

INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO NÃO-LINEAR DE UM SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM QUATRO TANQUES INTERLIGADOS

MARIANA C. BERNARDES, GUSTAVO A. F. DE MELO, GEOVANY A. BORGES,
ALFREDO A. DE FREITAS E ADOLFO BAUCHSPIESS

LAVSI – Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília

SG 11, Sala A1-25/12, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília – DF, CEP 70910-970

E-mails: maribernardes@gmail.com, gafmelo@yahoo.com, gaborges@unb.br,

alfredoamerico@freitas.eng.br, adolfobs@ene.unb.br

Abstract— This manuscript presents the development of a liquid-level platform to be used in the study of control strategies for non-linear multivariable processes. Its main advantages are the low-cost of the implementation, easiness of construction when compared to other non-linear MIMO systems and reconfigurability. It is composed of four coupled tanks, one of them with area depending on liquid level. The system can be physically reconfigured for different number of inputs, outputs and system order. Its design follows a modular approach, containing pressure sensors for liquid level measurement, a multifunctional microcontroller-based control board and a DC motor driver board based on low R_{DS} MOSFETs. It can operate autonomously with microcontroller-based control, it can be connected to a microcomputer, an analogic controller or to a programmable logic controller. This paper also includes system modeling and model identification results of the proposed platform.

Keywords—liquid-level system, reconfigurable MIMO process, electronic instrumentation, system identification

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de nível de líquido a ser utilizada no estudo de estratégias de controle para processos multivariáveis não-lineares. Suas principais vantagens são o baixo custo de implementação, facilidade de construção quando comparado aos outros sistemas não lineares MIMO e reconfigurabilidade. Ele é composto de quatro tanques, um deles cuja área depende do nível de líquido. O sistema pode ser reconfigurado fisicamente para diferentes números de entradas, saídas e ordem. Seu design segue uma abordagem modular, contendo sensores de pressão para medição do nível de líquido, uma placa de controle multifuncional microcontrolada e um driver para motor DC baseado em MOSFETs de baixo R_{DS} . Ele pode ser operado de forma autônoma através de controle por microcontrolador, conectado a um microcomputador, um controlador analógico ou controlador lógico programável. Esse artigo também inclui modelagem do sistema e resultados da identificação do modelo da plataforma proposta.

Palavras-chave— sistema de nível de líquido, processo MIMO reconfigurável, instrumentação eletrônica, identificação de sistemas

1 Introdução

Sistemas de Níveis de Líquidos são importantes processos com diversas aplicações, principalmente na indústria química, petroquímica, nuclear e de celulose (GOSMAN, 2002). O conhecimento e controle precisos do nível de um líquido são de suma importância na indústria, haja vista que, para fins de inventário e cálculo de custos, o controle desta grandeza se traduz diretamente em dinheiro, lucro e eficiência. O controle de nível também possui forte interesse teórico, pois trata-se de um sistema não-linear, sendo possível a aplicação de técnicas de controle e identificação mais avançadas do que as tradicionais, utilizadas nos sistemas lineares.

Devido à sua vasta aplicação na vida prática, ao relativo baixo custo de implementação e à facilidade de construção da planta, sistemas de nível de líquidos vêm sendo utilizados no LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes) com fins didáticos resultando em vários artigos e trabalhos publicados. Técnicas de espaço de estados, PID e *Fuzzy* já foram implementadas com sucesso (FILHO, 2002), e o sistema já foi utilizado tanto em experimentos de estimação de parâmetros com filtro

de Kalman estendido (FREITAS, *et al.*, 2004) quanto remotamente para experimentos de controle através da Internet por alunos (FREITAS, 2003), (JABUONSKI, *et al.*, 2003), (GUIMARÃES, *et al.*, 2002) e (BAUCHSPIESS, *et al.*, 2003).

Foi proposto um novo sistema descrito no presente trabalho, que visa a obtenção de um novo sistema de nível de líquidos mais robusto e eficiente.

2 Descrição Física do Novo Sistema

O novo sistema de nível de líquido, mostrado na Figura 1, possui quatro tanques acoplados através de válvulas variáveis sem a utilização de tubulações entre eles, evitando a perda de carga e o atraso de transferência. Outra característica do novo sistema é o sensoriamento, agora feito com de sensores de pressão, que aumentaram a resolução e precisão das medidas. O sensoriamento anteriormente era feito através de potenciômetros ligados a hastes metálicas e bóias.

O sistema consiste de um compartimento maior, subdividido internamente por chapas de acrílico em 4 compartimentos que serão considerados tanques independentes. Três desses tanques possuem

dimensões de 49,5 x 10 x 6cm. O quarto tanque tem forma trapezoidal. Cada chapa de acrílico que separa os compartimentos possui uma ranhura de 2mm, interconectando os tanques. Fechando cada ranhura há uma chapa que desliza em sentido vertical, controlando o tamanho da abertura entre os tanques e funcionando como uma válvula, de forma a controlar a vazão. As chapas deslizantes também tornam possível diversas configurações de sistema com o acréscimo ou retirada de tanques. Assim, têm-se experimentos de diferentes ordens e com a possibilidade de torná-los mais complexos se for feito uso do tanque trapezoidal.

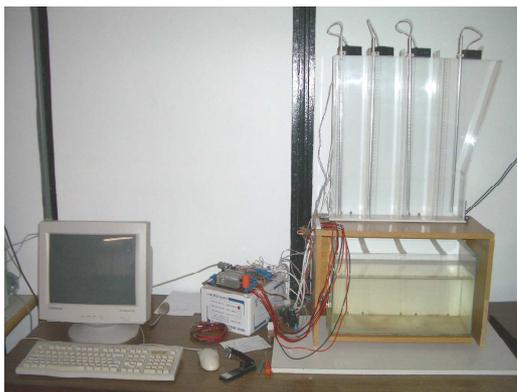


Figura 1 – Novo sistema de nível de líquidos do LAVSI

O novo sistema de nível de líquidos foi concebido em forma modular de maneira que módulos possam ser reaproveitados, evitando desperdício de dispositivos, trabalho e tempo em caso de alguma futura alteração de projeto.

Os módulos de sensores ficam sobre os tanques, de forma que os tubos conectados aos sensores fiquem imersos no líquido para medição do seu nível. Destes módulos saem os sinais de medida através de cabos blindados em direção ao módulo de controle. No módulo de controle ficam conectados os terminais da comunicação serial RS232 para que dados do experimento sejam enviados para o computador. Deste módulo também saem os sinais de controle que são enviados para o módulo de acionamento, responsável por ativar as bombas.

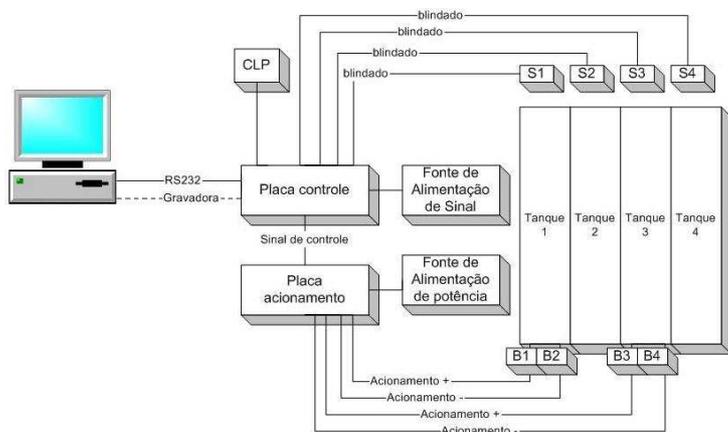


Figura 2 – Esquema modular do sistema de nível de líquido

2.1 Módulos de Sensores

O emprego de sensores capacitivos ou de fibra óptica requer circuitos de condicionamento mais difíceis de ajustar e caros (TOTH, *et al.*, 1997) e (VÁSQUEZ, *et al.*, 2002). Sendo um dos requisitos de projeto o baixo custo, optou-se por um sensor de pressão, com compensação de temperatura integrada, para medição do nível de líquido em cada tanque. Assim, escolheu-se o transdutor MPXM2010GS da Freescale, que consiste em um sensor de pressão piezo-resistivo, com tensão de saída linear em relação à diferença de pressão no tubo do sensor e a pressão atmosférica. Internamente, o sensor está conectado a uma ponte de Wheatstone, que está balanceada quando a pressão no tubo for igual à pressão atmosférica. Para realizar a medição do nível de um líquido, utiliza-se um tubo plástico ligando o bocal do sensor ao fundo do tanque. Nesta configuração, a tensão de saída do sensor varia linearmente com a diferença de pressão, apresentando baixa histerese. Para permitir que a tensão de saída tenha ajustes de ganho e offset independentes entre si, usou-se o amplificador de instrumentação INA126. Os pinos de saída do sensor são conectados às entradas do amplificador, e uma tensão de referência ajustável também ligada ao INA126 proporciona o offset. O ganho é ajustado separadamente via um trimpot multi-voltas. Com esta configuração, uma mudança no ganho não acarreta em descalibração do *offset* e vice-versa. O *offset* foi projetado para proporcionar variação no intervalo [-1V;+1V] na tensão de saída. A faixa de ajuste do ganho permite variação da tensão de saída entre [0,5V;4,5V], cujos limites correspondem aos níveis mínimo e máximo do sistema. Cabos blindados separados da alimentação e capacitores de desacoplamento proporcionam uma medição com baixo nível de ruído.

Os circuitos dos sensores foram montados dentro de pequenas caixas plásticas de forma a se evitar contato dos sensores diretamente com o líquido dos tanques, prevenindo danos nos circuitos em caso de acidente. Cada caixa possui orifícios que permitem o acesso aos bornes, potenciômetros de ajuste de ganho e de *offset* e a saída do tubo plástico conectado ao bocal do sensor. O tubo plástico fica protegido dentro de um cano oco de alumínio que serve para mantê-lo na posição correta para realizar as medições.

2.2 Módulo de Acionamento

As bombas escolhidas para enchimento e esvaziamento dos tanques são moto-bombas DC proporcionais, normalmente utilizadas no reservatório de esguicho de limpadores de pára-brisa de carros, que operam com tensões entre 0 e 12V e cerca de 3,5A na tensão máxima.

O circuito de acionamento das bombas consiste em um MOSFET canal N (IRF 530) protegido por um diodo de acionamento rápido que fecha a alimentação do motor de acordo com o sinal de controle vindo de um PWM. Com isso, obtêm-se vazões variáveis através da modificação da largura de pulso do sinal de

alimentação. Para evitar ruídos e interferências advindas do sinal de PWM na medição dos sensores de pressão, utilizaram-se opto-acopladores de modo a isolar eletricamente a parte de potência (acionamento dos motores) da parte de sinal (saída dos sensores). Foram utilizadas duas fontes de alimentação distintas, sendo uma para o circuito de mais alta potência (módulo de acionamento) e outra para a alimentação dos outros módulos.

2.3 Módulo de Controle

O módulo de controle é responsável pela comunicação com um PC através do padrão RS-232, pela conversão dos sinais analógicos dos sensores e pelo envio do sinal de PWM adequado às bombas.

O sistema proposto foi idealizado para ser flexível, podendo ser independente de um computador para realizar o acionamento dos tanques. Desta forma, foram disponibilizadas saídas analógicas com os sinais dos sensores e entradas analógicas para receber algum comando externo vindo, por exemplo, de um CLP ou de um circuito externo de controle analógico. Um *jumper* permite selecionar se o controle deverá ser feito através dos parâmetros recebidos do computador ou se deverão ser utilizadas as entradas analógicas externas.

O microcontrolador escolhido foi o PIC 18F252 do fabricante Microchip. Para a implementação da opção do controle a partir de sinais analógicos externos foi necessário o aumento do número de canais analógicos, pois o PIC18F252 possui somente cinco canais e quatro destes já são utilizados para a leitura dos sinais dos sensores. Com isto, foi necessária a utilização de um multiplexador analógico. O componente escolhido foi o CD4051, que possui oito entradas analógicas, uma saída e três entradas digitais para a seleção de qual entrada deverá ser colocada na saída.

Para a proteção dos componentes do circuito foi decidido utilizar um circuito que limita a tensão para cada entrada analógica disponibilizada. O sinal de saída é limitado, aproximadamente, entre -0,7 e +5,7 Volts.

Para os sinais dos sensores, além das proteções de limites de tensão na entrada, foram colocados filtros passa-baixas de primeira ordem, para reduzir o ruído que pode ter sido gerado na transmissão do sinal e para servir como *anti-aliasing*, evitando medições incorretas. Para estes filtros foram escolhidas frequências de corte relativamente baixas, de aproximadamente 16Hz. Na saída dos módulos dos sensores há um filtro com frequência de corte de 1,6 KHz. Outra precaução utilizada para evitar ruídos foi a utilização de cabos blindados entre o sensor e o módulo de controle. Os cabos utilizados para a alimentação dos módulos dos sensores foram trançados para evitar a indução de ruído eletromagnético.

Para realizar a comunicação serial com o computador foi utilizado o circuito integrado

MAX232, que é responsável por converter os sinais do padrão RS232, entre +12 e -12 Volts, no padrão TTL, entre +5 e 0 Volts. Foi utilizada uma velocidade de comunicação de 19.200 bit/s.

Para disponibilizar o sinal dos sensores para um circuito externo utilizou-se um *buffer* para cada sensor, sendo as saídas dos *buffers* disponibilizadas em um conector do tipo *borne*.

O cristal utilizado foi de 10MHz, utilizando internamente uma multiplicação por 4 para obter-se 10 MIPS (Milhões de instruções por segundo).

Como o PIC 18F252 possui somente dois módulos de PWM, foi necessário seu compartilhamento. Como há dois pares de motores, sendo um para retirar e outro para colocar água em cada tanque, tem-se que somente uma bomba de cada par irá ficar ligada e desta forma pode-se utilizar o mesmo sinal de PWM para as duas bombas, bastando utilizar uma seleção no programa do PIC que define qual bomba será acionada. A frequência do PWM foi escolhida em 10 KHz. Para a configuração utilizada, o PIC possui uma resolução de 10 *bits*.

Para a configuração em que o PIC é responsável pelo controle do sistema com o uso de um PID, foi implementado um programa no MATLAB que envia inicialmente os seguintes parâmetros para o PIC: K_p , K_i , K_d , o tipo de referência, o valor máximo e mínimo e o período da referência. O controlador foi implementado utilizando a técnica de *anti-windup* que é utilizada para inibir o canal integral quando o atuador se encontra saturado, diminuindo possíveis oscilações na saída devido a um excesso de integração do erro.

Como o sistema possui duas entradas de controle (q_{i1} e q_{i3}), foram implementados dois controladores independentes no PIC que funcionam simultaneamente, um para cada tanque controlável, obtendo-se, desta forma, um sistema MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas).

2.4 Programa do PC

Para realizar a comunicação entre o microcontrolador PIC e o PC, foi desenvolvido, em Matlab, um programa que envia e recebe dados pela saída serial do computador. Assim sendo, antes da realização de qualquer experimento, deve-se configurar nesse programa os valores dos parâmetros do controlador PID, o tipo e magnitude do sinal de referência (onda quadrada, triangular ou senoidal), seus períodos e o tempo de duração do experimento. Isso permite que diversas configurações de experimentos sejam realizadas sem a necessidade de se reprogramar o microcontrolador, já que estes parâmetros são tidos como variáveis recebidas pelo PIC através da comunicação no início do experimento.

Tendo sido iniciada a execução do programa no Matlab e recebidos os parâmetros iniciais, o microcontrolador passa a realizar o controle dos tanques com base nos sinais de referência pré-determinados e envia para o PC, a cada 200 ms, os

valores dos níveis dos tanques, o instante atual e o sinal de controle aplicado. Enquanto isso, o Matlab fornece uma animação do sistema (Figura 3), indicando o sinal de referência e o nível atual de líquido em cada tanque. Finalizado o tempo de duração do experimento, o Matlab traça uma curva do experimento realizado e salva os dados recebidos junto com uma figura do gráfico obtido numa pasta pré-determinada do computador.

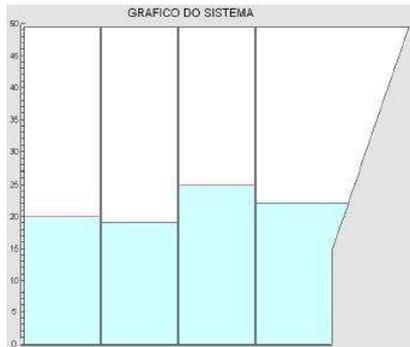


Figura 3 – Animação gráfica durante a execução do sistema.

3 Modelagem Dinâmica

Na Figura 4 tem-se um esquemático do Sistema de Nível de Líquido implementado.

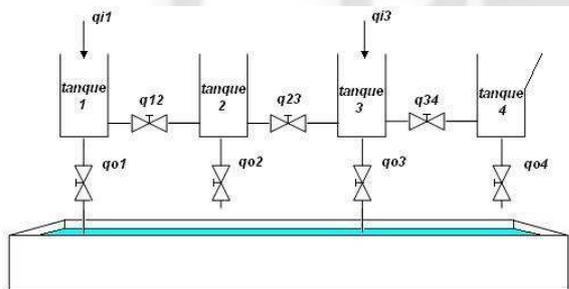


Figura 4 – Esquema do Sistema de Nível de Líquido

Podem-se definir as seguintes variáveis referentes ao processo:

q_{i1} e q_{i3} : vazões de entrada através das bombas nos tanques 1 e 3 respectivamente [cm^3/s];

q_{12} , q_{23} , q_{34} : vazões entre os tanques 1 e 2, 2 e 3 e 3 e 4, respectivamente, [cm^3/s];

q_{o1} , q_{o2} , q_{o3} e q_{o4} : vazões de saída nos tanques 1, 2, 3 e 4, respectivamente, [cm^3/s];

h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_0 : altura do nível de água nos tanques 1, 2, 3, 4 e reservatório, respectivamente [cm^3/s];

A_1 , A_2 , A_3 e A_4 : áreas das secções transversais dos tanques 1, 2, 3 e 4, respectivamente, [cm^2].

Uma importante relação a ser observada que vem da equação de Bernoulli (OGATA, 2003) é a que determina a vazão instantânea de saída de líquido, dada pela seguinte expressão:

$$q = k \cdot \sqrt{h} \quad [1]$$

em que q é a vazão de saída de líquido [cm^3/s] e o coeficiente k [$\text{cm}^{2.5}/\text{s}$] depende de diversos fatores, como a aceleração da gravidade e da válvula de restrição e h é a altura no nível do tanque com relação à válvula.

Com a equação 1, tem-se a característica não-linear do sistema relacionando a vazão com a raiz quadrada do nível através de uma constante o que torna o sistema mais interessante do ponto de vista teórico.

4 Procedimentos de Identificação

Para a identificação da planta do sistema implementado é necessário levantar os valores dos k 's dados pela equação 1.

Inicialmente foram identificados os parâmetros K_{o2} e K_{o4} . Para tal, controlaram-se os níveis dos tanques 2 e 4 em aproximadamente 46 cm, mantendo as válvulas entre os tanques 1/2 e 3/4 abertas. Em seguida estas válvulas foram fechadas permitindo o esvaziamento dos tanques através das válvulas K_{o2} e K_{o4} . Com estes dados foi possível obter uma aproximação da vazão a cada amostra do tempo.

Construiu-se um gráfico que relaciona a vazão q com a raiz da altura e o mesmo foi aproximado por uma reta através do método de mínimos quadrados. A inclinação desta reta é o parâmetro desejado, k .

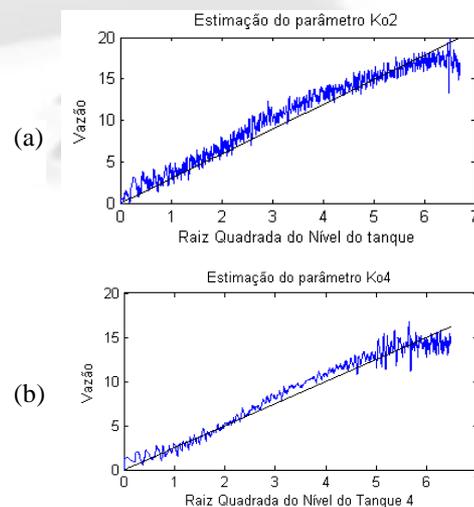


Figura 5 – Gráficos para estimação dos parâmetros K_{o2} e K_{o4}

Outros parâmetros de interesse são os coeficientes que determinam a vazão entre os quatro tanques do sistema. Como estes consistem em válvulas variáveis, foi necessária a sua calibração em diversos ajustes de posição. Os parâmetros de interesse são denominados: K_{12} , K_{23} e K_{34} .

Para a sua determinação, foi utilizada a expressão que determina a vazão entre dois tanques, como mostrado a seguir para os tanques 1 e 2, como exemplo:

$$q_{12}(t) = K_{12}(x) \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \quad [2]$$

em que x é a posição da válvula, que pode ir de 0 a 11, variando da válvula totalmente fechada até estar totalmente aberta.

No experimento realizado, controlou-se o nível de tanque 1 em 30 cm e foi então medida a diferença da altura entre os níveis dos tanques 1 e 2. Foi necessário fechar a saída de água do tanque 1 (q_{o1}) para que toda a vazão fornecida pela bomba passasse entre os tanques e saísse pelo tanque 2 (q_{o2}). Desta forma, tem-se:

$$q_{i1} = q_{12} = q_{o2} \quad [3]$$

Assim, sabendo-se a vazão de entrada que é proporcional à tensão aplicada às bombas, pode-se obter o parâmetro desejado através da seguinte expressão:

$$K_{12}(x) = \frac{q_{12}(t)}{\sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}} \quad [4]$$

Na Figura 6 é apresentado o resultado do controle do nível do tanque 1, com a posição da válvula entre os tanques 1 e 2 sendo variada manualmente de 3 para 2 e posteriormente 4, fornecendo assim os valores de $h_1(t)-h_2(t)$.

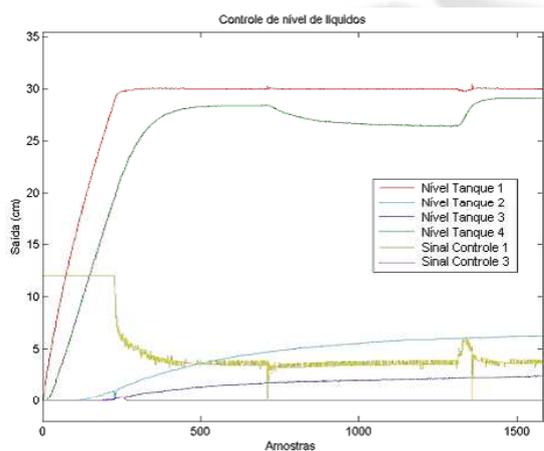


Figura 6 – Curva obtida no experimento de controle para estimação do parâmetro K_{12} .

Foram realizados outros experimentos de controle variando a posição das válvulas e a aproximação obtida para os parâmetros é mostrada a seguir, lembrando que os parâmetros K_{12} , K_{23} e K_{34} foram considerados iguais para uma mesma posição da válvula devido às semelhanças observadas nos seus comportamentos durante os experimentos. Os resultados podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativas dos parâmetros K_{12} , K_{23} e K_{34} .

Posição da válvula	K_{12} , K_{23} e K_{34}
1	4,49
2	12,12
3	16,88
4	23,41
5	32,84

Finalmente, restam ser determinados os parâmetros que relacionam a vazão de saída de água

nos tanques 1 e 3, através das suas bombas que se encontram desligadas. Como já foi descrito anteriormente, a vazão, neste caso, depende da diferença entre a altura do nível do tanque e a altura do nível do reservatório de água, sendo a bomba que se encontra desligada, uma válvula por onde passará a água.

Como no projeto inicial do sistema só foi prevista a medição de quatro níveis de líquidos, não foi possível a medição do nível do reservatório. Para realizar esta identificação, foi necessária a utilização de um modelo que determina a altura do reservatório dependendo da quantidade de água que se encontra nos outros tanques. Foi observado que a influência da variação do nível do reservatório no comportamento da saída dos tanques 1 e 3 não é significativo e, portanto, aproximações são válidas.

Conhecendo-se a diferença entre as alturas do nível do tanque e do nível do reservatório, pode-se obter os parâmetros desejados, K_{o1} e K_{o3} , controlando o nível do tanque em um valor e obtendo a vazão que se fez necessária para realizar o controle. O modelo utilizado para o tanque 1 foi o seguinte:

$$q_{o1}(t) = K_{o1} \cdot \sqrt{h_1(t) + \Delta h_{furos} - h_0(t)} \quad [5]$$

Em que h_1 é o nível do tanque 1, h_0 é o nível do reservatório com relação ao seu próprio fundo e a constante Δh_{furos} é a diferença de altura existente entre os fundos dos tanques.

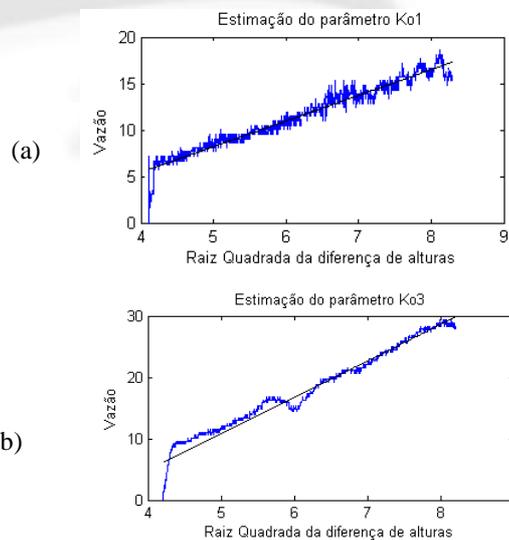


Figura 7 – Gráfico para estimação dos parâmetros K_{o1} e K_{o3}

Para representar a relação entre vazão e a raiz quadrada da diferença de alturas foram obtidas curvas com o formato de uma reta (Figura 7), mostrando que o modelo as descreve corretamente. Assim sendo, na Figura 7 têm-se retas cujas inclinações são os parâmetros K_{o1} e K_{o3} , respectivamente. É importante ressaltar que a altura inicial do reservatório principal de água era de 14,7cm, sendo este dado importante para estimar os parâmetros de interesse e, fazendo com que as estimativas sejam válidas para níveis iniciais do reservatório próximos ao utilizado.

5 Avaliação Experimental

Com o intuito de validar a identificação e verificar o modelo matemático utilizado, realizou-se uma simulação do sistema no computador através das equações diferenciais que o descrevem.

A simulação consiste na aproximação das equações obtidas por equações no domínio discreto do tempo, sendo necessária a definição de um período de amostragem, escolhido igual ao utilizado no PIC (20 ms) para o controle do sistema.

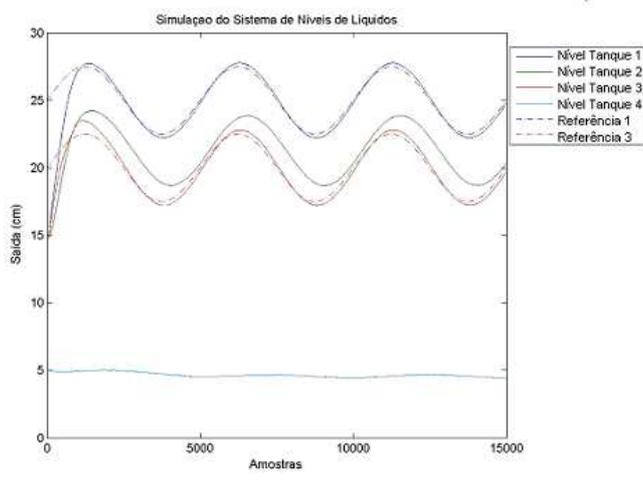


Figura 8 – Curva obtida na simulação do Sistema de Níveis de Líquidos de 1ª ordem

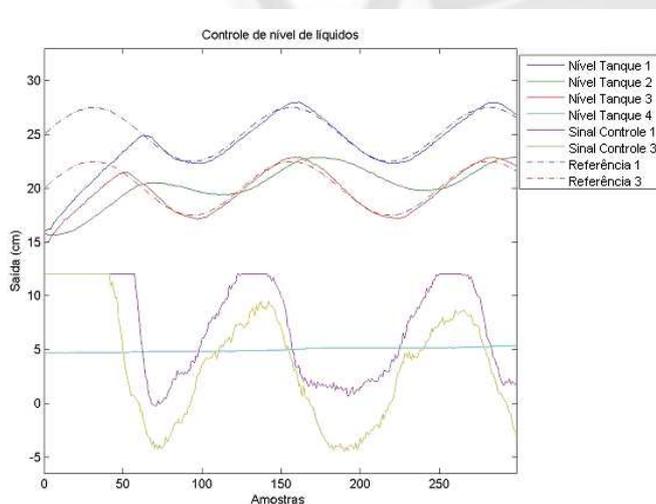


Figura 9 – Curva obtida no controle do Sistema de Níveis de Líquidos de 1ª ordem

A simulação da Figura 8 é semelhante ao experimento realizado no sistema e descrito na Figura 9, utilizando-se na simulação os mesmos parâmetros de PID e sinal de referência que foram utilizados no experimento com a maquete. Como pode ser percebido, o modelo matemático e a identificação do sistema foram desenvolvidos corretamente, apesar das simplificações, tendo em vista que a simulação se aproximou do experimento real.

6 Conclusão

Com os resultados obtidos, verificou-se que o sistema desenvolvido é bastante eficiente na realização de experimentos e simulações das técnicas de controle em processos multivariáveis, mostrando-se bastante versátil e flexível.

As simulações realizadas tanto para o sistema configurado no caso de primeira ordem quanto para o caso de segunda ordem atestaram que o modelo proposto para o nível de líquidos é adequado e que os parâmetros identificados experimentalmente foram próximos o suficiente dos parâmetros reais do sistema.

Para melhorias futuras, sugerem-se estudar novas formas de posicionar os sensores para evitar a turbulência na proximidade dos furos para entrada e saída de água nos tanques.

Referências Bibliográficas

- Gosmann, H. L. (2002). “Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Filho, F. L. de M., Bauchspiess, A., Gosmann, H. L. (2002), Controle Fuzzy para Sistema de Nível de Líquidos, XIV CBA, Natal, Brasil.
- Freitas, A. A., Borges, G., Bauchspiess, A. (2004), Avaliação do Filtro de Kalman Estendido para Estimação de Parâmetros de Processo de Nível de Líquidos, XV CBA, Gramado, Brasil.
- Jabuonski Jr., R. E., Ferreira, L. V., Guimarães, B., Bauchspiess, A. (2003), Sistema de Experimentação Remota Configurável de Controle de Nível de Líquidos Multivariável, VI SBAI, Buaru, Brasil.
- Guimarães, B., Souza, A. S., Gosmann, H. L., Bauchspiess, A. (2002), Internet Based Remote Laboratory: The Water Reservoirs, XV Congresso de la Asociación Chilena de Controle Automático, Santiago, Chile.
- Bauchspiess, A., Guimarães, B., Gosmann, H. L. (2003), Remote Experimentation on a Three Coupled Water Reservoirs, ISIE 2003 – IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brasil.
- Toth, Ferry N., Meijer, Gerard C. M., Lee, Matthijs van der (1997), A Planar Capacitive Precision Gauge for Liquid-Level and Leakage Detection, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement.
- Vásquez, C., Garcinuño, J., Pena, J. M. S., Gonzalo, A. B. (2002), Multi-sensor System for level measurements with optical fibres.
- Ogata, K. (2003), Engenharia de Controle Moderno, 4ª edição, Ed. Prentice Hall, São Paulo, Brasil.