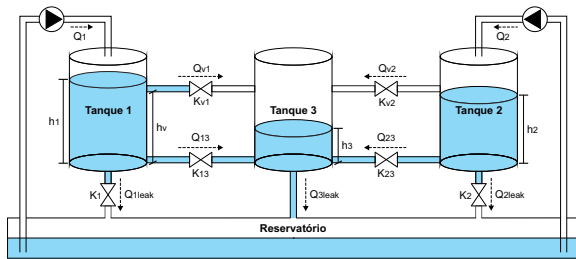


Figura 1: Representação dos três tanques.

A Tabela 1 apresenta a lista das variáveis utilizadas nas equações de modelagem do sistema.

2.1 Modelagem do sistema

As equações dinâmicas do sistema de três tanques da Fig. 1 são descritas abaixo:

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= \frac{1}{S}(Q_1 - Q_{13} - Q_{1leak} - Q_{v1}) \\ \dot{h}_2 &= \frac{1}{S}(Q_2 - Q_{23} - Q_{2leak} - Q_{v2}) \\ \dot{h}_3 &= \frac{1}{S}(Q_{13} + Q_{23} + Q_{v1} + Q_{v2} - Q_{3leak}) \end{aligned} \quad (1)$$

O sistema apresenta dois tipos de tubos interligando os tanques: tubos de conexão que se localizam na parte inferior dos tanques, pelo os quais passam os fluxos Q_{i3} (para $i = 1, 2$); tubos de transmissão que se localizam a uma altura h_v do fundo do tanque, e pelos quais passam os fluxos Q_{vi} .

Os fluxos dos tubos de conexão e transmissão podem ser calculados através da lei de Torricelli, que expressa a relação entre a velocidade do fluxo no tubo de transmissão e o nível de fluido no tanque. Assim, o i -ésimo fluxo no tubo de conexão é dado por:

Tabela 1: Lista de variáveis do modelo dos três tanques.

Símbolo	Significado
h_i	Nível do fluido no i -ésimo tanque
h_v	Altura dos tubos de transmissão
h_{max}	Altura máxima dos tanques
Q_i	Fluxo de entrada pelo i -ésimo tanque
Q_{i3}	Fluxo no tubo de conexão entre o i -ésimo e o terceiro tanque
Q_{vi}	Fluxo no tubo de transmissão entre o i -ésimo e o terceiro tanque
Q_{ileak}	Fluxo no tubo de saída do i -ésimo tanque
K_{i3}	Estado da válvula no tubo de conexão entre o i -ésimo e o terceiro tanque, onde $K_{i3} = 0$ indica válvula totalmente fechada e $K_{i3} = 1$ indica válvula totalmente aberta
K_{vi}	Estado da válvula no tubo de transmissão entre o i -ésimo e o terceiro tanque, onde $K_{vi} = 0$ indica válvula totalmente fechada e $K_{vi} = 1$ indica válvula totalmente aberta
K_i	Estado da válvula no tubo de saída do i -ésimo tanque, onde $K_i = 0$ indica válvula totalmente fechada e $K_i = 1$ indica válvula totalmente aberta
μ	Constante de fluxo dos tubos
A	Área da secção transversal dos tubos
g	Aceleração da gravidade
S	Área da secção transversal dos tanques

$$Q_{i3} = K_{i3} \cdot \mu \cdot A \cdot \text{sgn}(h_i - h_3) \cdot \sqrt{2g(h_i - h_3)}, \quad (2)$$

onde a função $\text{sgn}(\cdot)$ é definida por:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

De maneira similar, o fluxo nos tubos de transmissão, para $i = 1, 2$, é dado por:

$$Q_{vi} = K_{vi} \cdot \mu \cdot A \cdot \text{sgn}(\max(h_v, h_i) - \max(h_v, h_3)) \cdot \sqrt{2g(\max(h_v, h_i) - \max(h_v, h_3))}, \quad (3)$$

onde a função $\max(x, y)$ é definida como segue:

$$\max(x, y) = \begin{cases} x, & \text{se } x \geq y \\ y, & \text{se } x < y \end{cases}$$

Além dos fluxos de conexão e transmissão, também existem fluxos de saída na parte inferior de cada tanque, o fluxo de saída Q_{ileak} do i -ésimo tanque é dado por:

$$Q_{ileak} = K_i \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh_i}, \quad (4)$$

onde necessariamente $K_3 = 1$, uma vez que não existe válvula na saída do tanque 3.

2.2 Modelos locais não lineares

O modelo descrito pelas Equações (1)-(4) apresenta, além de não-linearidades, diversas descontinuidades devido à presença das funções modulares, $\max(\cdot)$ e $\text{sgn}(\cdot)$. Para que se obtenha uma representação do sistema de três tanques por meio de modelos lineares locais, primeiramente é necessário encontrar um conjunto de modelos não lineares locais contínuos. Cada modelo não linear é definido sobre uma região onde é possível construir modelos contínuos, eliminando descontinuidades expressas pelos operadores

$\max(\cdot)$ e $\text{sgn}(\cdot)$. Um conjunto de regiões contínuas são definidas na Eq. (5) pelas comparações dos níveis h_1 , h_2 , e h_3 com o a altura h_v e as comparações dos níveis h_1 e h_2 com o nível h_3 .

A partir das comparações entre os níveis do fluido nos tanques e a altura h_v são definidas oito regiões para os fluxos de transmissão, as quais são descritas abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{R}_1 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_v) \wedge (h_2 < h_v) \wedge (h_3 < h_v)\} \\ \mathfrak{R}_2 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_v) \wedge (h_2 < h_v) \wedge (h_3 \geq h_v)\} \\ \mathfrak{R}_3 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_v) \wedge (h_2 \geq h_v) \wedge (h_3 < h_v)\} \\ \mathfrak{R}_4 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_v) \wedge (h_2 \geq h_v) \wedge (h_3 \geq h_v)\} \\ \mathfrak{R}_5 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_v) \wedge (h_2 < h_v) \wedge (h_3 < h_v)\} \\ \mathfrak{R}_6 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_v) \wedge (h_2 < h_v) \wedge (h_3 \geq h_v)\} \\ \mathfrak{R}_7 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_v) \wedge (h_2 \geq h_v) \wedge (h_3 < h_v)\} \\ \mathfrak{R}_8 = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_v) \wedge (h_2 \geq h_v) \wedge (h_3 \geq h_v)\} \end{array} \right. \quad (5)$$

Para cada uma das regiões descritas acima, os fluxos de transmissão são descritos por modelos contínuos diferentes derivados da Eq. (3), tal que o fluxo de transmissão entre o i -ésimo e o terceiro tanque para a j -ésima região é definido como segue,

$$(h_1, h_2, h_3) \in \mathfrak{R}_j \Rightarrow Q_{vi} = Q_{vi}^j, \quad j = 1, 2, \dots, 8. \quad (6)$$

De forma similar, os fluxos de conexão apresentam quatro regiões de continuidade determinadas pelas comparações entre os níveis dos tanques 1 e 2 com o nível do tanque 3. As quatro regiões determinadas por essas comparações são descritas abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{R}_A = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_3) \wedge (h_2 < h_3)\} \\ \mathfrak{R}_B = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 < h_3) \wedge (h_2 \geq h_3)\} \\ \mathfrak{R}_C = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_3) \wedge (h_2 < h_3)\} \\ \mathfrak{R}_D = \{(h_1, h_2, h_3) | (h_1 \geq h_3) \wedge (h_2 \geq h_3)\} \end{array} \right. \quad (7)$$

Assim, os fluxos de conexão podem ser descritos por modelos não-lineares contínuos derivados da Eq. (2) dentro de cada uma das quatro regiões descritas acima, conforme descrito pela Eq. (8).

$$(h_1, h_2, h_3) \in \mathfrak{R}_k \Rightarrow Q_{i3} = Q_{i3}^k, \quad k = A, B, C, D \quad (8)$$

Portanto, pode-se definir 32 modelos locais contínuos não-lineares combinando o fluxos de transmissão e conexão em cada interseção entre as regiões $\mathfrak{R}_j$ ($j = 1, \dots, 8$) e $\mathfrak{R}_k$ ($k = A, \dots, D$). O modelo da região determinada pela interseção de $\mathfrak{R}_j$ com $\mathfrak{R}_k$ é denominado $\mathfrak{M}_{j,k}, \forall (h_1, h_2, h_3) \in \mathfrak{R}_j \cap \mathfrak{R}_k$ e descrito como segue.

$$\mathfrak{M}_{j,k} : \left\{ \begin{array}{l} \dot{h}_1 = \frac{1}{S}(Q_1 - Q_{13} - Q_{1\text{leak}} - Q_{v1}) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{S}(Q_2 - Q_{23} - Q_{2\text{leak}} - Q_{v2}) \\ \dot{h}_3 = \frac{1}{S}(Q_{13} + Q_{23} + Q_{v1} + Q_{v2} - Q_{3\text{leak}}) \\ Q_{13} = Q_{13}^k \\ Q_{23} = Q_{23}^k \\ Q_{v1} = Q_{v1}^j \\ Q_{v2} = Q_{v2}^j \\ Q_{1\text{leak}} = K_i \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh_1} \\ Q_{2\text{leak}} = K_i \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh_2} \\ Q_{3\text{leak}} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh_3} \end{array} \right. \quad (9)$$

2.3 Linearização do modelo

A fim de obter modelos lineares locais, cada modelo $\mathfrak{M}_{j,k}$ deve ser linearizado em torno de pontos de operações apropriados para a região $\mathfrak{R}_j \cap \mathfrak{R}_k$. Para isso, utiliza-se a teoria da perturbação aos modelos definidos na Eq. (9).

Define-se o ponto de operação da região $\mathfrak{R}_j \cap \mathfrak{R}_k$ pela tupla $(h_{1o}, h_{2o}, h_{3o}, Q_{1o}, Q_{2o})$. Aplica-se a Eq. (9) pequenas perturbações em torno do ponto de operação, tal que:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_1 = h_{1o} + \delta h_{1o} \\ h_2 = h_{2o} + \delta h_{2o} \\ h_3 = h_{3o} + \delta h_{3o} \\ Q_1 = Q_{1o} + \delta Q_{1o} \\ Q_2 = Q_{2o} + \delta Q_{2o} \end{array} \right. \quad (10)$$

Aplicando-se as perturbações descritas acima à Eq. (9), e realizando-se a expansão em série de Taylor, eliminando-se termos de alta ordem, obtêm-se modelos locais lineares, $\tilde{\mathfrak{M}}_{j,k}$, em torno dos pontos de operação $(h_{1j,k,o}, h_{2j,k,o}, h_{3j,k,o}, Q_{1j,k,o}, Q_{2j,k,o})$.

Em particular, são adotados um conjunto de alturas de operação para cada região determinada pelos fluxos de transmissão, isto é, $\mathfrak{R}_j$ para $j = 1, \dots, 8$. Essas alturas de operação são definidas, para $k = A, B, C, D$, conforme o mostrado a seguir.

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{11,k,o} = h_{12,k,o} = h_{13,k,o} = h_{14,k,o} = \frac{h_v}{2} \\ h_{15,k,o} = h_{16,k,o} = h_{17,k,o} = h_{18,k,o} = \frac{h_v + h_{\text{max}}}{2} \\ h_{21,k,o} = h_{22,k,o} = h_{23,k,o} = h_{24,k,o} = \frac{h_v}{2} \\ h_{25,k,o} = h_{26,k,o} = h_{27,k,o} = h_{28,k,o} = \frac{h_v + h_{\text{max}}}{2} \\ h_{31,k,o} = h_{33,k,o} = h_{35,k,o} = h_{37,k,o} = \frac{h_v}{2} \\ h_{32,k,o} = h_{34,k,o} = h_{36,k,o} = h_{38,k,o} = \frac{h_v + h_{\text{max}}}{2} \end{array} \right. \quad (11)$$

Os fluxos de entrada nos pontos de alteração são os valores necessários para manter o sistema em equilíbrio em cada ponto, isto é, $\dot{h}_1 = \dot{h}_2 = \dot{h}_3 = 0$. Finalmente, os modelos locais lineares são descritos no espaço de estados como se segue:

$$\tilde{\mathfrak{M}}_{j,k} : \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = A_{j,k}x + B_{j,k}u \\ y = C_{j,k}x \end{array} \right. \quad (12)$$

onde os vetores de estados, entradas, e saída são, respectivamente, $x = [\delta h_1 \ \delta h_2 \ \delta h_3]^T$, $u = [\delta Q_1 \ \delta Q_2]^T$ e $y = \delta Q_{3\text{leak}}$.

3 Controle descentralizado não-linear por escalonamento de ganhos

O modelo dos três tanques acoplados é um sistema multivariável onde se assume a existência de diversos sensores de fluxo e de nível capazes de indicar cada fluxo de conexão, transmissão ou de entrada, ou ainda o nível de cada tanque. Essa realidade é similar a diversos problemas de controle de processos industriais, nos quais técnicas de controle descentralizado e em cascata são usualmente empregadas. Estratégias de controle descentralizado, consistem em transformar o problema de controle multivariável em diversos problemas de controle SISO, enquanto técnicas de

controle em cascata empregam diferentes malhas de controle, e são particularmente interessantes em sistemas de dinâmicas lentas onde diversas variáveis de processo são mensuráveis para realimentação. Neste trabalho, será proposta uma estratégia de controle em cascata descentralizado, onde a malha externa é um controlador com escalonamento de ganhos de realimentação de estados.

Os múltiplos modelos locais para o sistema de três tanques acoplados resultantes apresentam, portanto, duas entradas e uma única saída. Além disso, as variáveis de controle são os fluxos de entrada nos tanques 1 e 2, que na bancada de teste empregada nos experimentos desse trabalho, é controlado por meio de servo-válvulas que também devem ser controladas. Nesse contexto, o sistema de controle proposto apresenta uma estratégia de controle descentralizado em cascata.

Os fluxos em cada servo-válvula são controlados por meio de controladores PID, que obedecem às referências geradas por malhas de controle independentes para cada bomba, operando, portanto, em uma arquitetura mestre-escravo. A arquitetura do sistema de controle é mostrada na Fig. 3.

A Fig. 3 mostra que a informação dos três sensores de nível (LI1, LI2 e LI3) são usadas por controladores independentes de nível (LIC1 e LIC2) que controlam o nível, e consequentemente o fluxo de saída no tanque 3. Esses controladores realizam escalonamentos de ganhos de realimentação de estados, produzindo sinais de controle que são usados como referências pelas servo-válvulas 1 e 2 respectivamente. As servo-válvulas utilizam controladores de fluxos (escravos) que devem fazer com que os fluxos de entrada, que são medidos por sensores localizados nos tubos de entrada (FT's), rastreiem as referências geradas pelos controladores de nível (mestres). Os controladores de fluxo (FIC's) são controladores PID sintonizados para que tenham a dinâmica muito mais rápida do que a dinâmica do controle de nível. O diagrama em blocos do sistema de controle proposto é mostrado na Fig. 2.

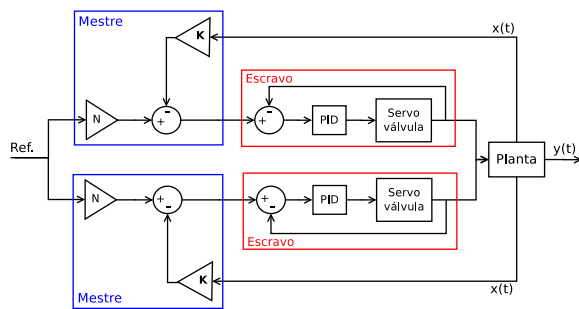


Figura 2: Diagrama em blocos do sistema de controle descentralizado em cascata.

Em particular, para efeitos de aplicação da estratégia descentralizada proposta, os termos $B_{j,k}u$ da Eq. (12) devem ser decompostos na soma dos efeitos de cada entrada:

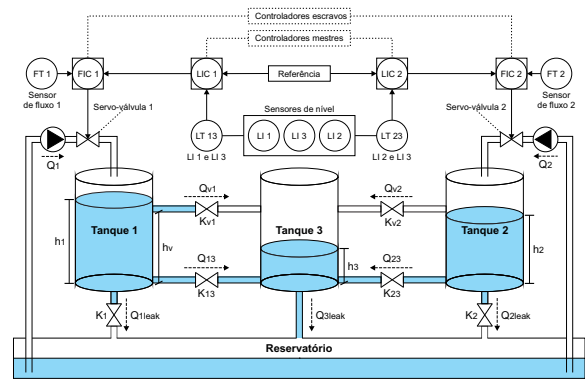


Figura 3: Arquitetura do sistema de controle.

$$B_{j,k}u = B_{1,j,k}u_1 + B_{2,j,k}u_2.$$

onde u_1 e u_2 são as entradas nos tanques 1 e 2 respectivamente, e $B_{1,j,k}$ e $B_{2,j,k}$ são as colunas da matriz $B_{j,k}$ referentes à bomba 1 e 2 respectivamente, ou seja, $B_{j,k} = [B_{1,j,k} \ B_{2,j,k}]$.

3.1 Síntese dos controladores de níveis para modelos lineares locais

A estratégia de controle com escalonamento de ganhos consiste em projetar controladores locais $\mathcal{C}_{j,k}$ para cada um dos modelos $\mathcal{M}_{j,k}$. Os controladores $\mathcal{C}_{j,k}$ tem suas leis de controle descritas como segue.

$$\mathcal{C}_{j,k} : \begin{cases} u_1 = N_{1,j,k}r - K_{1,j,k}x \\ u_2 = N_{2,j,k}r - K_{2,j,k}x \end{cases} \quad (13)$$

Em caso de perfeita simetria do sistema de três tanques, $B_{1,j,k} = B_{2,j,k}$, $N_{j,k} = N_{1,j,k} = N_{2,j,k}$ e $K_{j,k} = K_{1,j,k} = K_{2,j,k}$. Como a aplicação deste trabalho é para um sistema onde se presume simetria dos parâmetros, usar-se-á, por simplicidade, apenas $B_{j,k}$, $N_{j,k}$ e $K_{j,k}$.

Deseja-se sintonizar os ganhos $K_{j,k}$ de maneira que o sistema linear em malha fechada seja estável e tenha dinâmica determinada por polos em λ_1 , λ_2 , e λ_3 distintos dos autovalores de $A_{j,k}$. Dessa forma, $K_{j,k}$ é dado por:

$$K_{j,k} = \bar{K}T^{-1}, \quad (14)$$

onde para qualquer $\bar{K}$, T é uma matriz simétrica e definida positiva que é solução da equação de Sylvester:

$$A_{j,k}T + TF = B_{j,k}\bar{K}, \quad (15)$$

tal que a matriz F apresenta os autovalores λ_1 , λ_2 , e λ_3 .

O ganho $N_{j,k}$ é calculado para que o erro em regime permanente seja nulo, ou seja, $\dot{x} = 0 \rightarrow y = r$. Para isso, $N_{j,k}$ deve ser:

$$N_{j,k} = -[C_{j,k}(A_{j,k} - B_{j,k}K_{j,k})^{-1}B_{j,k}]^{-1}. \quad (16)$$

3.2 Sintonia dos controladores de fluxo PID pelo método de Ziegler-Nichols

Devido à dificuldade na obtenção de modelos matemáticos para o fluxo nas servo-válvulas, optou-se por utilizar a técnica de sintonia empírica de Ziegler-Nichols. Em particular, foi utilizado o método da curva de reação, no qual, observa-se a resposta ao degrau do sistema em malha aberta a ser controlado (servo-válvula) e sintonizam-se os ganhos a partir do tempo de atraso (L) e a constante de tempo (T) da resposta ao degrau. A saída do controlador PID do tanque i , isso é, o sinal de controle do ângulo da servo-válvula u_{PID_i} , é dado pela Eq.(17) abaixo.

$$u_{PID_i} = K_p \left[e_i + \frac{1}{T_i} \int_0^t e d\tau + T_d \frac{d}{dt} e_i \right] \quad (17)$$

$$e_i = u_i - Q_{im}$$

onde Q_{im} é a medida do sensor de fluxo de entrada do tanque i , e os ganhos são sintonizados de acordo com o método de Ziegler-Nichols, ou seja, $K_p = 1,2 \frac{T}{L}$, $T_i = 2L$ e $T_d = 0,5L$.

Os valores de T e L foram obtidos experimentalmente a partir da injeção de um sinal de ângulo da servo-válvula em degrau. A resposta ao degrau obtida nesse experimento está ilustrada na Fig. 4, de onde foram extraídos os valores de $T = 2,21$ e $L = 0,8$.

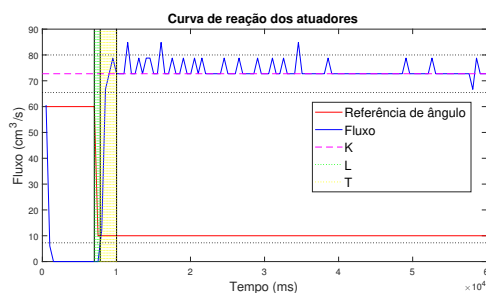


Figura 4: Resposta do sistema experimentado da servo-válvula.

Se as dinâmicas das respostas das malhas de controle das servoválvulas forem muito mais rápidas do que a dinâmica da malha de controle de fluxo de saída no tanque 3 e o erro em regime permanente for nulo, o comportamento delas pode ser aproximado do ideal, onde para efeitos práticos $u_i \approx Q_{im} \approx Q_i$, para $i = 1, 2$. Devido às limitações da servo-válvula a região dinâmica será limitada entre 0 e 70 cm³/s. O comportamento do fluxo nessas válvulas apresenta severas não-linearidades nas extremidades, que justificam a saturação do sinal de controle dentro da região escolhida. Os sinais de controle da malha externa (referência das malhas das servo-válvulas) serão saturados caso estejam fora dessa região.

4 Avaliação Experimental

4.1 Descrição e Objetivos dos experimentos

Com o objetivo de validar a estratégia de controle proposta foram realizadas simulações baseadas no ambiente MATLAB/Simulink e experimentos na bancada de testes do sistema de três tanques. Para todos os experimentos realizados neste trabalho foi adotado o cenário em que todas as válvulas dos tubos de transmissão e conexão estão acionadas, isto é, abertas ($K_{13} = K_{23} = K_{v1} = K_{v2} = 1$) e as válvulas dos tubos de saída dos tanques 1 e 2 são normalmente fechadas ($K_{1leak} = K_{2leak} = 0$). Qualquer alteração nesses valores das válvulas deverão ser tratados como perturbações ou falhas no sistema. Dois experimentos são realizados nesse trabalho, os quais são descritos abaixo.

Experimento 1: Simulações com mudanças de referências Esse experimento tem como objetivo observar o comportamento em simulações do sistema de controle proposto diante a mudanças de referência em degrau e considerando o comportamento das servo-válvulas ideal, isso é, $u_i \approx Q_{im} \approx Q_i$, para $i = 1, 2$.

Experimento 2: Testes na bancada do sistema de três tanques Esse experimento visa validar em testes práticos a estratégia de controle proposta utilizando a bancada de experimentos dos três tanques. Em particular, são investigados o desempenho das malhas de controle das servo-válvulas, a fim de verificar se as aproximações sobre seu comportamento ideal são válidas, e o desempenho do controlador de fluxo de saída.

4.2 Resultados

4.2.1 Resultados do experimento 1

A Fig. 5 mostra as respostas do sistema de controle proposto em simulações, onde as servo-válvulas são consideradas ideais.

Em particular, a Fig. 5 mostra o comportamento do sistema em malha fechada para mudanças de referência para a saída (Q_3) em degrau, na qual é possível perceber que o sistema de controle proposto foi capaz de rastrear as referências em simulação. Note ainda que os sinais de controle estão sempre dentro da região dinâmica determinada, o que mostra que não ocorreria nenhuma saturação em uma eventual aplicação dos mesmos à malha da servo-válvula.

4.2.2 Resultados do experimento 2

O experimento 2 verifica o funcionamento do sistema de controle proposto na bancada de teste do sistema de três tanques mostrada na Fig. 6.

Primeiramente, foram feitos testes apenas na malha interna de controle das servo-válvulas, a fim de verificar se as mesmas seriam capazes de rastrear às

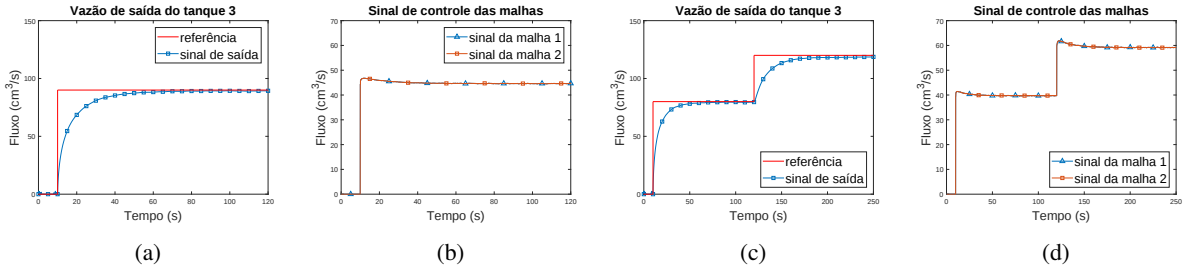


Figura 5: Respostas do sistema de controle proposto a mudanças de referências: (a) resposta do fluxo de saída Q_3 à mudança de referência em degrau; (b) sinais de controle em cada malha (u_1 e u_2) para referências da Fig. 5a; (c) resposta do fluxo Q_3 às mudanças consecutivas de referência; (d) sinais de controle em cada malha (u_1 e u_2) para referências da Fig. 5c.



Figura 6: Bancada de teste dos três tanques acoplados.

referências geradas pelo controlador mestre por escalonamento de ganhos. As Figs. 7 e 8 mostram o fluxo de saída das servo-válvulas para mudanças de referências em degrau. As figuras mostram que a malha interna de controle é capaz de rastrear as referências, no entanto, oscilações e erros em regime permanente residuais não são compensadas pelo controlador. Além disso, o sinal de controle de uma das válvulas sofre uma pequena saturação por volta dos 50 s no experimento da Fig. 8, quando a mesma é submetida a sucessivas mudanças de referências. Tais fenômenos, ocorrem devido a queda de pressão apresentada na linha de admissão de fluido quando as servo-válvulas abrem para aumento de fluxo, o que sugere que a bomba já está operando no limite da vazão suportada. A inserção de um controlador de pressão na descarga da bomba poderia evitar esses problemas.

Além disso, o comportamento dinâmico do fluxo nas servo-válvulas varia frequentemente, apresentando incertezas, além de apresentar comportamento bem diferente nas extremidades das excursões angulares da servo-válvulas, tais situações também estão ligadas a queda de pressão que ocorre na linha de admissão de fluido, além da natureza dos medidores de fluxos.

A Fig. 9 mostra o comportamento da saída do sistema (fluxo Q_3) para referências em degrau. A saída apresenta forte oscilação e um pequeno erro em regime permanente no experimento prático. O desempenho da malha de controle externa é fortemente dependente do desempenho da malha interna que apresentou algumas dificuldades em regular o fluxo de entrada, devido as questões anteriormente apresentadas.

Portanto, o resultado era esperado ainda que o controlador descentralizado por escalonamento de ganhos tenha apresentado bom desempenho nas simulações.

5 Conclusões

Este artigo apresentou a modelagem de um sistema de três tanques acoplados por redes de modelos múltiplos lineares e uma estratégia de controle em cascata descentralizado, composto por controlador não-linear por escalonamento de ganhos (mestre) e controle PID (escravo) para esse sistema. A estratégia de controle proposta, reduz a dificuldade de projeto de controladores a um problema de alocação de pólos por realimentação para sistemas SISO, evitando o uso de técnicas não-lineares mais complexas ou multivariáveis.

O modelo e a estratégia de controle foram validados experimentalmente por simulações e por meio de uma bancada de teste de três tanques real. Os resultados indicaram que o modelo proposto é capaz de representar adequadamente a dinâmica do sistema de três tanques para uma ampla região de operação. Além disso, o sistema de controle proposto é capaz de regular o fluxo de saída do tanque nas simulações e no sistema real, mesmo diante de perturbações, como vazamentos em algum dos tanques.

Nas simulações, o sistema de controle descentralizado por escalonamento de ganhos foi capaz de regular a saída sem erros de regime permanente. Em particular, os resultados dos testes na bancada de experimento mostram alguma dificuldade do sistema de controle em alcançar os objetivos, uma vez que a malha interior de controle da servo-válvula apresenta regulação deficiente, devido à problemas discutidos na Seção 4.2.

Trabalhos futuros devem propor soluções para os problemas apresentados na bancada de teste e incluir o projeto de controle o desenvolvimento de técnicas de controle tolerante à falhas ativas baseadas na rede de múltiplos modelos locais obtida nesse trabalho.

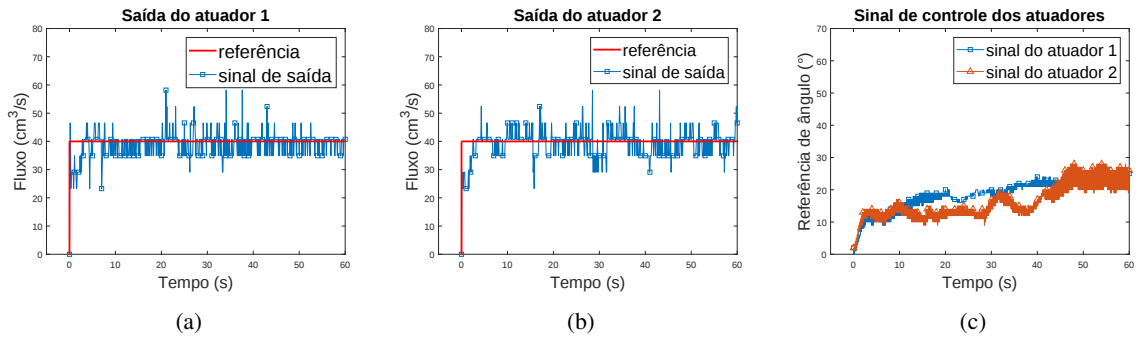


Figura 7: Teste da malha interna de controle PID para servo-válvulas com degrau de referência: (a) resposta ao degrau da servo-válvula 1; (b) resposta ao degrau da servo-válvula 2; (c) sinais de controle da válvulas 1 e 2 nos experimentos de resposta ao degrau.

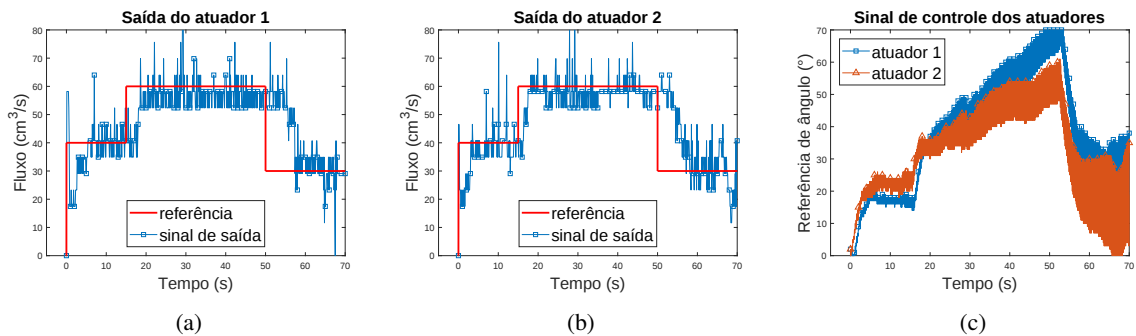


Figura 8: Teste da malha interna de controle PID para servo-válvulas com mudanças consecutivas de referências: (a) resposta da servo-válvula 1; (b) resposta da servo-válvula 2; (c) sinais de controle da válvulas 1 e 2.

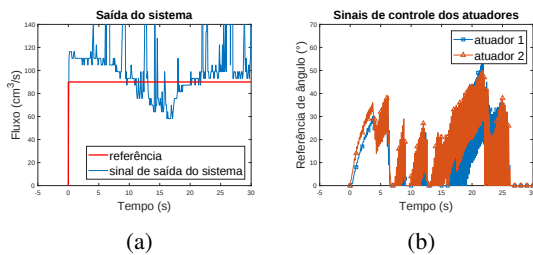


Figura 9: Resposta ao degrau da malha externa de controle do fluxo de saída por escalonamento de ganhos: (a) resposta do fluxo de saída Q_3 ; (b) sinais de controle das válvula 1 e 2.

Referências

- Borutzky, W. (2014). *Bond Graph Model-based Fault Diagnosis of Hybrid Systems*, EBL-Schweitzer, Springer International Publishing.
- Branicky, M. S. (1996). On a class of general hybrid dynamical systems, *IFAC Proceedings Volumes* **29**(1): 4712 – 4717. 13th World Congress of IFAC.
- Branicky, M. S. (1998). Multiple lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **43**(4): 475–482.
- Chatterjee, S., Sadhu, S. and Ghoshal, T. K. (2017). Improved estimation and fault detection scheme for a class of non-linear hybrid systems using time delayed adaptive cd state estimator, *IET Signal Processing* **11**(7): 771–779.
- He, X., Wang, Z., Liu, Y., Qin, L. and Zhou, D. (2017). Fault-tolerant control for an internet-based three-tank system: Accommodation to sensor bias faults, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **64**(3): 2266–2275.
- Heiming, B. and Lunze, J. (1999). Definition of the three-tank benchmark problem for controller re-configuration, *Control Conference (ECC), 1999 European*, IEEE, pp. 4030–4034.
- Henzinger, T. A. (2000). *The Theory of Hybrid Automata*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 265–292.
- Lunze, J. and Lamnabhi-Lagarrigue, F. (2009). *Handbook of Hybrid Systems Control: Theory, Tools, Applications*, Cambridge University Press.
- Maalej, I., Rekik, C. and Abid, D. (2017). Fault tolerant trajectory tracking control design for interval-type-2 takagi-sugeno fuzzy logic system, *International Journal of Modelling, Identification and Control* **27**(3): 230–242.

- Mahmoodabadi, M., Taherkhorsandi, M. and Talebipour, M. (2017). Adaptive robust pid sliding control of a liquid level system based on multi-objective genetic algorithm optimization, *Control and Cybernetics* **46**(3): 227–246.
- Sarailoo, M., Rahmani, Z. and Rezaie, B. (2013). Modeling of three-tank system with nonlinear valves based on hybrid system approach, *Journal of Control Engineering and Technology* **3**(1): 20–23.
- Sarailoo, M., Rahmani, Z. and Rezaie, B. (2015). A novel model predictive control scheme based on bees algorithm in a class of nonlinear systems: Application to a three tank system, *Neurocomputing* **152**: 294–304.
- Sathishkumar, K., Kirubakaran, V. and Radhakrishnan, T. (2018). Real time modeling and control of three tank hybrid system, *Chemical Product and Process Modeling* **13**(1).
- Schrodt, A. and Kroll, A. (2017). On iterative closed-loop identification using affine takagi–sugeno models and controllers, *International Journal of Fuzzy Systems* **19**(6): 1978–1988.
- Su, X., Liu, X., Shi, P. and Song, Y.-D. (2018). Sliding mode control of hybrid switched systems via an event-triggered mechanism, *Automatica* **90**: 294 – 303.
- Sun, Y. L. and Er, M. J. (2004). Hybrid fuzzy control of robotics systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **12**(6): 755–765.
- Yuan, C. and Wu, F. (2015). Hybrid control for switched linear systems with average dwell time, *IEEE Transactions on Automatic Control* **60**(1): 240–245.