

Bancada Experimental de Dois Tanques Acoplados Para Aplicações de Controle ??

Luisy C. G. Passos Pamela G. Barboza Cindy J. Ortiz Gamba
Cristiano H. Schuster Jean J. Schuster Wilmar A. Pineda

* *Tecnólogo en Mecatrónica Industrial - TMECI, Universidad Tecnológica del Uruguay - UTEC, Rivera - Uruguay (e-mail: luisy.gomes@estudiantes.utec.edu.uy, pamela.barboza@estudiantes.utec.edu.uy, cindy.ortiz@utec.edu.uy, cristiano.schuster@utec.edu.uy, jean.schuster@utec.edu.uy, wilmar.pineda@utec.edu.uy).*

Abstract: This paper deals with the development of an experimental bench with two coupled tanks, which consists of controlling the fluid level of the lower tank, in closed loop, through a pump that feeds the upper tank. This type of system is of fundamental importance in the teaching of classical control theories, and allows the implementation of classical and modern control theories. The objective of this work is to develop an experimental bench with two coupled tanks and carry out experiments applying a classical linear control theory, through a routine executed in an Arduino microcontroller. After the construction of the bench, obtaining the physical-mathematical model and its linearization, controller design and subsequent discretization, it was possible to control the fluid level and test the controller's performance and its response quality. From the experiments carried out, the functioning of the bench is proven through the implementation of a PI control and its value as an experimental bench for the teaching of control theory, enabling the implementation of different control techniques.

Resumo: Este artigo trata do desenvolvimento de uma bancada experimental de dois tanques acoplados, que consiste em controlar o nível de fluido do tanque inferior, em malha fechada, através de uma bomba que alimenta o tanque superior. Este tipo de sistema tem fundamental importância no ensino de teorias clássicas de controle, e permite implementação de teorias de controle clássica e modernas. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma bancada experimental de dois tanques acoplados e realizar experimentos aplicando teoria de controle linear clássica, através de uma rotina executada em microcontrolador Arduino. Após a construção da bancada, obtenção do modelo físico-matemático e sua linearização, projeto do controlador e posterior discretização, foi possível controlar o nível de fluido e testar o desempenho e a qualidade da resposta do controlador. A partir dos experimentos realizados, fica provado o funcionamento da bancada através da implementação de um controle PI e sua valia como bancada experimental para o ensino de teoria de controle, possibilitando a implementação de distintas técnicas de controle.

Keywords: Control, System, Coupled Tanks, Arduino, Liquid Level.

Palavras-chaves: Controle, Sistema, Tanques Acoplados, Arduino, Nível Líquido.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de nível líquido é um dos sistemas mais utilizados no ensino da teoria de controle clássica, e é comumente empregado para a demonstração de sistemas de primeira ordem, sendo muito utilizado em sistemas químicos nos quais se deve controlar o nível de líquido em tanques, ou então a vazão de um tanque a outro (Bateson, 1993; John et al., 2015).

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de dois tanques acoplados verticalmente, por estudantes do Tecnólogo em Mecatrônica Industrial da Universidade Tecnológica do Uruguai (UTEC), como parte da disciplina de Projeto Integrador. Essa disciplina é uma atividade

transversal ao curso e é desenvolvida em quatro etapas, começando no segundo semestre do curso e culminando com um aparato construído e controlado no quinto semestre.

Na planta tratada aqui, visa-se o bombeamento de líquido em um reservatório na base do sistema, para o tanque superior, o qual transfere o líquido para o tanque imediatamente abaixo que, por sua vez, permite a transferência para o reservatório ao qual inicialmente foi bombeado.

Desse modo, se busca controlar o nível líquido no segundo tanque por meio de um controlador Proporcional-Integral (PI), visto que a vazão da bomba é introduzida no tanque superior, e deste flui para o segundo tanque através da ação da gravidade. A vazão da bomba é regulada por meio

de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) que modifica a tensão média aplicada na bomba.

Ainda que neste trabalho se utilizará um controlador do tipo PI, o desenvolvimento desta planta permitirá a implementação de outras abordagens de controle, como por exemplo, os trabalhos desenvolvidos por Pan et al. (2005), que utilizam este sistema para aplicar técnicas de controle não linear ou por Magalhães (2016), que utiliza um controlador PI com supervisor por lógica Fuzzy, além de outras técnicas de controle não clássicas.

1.1 Justificativa

Este projeto realizou-se de modo a aplicar os conhecimentos dos alunos na resolução de um problema de aplicação real. Neste caso, o conhecimento será aplicado para controlar um sistema de dois tanques, que é amplamente utilizado em diversas aplicações.

O sistema de dois tanques resolve o problema de manter o nível no tanque inferior por meio de um controlador, que exerce ações de controle sobre a bomba, de modo a manter o nível de referência desejado no segundo tanque.

Como este é um problema clássico de controle, a bancada experimental construída pelos estudantes é de grande interesse didático, uma vez que servirá para testar e comparar distintas estratégias de controle.

1.2 Objetivos

Objetivo principal

- Projetar e implementar um sistema de dois tanques acoplados com controle em malha fechada.

Objetivos secundários

- Implementar a estratégia de controle adotada em *hardware*;
- Validar a proposta através de um protótipo de laboratório, obtendo resultados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas de tanques acoplados acarretam em um problema básico de controle de processos industriais, que consiste em poder controlar o nível e a vazão entre os tanques, para isso requer um bombeamento de líquidos, e por sua vez, tanques que armazenam esse líquido. Independentemente do processo que se aplique, os níveis dos tanques devem interagir sempre entre si, devendo ser controlados (Mogrovejo Merchán, 2016).

Esta seção inclui uma breve revisão bibliográfica do estado da arte de sistema de dois tanques, de modo a contextualizar este trabalho. Em seguida traz-se conceitos importantes de mecânica dos fluidos e de teoria de controle clássica.

2.1 Sistema de Dois Tanques

Sistemas com tanques que contém líquidos são encontrados em muitos ambientes industriais. Os exemplos incluem vasos de mistura e reação em processos químicos e sistemas de caldeira em centrais elétricas. O projeto de sistemas de

controle automático para a regulação do nível de líquido é, portanto, de considerável importância prática e requer um modelo matemático apropriado da planta (o sistema a ser controlado) como ponto de partida.

A seguir são considerados alguns aspectos de modelagem de sistemas de nível de líquidos, e discussão de métodos para a verificação e validação de um modelo de simulação, e de um sistema em escala de laboratório (Murray-Smith, 1995).

2.2 Mecânica dos fluidos

Para a modelagem de sistemas dinâmicos de nível líquido se recorre a leis básicas, onde adotam-se algumas considerações a cerca do sistema visando um modelo simplificado, mas sem perder características importantes de sua dinâmica.

Uma das leis fundamentais da mecânica dos fluidos e da lei de conservação da massa, conforme mostrado em (1), que enuncia que não se pode criar nem destruir massa, portanto a mesma é conservada (Cengel and Cimbala, 2015; White, 2011).

$$\sum \text{massa acumulada} + \sum \text{massa que entra} - \sum \text{massa que sai} = 0 \quad (1)$$

A partir desta lei de conservação de massa, e estabelecendo relações entre as taxas de variação do sistema, e as integrais de volume e de superfície de controle, através do teorema de transporte de Reynolds para a massa, considerando densidade constante, se obtém a equação para a conservação da massa na sua forma integral, mostrada em (2) (White, 2011; Fox et al., 2014):

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho d\theta - \rho A_e V_e + \rho A_s V_s = 0. \quad (2)$$

Esta última é uma equação fundamental da mecânica dos fluidos, que também é conhecida como Equação da Continuidade para o volume de controle, onde o primeiro termo à esquerda da igualdade representa a taxa de variação de massa dentro do volume de controle, enquanto que os termos $\rho A_e V_e$ e $\rho A_s V_s$ dados pelo produto da área de passagem do fluido e sua velocidade, representam a massa de entrada e saída atravessando a superfície de controle, respectivamente. A partir dessas equações e da equação da quantidade de movimento, aplicando a metodologia para um volume de controle diferencial, considerando um escoamento em regime laminar permanente, incompressível e sem atrito, é possível derivar (3), conhecida como equação de Bernoulli, onde g é a aceleração da gravidade e z é a altura ou nível ao qual se aplica a equação, ρ é a densidade, e finalmente p e V_s são a pressão e a velocidade do fluido (Fox et al., 2014).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (3)$$

2.3 Sistemas de Controle

Uma vez obtida uma relação entrada-saída em termos de uma equação, é possível começar a análise do sistema através do emprego de teorias de controle. Neste trabalho será empregada a teoria clássica de sistemas de controle.

Esta teoria trata da análise de sistemas lineares e invariantes no tempo (LIT). Tal teoria se baseia no fato de que conhecendo-se a resposta do sistema quando a entrada é um impulso unitário e o sistema for LIT, pode obter-se a resposta do sistema para qualquer entrada, decompondo-a em uma superposição de impulsos deslocados no tempo multiplicados pela amplitude da entrada naquele instante (Oppenheim et al., 2010).

Tal método requer a convolução do sinal de entrada com a resposta ao impulso, porém, o processo de convolução se torna um simples produto entre o termo de entrada e a resposta ao impulso, quando aplica-se a transformada de Laplace nestes termos.

Logo, a resposta de um sistema LTI pode ser obtida através da Função de Transferência (FT) da equação que modela o sistemas, considerando condições iniciais nulas conforme mostrado em (4), ou seja, a FT é definida como a razão entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada, quando as condições iniciais são nulas (Dorf and Bishop, 2016; Ogata, 2010).

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\mathcal{L}[y(t)]}{\mathcal{L}[x(t)]} \quad (4)$$

Com a FT do sistema em malha fechada, é possível inferir sua estabilidade fazendo uma análise de suas raízes, chamadas de zeros quando as raízes são do polinômio do numerador e de polos quando são raízes do polinômio do denominador. A parte real dos polos dita a convergência, enquanto a parte imaginária dita a frequência de oscilação.

Para a análise da resposta em frequência é utilizado o diagrama de Bode, que combina dois gráficos, o primeiro em escala logarítmica é um diagrama de magnitude em decibéis, que expressa o ganho obtido pelo sistema em uma determinada frequência, enquanto que o segundo, em escala semilogarítmica, representa o ganho fasorial em relação a frequência. Dessa maneira o diagrama de Bode é a resposta em frequência do sistema (Lathi, 2006; Dorf and Bishop, 2016).

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da bancada se partiu do modelo esquemático mostrado na Figura 1.

O modelo proposto, visto na Figura 1, consiste em dois tanques em cascata, onde a bomba alimenta o tanque 1 (superior), que sua por vez, através de um orifício no fundo do tanque, alimenta o tanque 2 (inferior), e este permite o retorno ao reservatório através de um orifício no fundo do mesmo.

Partindo do modelo esquemático desenvolveu-se um modelo CAD (*computer aided design*), e posteriormente se construiu a bancada conforme mostra Figura 2, respectivamente.

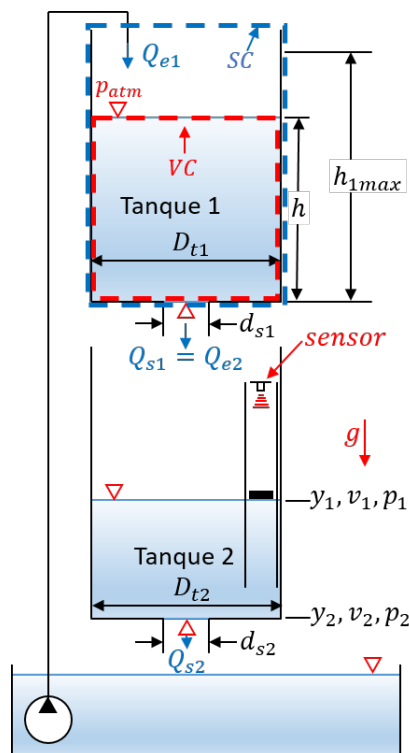


Figura 1. Diagrama dos tanques (elaboração própria).

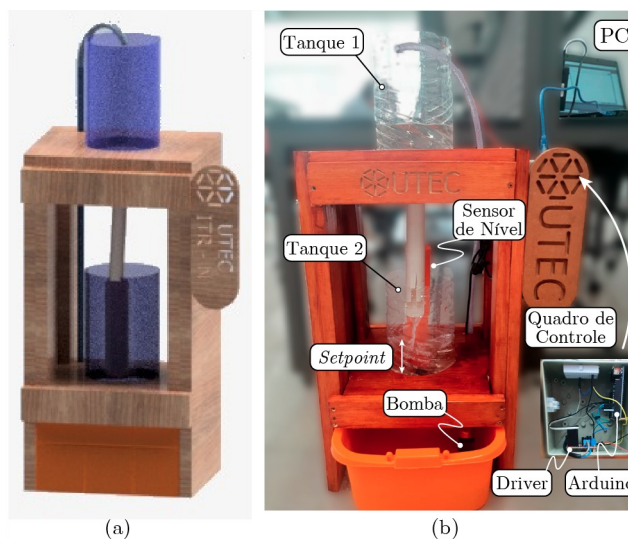


Figura 2. Desenho CAD e foto real (elaboração própria).

Da Figura 1, o sensor de nível consiste em um tubo impresso por deposição de material fundido, onde na extremidade superior se tem um sensor do tipo SharpIR (modelo GP2Y0A21YK), e a leitura é feita sobre um disco de isopor que flutua sobre o líquido. Imersa no reservatório encontra-se a bomba, que será controlada através de PWM entre 6 e 12 V (que é o intervalo de funcionamento da bomba) por meio de uma placa com circuito integrado modelo L298N. Por fim, todos os sistemas se comunicaram com uma placa Arduino UNO onde será implementado o controle discreto.

Para implementação do controle considerou-se a bomba como um ganho, já que está tem uma resposta muito mais rápida que a resposta do sistema, o que torna

Tabela 1. Parâmetros da planta.

Parâmetro	Unidade
Gravidade (g)	981 cm/s^2
Diâmetros dos tanques (D_t)	15 cm
Área dos tanques (A_t)	176,71 cm^2
Diâmetros dos orifícios de saída ($d_{s1} = d_{s2}$)	1,07 cm
Área orifício de saída dos tanques ($A_{s1} = A_{s2}$)	0,9 cm^2
Nível em estado estacionário Tanque 1 (h_{1ee})	8 cm
Nível em estado estacionário Tanque 2 (h_{2ee})	8 cm
Ganho da bomba (K_b)	7 cm^3/sV
Tensão em estado estacionário (V_{bee})	11,39 V

esta simplificação razoável. O ganho da bomba se obteve através de um experimento simples de vazão por tensão, obtendo-se a constante da bomba, que junto aos demais parâmetros fixos da planta, podem ser visto na Tabela 1.

Uma vez que a planta foi construída, proseguiu-se com os seguintes passos para chegar aos objetivos propostos:

- (1) Modelado físico-matemático;
- (2) Projeto de um controlador PI;
- (3) Implementação e simulação de resposta no *software* MATLAB[®];
- (4) Experimentação de sensor e atuadores para sua calibração;
- (5) Implementação do controle discretizado na plataforma Arduino;
- (6) Obtenção e análises de resultados para medir o desempenho da sistema proposto.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

Com o intuito de projetar um controlador para regular o nível de líquido do sistema de dois tanques, é feita a modelagem matemática que descreve a dinâmica do sistema em questão. A Figura 1 demonstra o sistema com dois tanques acoplados, ambos possuem orifícios de diâmetros iguais, tanto na base do Tanque 1 (T_1) quanto na base do Tanque 2 (T_2), e ao final o fluido retorna ao reservatório ao qual foi bombeado inicialmente.

O nível de líquido do T_2 é medido com um sensor de nível do tipo infravermelho Sharp GP2Y0A21YK. Este sistema contém uma bomba para o fornecimento de água que é bombeada para o T_1 , o fluxo através do orifício de T_1 alimenta a T_2 , e este por sua vez contém um orifício que permite a drenagem para o reservatório desde onde é obtido o fornecimento de água.

Para modelar o nível de água nos tanques são tomadas as seguintes considerações:

- (1) Escoamento laminar;
- (2) O nível de T_1 sempre deve estar abaixo de H_{1max} (altura máxima do tanque);
- (3) O nível de referência para T_2 deve ser maior que zero e menor que H_{2max} ;
- (4) A tensão de alimentação da bomba está na faixa de 6 - 12 V.

A modelagem parte da aplicação da lei de conservação da massa (1), onde a massa que acumulada é a massa acumulada no Volume de Controle (VC) em T_1 , a massa que entra é a massa que atravessa o superfície de controle (SC) bombeada desde o reservatório para T_1 , e a massa

que sai é a massa que deixa o T_1 atravessando a SC devido ao orifício em sua base (veja Figura 1).

Utilizando (2), a integral do volume no volume de controle pode ser substituída por $\rho A_t h(t)$, uma vez que o fluido é incompressível e sua densidade é constante, assim como a área de seção transversal do tanque. Dessa forma, pode-se escrever (2) em termos da variação do nível de líquido no tanque e da vazão volumétrica entrando ($Q_e(t) = A_e V_e(t)$) e saindo ($Q_s(t) = A_s V_s(t)$), de acordo com a equação (5):

$$\frac{d}{dt}h(t) = \dot{h}(t) = \frac{Q_e(t) - Q_s(t)}{A_t}. \quad (5)$$

Esta é a equação diferencial geral para a variação do nível de líquido no tanque. Para o tanque dois a equação é obtida da mesma forma, com exceção das vazões volumétricas entrando (será a vazão volumétrica que sai de T_1) e saindo do sistema, esta última será função do nível de líquido no T_2 .

A vazão de entrada no T_1 (Q_{e1}) é calculada experimentalmente variando a tensão aplicada a bomba (variável independente) e medindo a vazão. Desse modo ajustou-se um reta aos dados encontrados através do método dos mínimos quadrados, forçando a regressão passar pelo ponto (0, 0). O coeficiente angular da regressão linear é o ganho (K_b) utilizado para substituir a função de transferência da bomba (S. C. Chapra, 2016), logo a vazão de entrada no T_1 é dada por (6).

$$Q_{e1}(t) = K_b v_b(t) \quad (6)$$

Onde K_b é a constante da bomba dado em $cm^3/V.s$ e $v_b(t)$ em a tensão aplicada à bomba, dado e volts. Adicionalmente, usando o teorema de Bernoulli, pode-se encontrar a velocidade do escoamento de saída dos orifícios da parte inferior de cada tanque, conforme (7). De acordo com o que pode ser visto no diagrama do T_2 na Figura 1:

$$p_1 + \rho g y_1 + \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \rho v_2^2. \quad (7)$$

Como as pressões $p_1 = p_2 = p_{atm}$, e a velocidade $v_1 \ll v_2$, então $v_1 \approx 0$, a velocidade do escoamento para o orifício de saída do T_2 será função de $y_1(t) - y_2(t) = h(t)$, logo a velocidade de saída será dada por (8):

$$v_2(t) = \sqrt{2gh(t)}. \quad (8)$$

Sabendo que a vazão volumétrica é dada pelo produto entre a velocidade do escoamento, e a área da seção transversal por onde passa o fluido, é possível encontrar um expressão para a vazão volumétrica que deixa os tanques. Para o T_2 essa quantidade é expressa por (9).

$$Q_{s2}(t) = A_{s2} \sqrt{2gh(t)} \quad (9)$$

Já a vazão de entrada no T_2 é $Q_{s1} = Q_{e2}$. Substituindo (6) e (8) em (5), obtém-se as equações para o nível de líquido $h(t)$ para T_1 , (10), e para T_2 , em (11).

$$\dot{h}_1(t) = \frac{K_b}{A_t} v_b(t) - \frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{2gh_1(t)} \quad (10)$$

$$\dot{h}_2(t) = \frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{A_{s2}}{A_t} \sqrt{2gh_2(t)} \quad (11)$$

Essas equações contém relações não lineares dadas pelas raízes quadradas de $h(t)$. Linearizando mediante expansão em série de Taylor em torno do ponto de operação (nível em estado estacionário H_{1ee} e H_{2ee} de cada um dos tanques), uma vez que a teoria de controle clássica exige que o sistema seja linear e invariante no tempo (LTI), chega-se em (12) e (13):

$$\dot{H}_1(t) = \frac{K_b}{A_t} V_b(t) - \frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{1ee}}} H_1(t) \quad (12)$$

$$\dot{H}_2(t) = \frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{1ee}}} H_1(t) - \frac{A_{s2}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{2ee}}} H_2(t) \quad (13)$$

Essas equações lineares descrevem a dinâmica do sistema com boa precisão na vizinhança do ponto de operação.

5. PROJETO DO CONTROLADOR

Uma vez obtidos os modelos matemáticos linearizados para o nível de cada tanque mostrados por (12) e (13), se procede com a obtenção das respectivas funções de transferência, segundo (14) e (15).

$$\frac{H_1(s)}{V_b(s)} = \frac{K_b}{A_t \left(s + \frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{1ee}}} \right)} \quad (14)$$

$$\frac{H_2(s)}{H_1(s)} = \frac{\frac{A_{s1}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{2ee}}}}{\left(s + \frac{A_{s2}}{A_t} \sqrt{\frac{g}{2H_{2ee}}} \right)} \quad (15)$$

Utilizando o critério de estabilidade de Ruth se verifica que o sistema não apresenta nenhuma raiz no quadrante direito, por isso o sistema é estável.

Com os dados da constante da bomba da planta, mostrados na Tabela 1, se simula o comportamento do sistema utilizando o *software* MATLAB®. A partir do diagrama de Bode, mostrado na Figura 3, é possível determinar o tempo de amostragem para o sistema.

Da Figura 3, se observa que a frequência de cruzamento (FC: magnitude de 0 dB) ocorre aproximadamente em 0,0028 Hz. Deste modo, levando em consideração o critério de Nyquist é tomada uma frequência de amostragem 300 vezes maior, isto resulta em um período de amostragem de aproximadamente um segundo. A escolha de uma frequência de amostragem alta deve-se a que na prática o sistema conta com um estágio de pré-carga dos tanques e o controlador somente é ativado quando o nível do tanque está próximo do seu valor em estado estável conforme foi modelado na Seção 4.

Como o objetivo de controle consiste em rastrear um sinal constante, um controlador PI é utilizado por apresentar erro nulo em estado estacionário cujo projeto é feito com a ferramenta *auto-tune* do *software* MATLAB®, assim são obtidos os parâmetros do controlador como: Constante proporcional $K_p = 1,34$; Constante integral $K_i = 0,02$. Sua função de transferência discreta é:

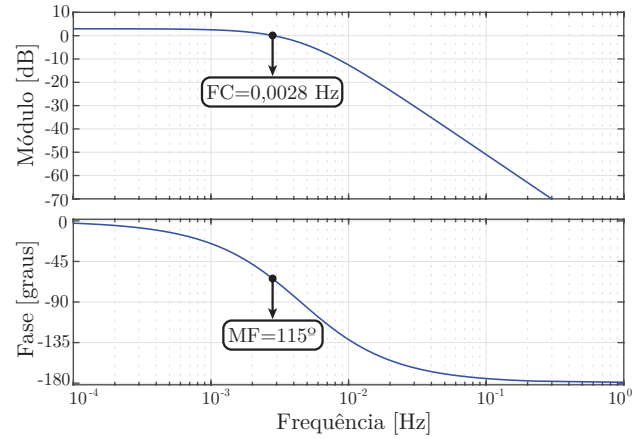


Figura 3. Resposta em frequência da planta (elaboração própria).

$$\frac{V_b(s)}{E(s)} = \frac{1,34s + 0,02}{s} \quad (16)$$

Para a implementação do controlador na plataforma digital Arduino, se faz necessário representá-lo no tempo discreto mediante a transformada z. Utilizando o método de discretização de Tustin, segundo Vinagre et al. (2003), com período de amostragem de 1 s, chega-se na função de transferência no domínio da frequência discreto:

$$C(z) = \frac{V_b(z)}{E(z)} = \frac{1,35z - 1,33}{z - 1} \quad (17)$$

Representando na forma implementável se obtém a equação em diferenças:

$$v_b[n] = 1,35e[n] - 1,33e[n - 1] + v_b[n - 1] \quad (18)$$

Onde, $v_b[n]$ e $v_b[n - 1]$ são as ações de controle (tensão aplicada) e $e[n]$ e $e[n - 1]$ são os sinais de erro aplicados no instante atual e passado respectivamente.

A resposta do sistema em malha fechada é verificado via Simulink mediante o diagrama de blocos da Figura 4.

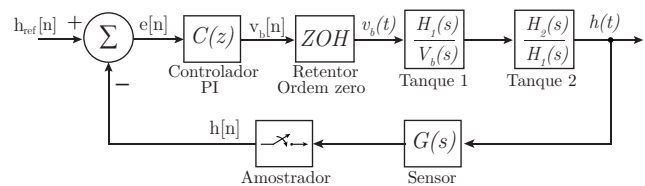


Figura 4. Diagrama do blocos do sistema em malha fechada (elaboração própria).

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos, bem como comparativos das respostas em malha fechada entre a planta real e a modelada através de Simulink.

Uma vez implementado o controlador, demonstrado por (18), se testou a resposta da planta para um nível de referência de 8 cm.

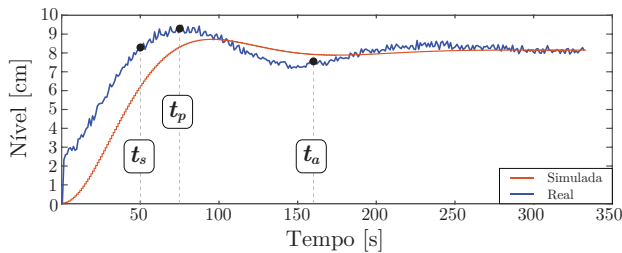


Figura 5. Resposta real e simulada da planta controlada (elaboração própria).

A Figura 5 mostra um comparativo entre a resposta real e a simulada, é possível observar que as respostas do sistema simulado e real apresentam um comportamento similar. A defasagem observada se deve ao fato que na planta real existe um tempo morto de aproximadamente 30 segundos (pré-carga) até o controlador PI entrar em funcionamento. Na prática isso foi feito implementando um comando para manter a bomba ligada por 25 segundos antes do controlador entrar em funcionamento, por isso no tempo zero para a planta real o nível do T_2 já é de aproximadamente 2 cm. Para a avaliação do desempenho do controlador é feita a medida experimental dos tempos de subida ($t_s \approx 50$ s), de pico ($t_p \approx 75$ s) e de assentamento ($t_a \approx 160$ s). Também, a controlabilidade é testada submetendo o sistema a uma perturbação de 45% adicionando uma quantidade de 900 ml de água no T_2 cuja resposta é ilustrada na Figura 6.

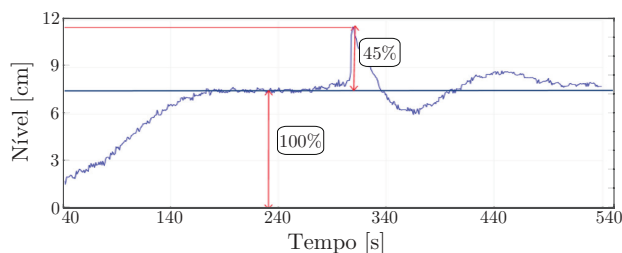


Figura 6. Resposta do sistema a uma perturbação (elaboração própria).

Por fim analisando a perturbação mostrada na Figura 6, verifica-se que ante uma perturbação de 45% o sistema de controle levou aproximadamente 3 minutos e 22 segundos para voltar ao valor de referência, este tempo corresponde com o tempo de assentamento t_a . Como a dinâmica do sistema é lenta, a implementação do controlador digital foi feita no microcontrolador Atmega 328 P embebido na plataforma de desenvolvimento Arduino UNO cuja frequência de operação é suficiente para garantir a frequência de amostragem usada neste trabalho..

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o procedimento para a construção de um sistema automático para controle de nível de líquido de dois tanques acoplados. Partindo desde o projeto CAD até a implementação de um controlador de nível digital.

O sistema em malha fechada apresentou um bom desempenho em relação ao tempo de assentamento e sobre sinal máximo, quando submetido a perturbações externas.

Também, esta bancada é de grande valia para o Laboratório de Automação e Controle do curso de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial da UTEC, já que possibilita a implementação de outras estratégias de controle, como o não linear, robusto, etc..., abordadas no fim do curso de Engenharia em Controle e Automação, onde o último é uma extensão do Tecnólogo e prevê dois anos mais de estudos para a obtenção do título de engenheiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo suporte financeiro fornecido pela Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC) e ao curso de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial do Instituto Tecnológico Regional Norte de Rivera/UY.

REFERÊNCIAS

- Bateson, R.N. (1993). *Introduction to control system technology*. Macmillan.
- Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2015). *Mecânica dos fluidos: Fundamentos e Aplicações; 3ª*. AMGH Editora.
- Dorf, R.C. and Bishop, R.H. (2016). *Modern Control Systems; 13ª*. Editora Pearson.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., and Leylegian, J.C. (2014). *Introdução à Mecânica Dos Fluidos; 8ª*. LTC Editora.
- John, J.A., Jaffar, N., and Francis, R.M. (2015). Modelling and control of coupled tank liquid level system using backstepping method. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(6), 667–671.
- Lathi, B.P. (2006). *Sinais e Sistemas Lineares; 2ª*. Editora Bookman.
- Magalhães, S.d.A.F. (2016). Escalonamento de ganhos de um controlador pi por lógica fuzzy aplicado ao processo de dois tanques acoplados.
- Mogrovejo Merchán, D.G. (2016). *Diseño e implantación de un sistema de cuatro tanques interconectados con control PID robusto multivariable*. Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana.
- Murray-Smith, D.J. (1995). *Continuous System Simulation*. Springer, Boston, MA.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno; 5ª*. Editora Pearson.
- Oppenheim, A.V., Willsky, A.S., and Hamid, S. (2010). *Sinais e Sistemas; 2ª*. Editora Pearson.
- Pan, H., Wong, H., Kapila, V., and de Queiroz, M.S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, 13(1), 27–40.
- S. C. Chapra, R.P.C. (2016). *Métodos Numéricos para Engenharia*. AMGH Editora.
- Vinagre, B.M., Chen, Y.Q., and Petráš, I. (2003). Two direct tustin discretization methods for fractional-order differentiator/integrator. *Journal of the franklin institute*, 340(5), 349–362.
- White, F.M. (2011). *Mecânica dos Fluidos, 6ª*. AMGH Editora, Porto Alegre.