

Desenvolvimento de uma Planta Didática de Tanques Acoplados para Estudo de Sistemas de Controle e Automação

Ricardo Castro da Silveira

Matheus Perin

Resumo

A área de Sistemas de Controle tem fundamental importância nas indústrias, pois com a sua aplicação é possível aumentar a produtividade, rentabilidade e otimizar processos industriais. Na maioria dos processos existem variáveis críticas a serem monitoradas e controladas. As variáveis como temperatura, vazão, no caso de gases e líquidos, assim como nível e pressão, sendo de grande importância no funcionamento dos processos. Já em ambiente acadêmico, a absorção do conhecimento é fundamentada em experiências vividas durante todo o percurso do estudante. O conteúdo teórico sempre se torna mais dinâmico e lúdico quando aplicado à prática. O processo de controle de nível de líquidos é bastante adequado para ser utilizado como uma ferramenta didática, pois, além de ser um experimento visual, permite fazer a conexão entre teoria e prática. Este trabalho tem por objetivo a implementação de um sistema de controle de nível em tanques acoplados. Em virtude da demanda de vazão variável, que pode ocorrer na chegada do líquido que abastece o reservatório ou na saída do reservatório, torna-se então imprescindível o estudo, dimensionamento e implementação de um controlador. Todo o desenvolvimento do projeto foi feito com testes em laboratório para se obter resultados satisfatórios, prezando sempre pela qualidade e confiança no sistema geral, tornando-o mais adequado para o objetivo de estudo de automação e controle.

Palavras-chave: sistema de tanques acoplados; controle de nível; sistemas de controle.

1. Introdução

Processos industriais usam com frequência tanques acoplados para várias finalidades, como por exemplo, armazenamento e transporte de líquidos. Indústrias petroquímicas, de celulose ou de tratamento de líquidos, costumam possuir processamento de líquidos por processos químicos. Este procedimento requer um controle criterioso de nível do fluido e de um controle de fluxo entre os tanques. O controle do nível de líquidos é um problema comum, pois para realizar qualquer ação precisa-se saber o volume de líquido no interior dos tanques envolvidos, e no caso de transporte de líquidos entre tanques, é preciso saber o fluxo. Usualmente os tanques são acoplados em conjunto de modo que os níveis de interação também devem ser controlados na planta (LAUBWALD, 2015).

Ao longo dos últimos anos, diversos trabalhos voltados para o controle de nível de tanques acoplados foram desenvolvidos. Em (JUNIOR, 2009), é apresentada a modelagem e controle de nível em um sistema composto por quatro tanques. O autor também aborda a identificação dos parâmetros do modelo, o qual foi obtido através da aplicação do princípio da conservação da massa e da equação de Bernoulli. A planta é composta por três tanques retangulares e um tanque trapezoidal, e o nível de líquido dos tanques é medido indiretamente utilizando sensores diferenciais de pressão. O controle é feito utilizando um controlador lógico programável (CLP), que aciona duas bombas utilizando modulação por largura de pulso (PWM). Um trabalho semelhante foi apresentado por Da Fonseca (2012), tratando da modelagem e controle adaptativo de nível de tanque utilizando o Sistema T5552 da fabricante Amatrol.

Mais recentemente, Pinto (2016) propôs o controle de nível do sistema de tanques acoplados utilizado por Junior (2009) através de visão computacional. Neste caso, utilizaram-se câmeras para determinar o nível de líquido dos tanques através do monitoramento da posição de um alvo flutuando sobre o líquido. Alpi (2016) propôs o desenvolvimento de uma planta didática para o controle de níveis de tanques acoplados utilizando controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). O sistema desenvolvido consiste em dois tanques acoplados e utilização de sensor ultrassônico para medição do nível. De

forma geral, o autor conclui que foi possível obter um controle satisfatório dentro das especificações desejadas.

Já em (MENDES, 2017) é apresentado o desenvolvimento de um sistema de controle para um tanque cônico baseado em uma placa Arduino comunicando-se com um computador através do *software* MATLAB. Mais recentemente, Duarte (2020) propõe um sistema para detecção e isolamento de falhas em uma planta de controle de nível de dois tanques acoplados utilizando redes neurais. Embora tenham sido utilizadas apenas simulações, o sistema proposto apresentou um desempenho satisfatório, detectando e isolando todas as falhas inseridas.

No que tange ao controle de sistemas de nível de tanques, usualmente opta-se pelos controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) devido à sua simplicidade e existência de diversos métodos para sintonia de seus parâmetros. Esta última característica o torna o controlador mais utilizado na indústria, apenas de existirem técnicas de controle mais avançadas (BAZANELLA; DA SILVEIRA JUNIOR, 2005). Na década de 90, segundo Aström e Hägglund (1995) indicam que cerca de 90% das malhas de controle em processos industriais operam com controladores PID. Sendo tão populares na época que ainda existem diversos equipamentos industriais dedicados à execução de um algoritmo PID em malhas de controle, como por exemplo funções programadas em CLPs (controlador lógico programável), blocos funcionais em SDCDs (sistemas digitais de controle distribuído) e barramentos industriais (BAZANELLA; DA SILVEIRA JUNIOR, 2005).

Este trabalho tem por objetivo a construção de uma planta multivariável composta por um sistema de tanques acoplados acionados por bombas e com medição eletrônica em tempo real do nível de líquido. A planta desenvolvida será um sistema de seis tanques modulares que podem ser conectados de formas distintas, permitindo a obtenção de diversas configurações de acoplamento entre os tanques. Também será desenvolvido um sistema eletrônico de acionamento das bombas que permita a aplicação de tensões variáveis, permitindo assim que o controle do nível dos tanques seja realizado em tempo real utilizando controladores tanto de tempo contínuo quanto de tempo discreto. O trabalho está organizado conforme segue. Na seção 2, é apresentada a metodologia do

projeto. Na seção 3, são descritos o desenvolvimento da estrutura mecânica e dos sistemas eletrônicos de acionamento das bombas e de medição de nível. Nas seções 4 e 5, são apresentados os resultados experimentais e, por fim, as conclusões.

2. Materiais e métodos

Optou-se que cada um dos seis tanques que compõem o sistema terá aproximadamente três litros, sendo fixados em uma estrutura mecânica construída utilizando alumínio estrutural. Além dos tanques, o sistema contará também com dois reservatórios de doze litros cada para armazenar todo líquido necessário para o sistema, sendo que cada um deles conterá também três bombas. Os tanques e os reservatórios serão feitos de acrílico transparente de três milímetros de espessura e cortados com uma CNC laser. Já a estrutura mecânica onde serão fixados os tanques será construída com alumínio estrutural V-slot 20x20. O sistema irá conter seis bombas de 12V com vazão de 280L/h cada, as quais servirão como entrada de líquido nos tanques. Estas bombas serão alimentadas do com sinais analógicos de tensão, sendo desenvolvido também um circuito eletrônico para realizar a etapa de potência do acionamento. Também será desenvolvido um sistema eletrônico para medição contínua do nível de líquido nos tanques baseado em sensores ultrassônicos.

O teste do sistema será realizado utilizando computador conectado a uma placa de aquisição de dados USB-6009 da National Instruments juntamente com o software Labview®.

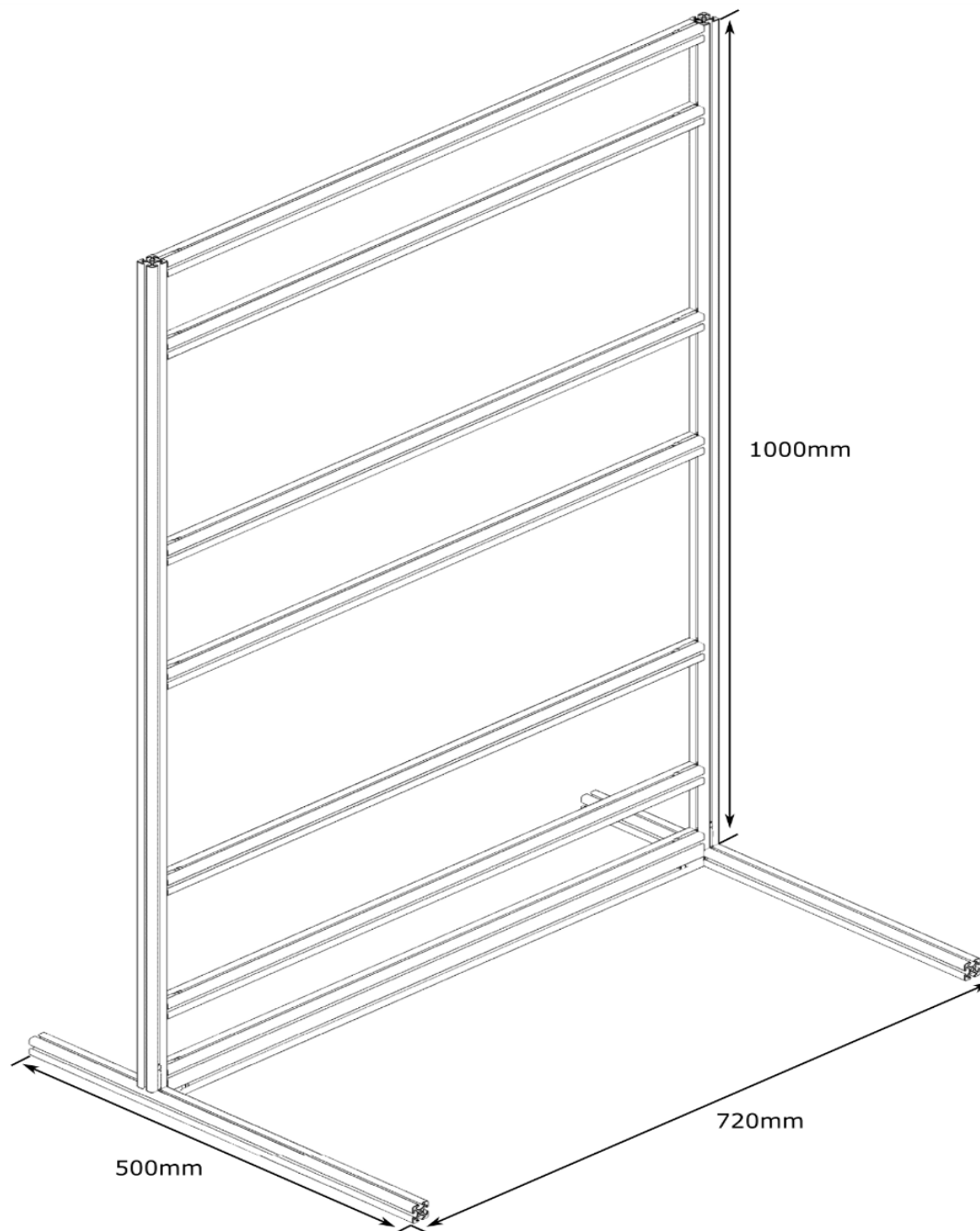
3. Desenvolvimento do Sistema

Nesta seção é descrito o desenvolvimento da planta de controle de nível de tanques acoplados projetada e construída neste trabalho. São apresentados e discutidos aspectos quanto à estrutura mecânica do sistema desenvolvido, bem como quanto aos sistemas eletrônicos de medição de nível de líquido e acionamento das bombas.

3.1. Estrutura Mecânica

Conforme explicado na seção anterior, a estrutura de fixação dos tanques foi projetada em alumínio estrutural V-slot 20x20. A Figura 1 mostra a estrutura projetada.

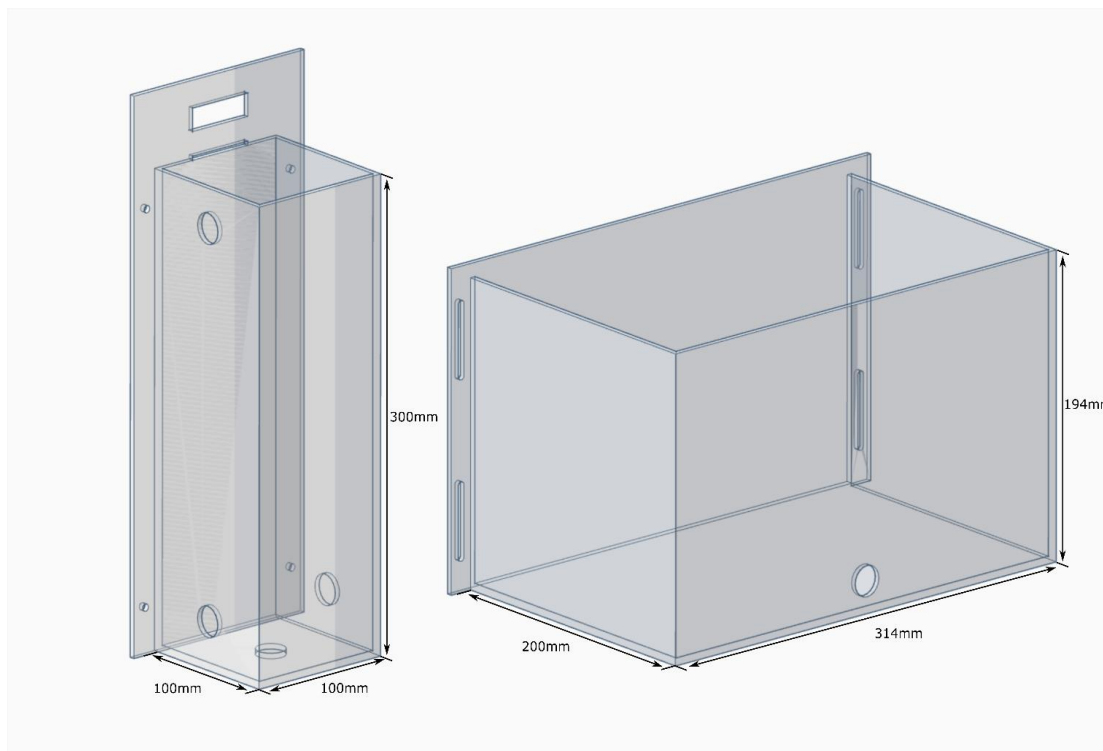
Figura 1 – Estrutura mecânica para fixação dos tanques.



Fonte: o próprio autor (2023).

Já os seis tanques e os dois reservatórios foram construídos conforme mostrado na Figura 2, onde são apresentadas as dimensões principais destes elementos.

Figura 2 – Tanques (esquerda) e reservatórios (direita) projetados.



Fonte: o próprio autor (2023).

3.2. Sistema de Medição de Nível de Líquido nos Tanques

Para medir o nível de líquido nos tanques, optou-se por utilizar sensores de distância ultrassônicos. Estes sensores são compostos por um emissor e por um receptor de onda de som de alta frequência, realizando a medição da distância entre o sensor e um objeto comparando o tempo levado entre a emissão e a recepção da onda emitida.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o sensor ultrassônico US-016, mostrado na Figura 3. Este sensor tem como principal característica a saída em tensão proporcional à distância medida e pode ser configurado para medição com fundo de escada de um ou três metros. Outras características do US-016 são tensão

de alimentação de 3,3 a 5V, corrente máxima de 3,8 mA, alcance mínimo de 20 mm e aproximadamente 0,3 mm de incerteza.

Figura 3 – Sensor ultrassônico US-016.



Fonte: Aliexpress (2023a).

Dadas estas características, optou-se por alimentar os sensores com 5 volts e utilizar o fundo de escala de 1000 mm. Assim, a medição de distância é dada conforme a equação 1, onde d representa a distância em milímetros e V_{out} a tensão de saída do sensor, medida em Volts.

$$d = 20V_{out} \quad (1)$$

Considerando que os sensores serão fixados em tampas que serão acopladas à parte superior dos tanques que possuem 300 mm e que a altura do sensor é de aproximadamente 20 mm, o nível de líquido em um tanque será medido conforme mostrado na equação 2.

$$h = 28 - 20V_{out} \quad (2)$$

Na última expressão, h representa a altura do nível de líquido no tanque medido em milímetros. Embora o sensor esteja configurado para medir até 1000 mm de distância, dada as dimensões do tanque e a distância mínima de detecção do US-016, a faixa de medição de nível de líquido do sistema será de 0 a 260 mm.

3.3. Bombas

Neste trabalho, optou-se por utilizar um modelo de bomba de 5 watts, com tensão máxima de alimentação de 12 volts em corrente contínua e vazão de 280 litros por minuto. Dadas estas especificações, a corrente máxima de operação das bombas é de aproximadamente 416 mA. O modelo de bomba escolhido é mostrado na Figura 4. Optou-se por este modelo devido ao seu baixo custo e à sua alta vazão, o que permite que a bomba funcione com tensões menores do que a nominal e forneça diversos valores distintos de vazão durante a operação do sistema.

Figura 4 – Bomba utilizada.



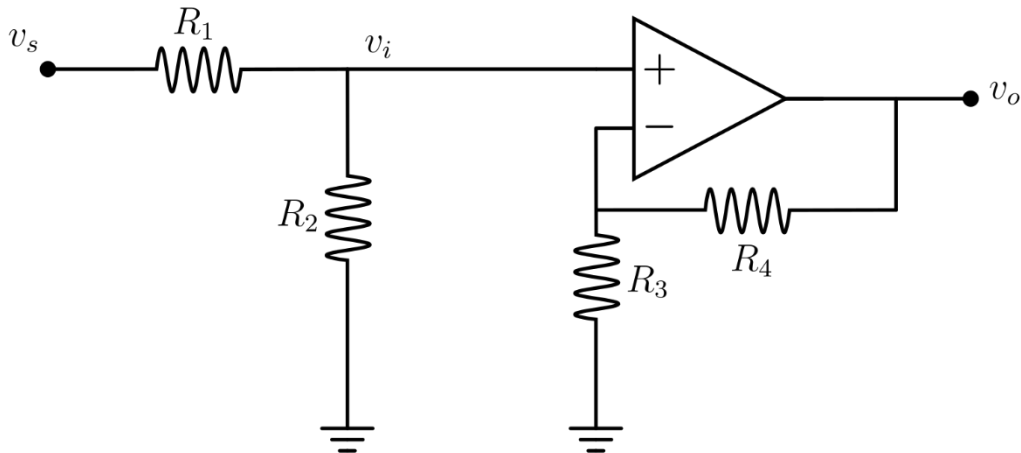
Fonte: Aliexpress (2023b).

3.4. Sistema de Acionamento das Bombas

Conforme explicado na Seção 2, pretende-se que as bombas sejam acionadas utilizando sinais de tensão em corrente contínua que serão gerados pelo sistema de controle a ser utilizado. Como estes sistemas de controle geralmente são implementados utilizando amplificadores operacionais no caso de sistemas de controle de tempo contínuo, ou microcontroladores no caso de sistemas de controle de tempo discreto, é necessário adicionar uma etapa de potência para fornecer a corrente exigida pelas bombas. Assim, de forma a manter o sinal de tensão original com o mínimo de distorção possível, optou-se pela utilização de um circuito baseado em amplificadores operacionais de

potência na configuração não-inversora com um divisor de tensão na entrada, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Circuito projetado para a etapa de potência de uma bomba.



Fonte: o próprio autor (2023).

Resumidamente, a tensão de entrada do amplificador operacional (v_i) resulta da aplicação da tensão v_s ao divisor de tensão formado pelos resistores R_1 e R_2 , sendo dada por:

$$v_i = v_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Já a tensão de saída do amplificador operacional, v_o , é dada conforme a equação 4, mostrada abaixo.

$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right). \quad (4)$$

Desta forma, combinando as equações (3) e (4), obtém-se a seguinte expressão que relaciona a tensão v_s com a tensão v_o :

$$v_o = v_s \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right). \quad (5)$$

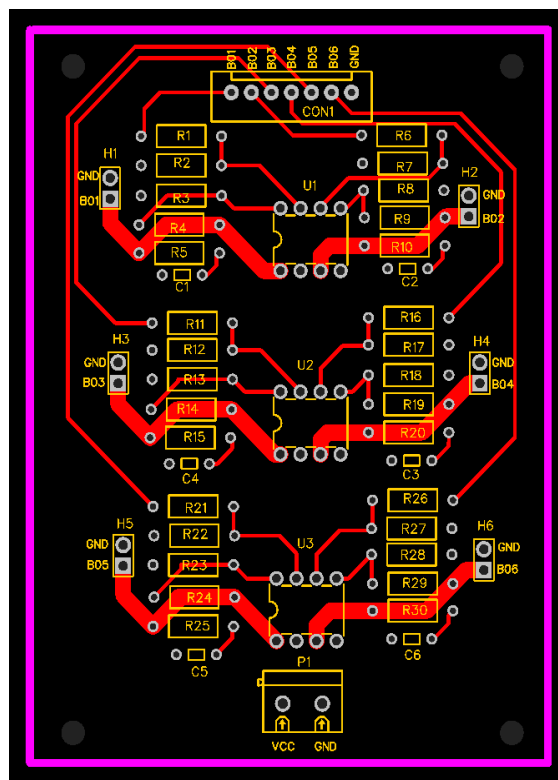
A escolha dos resistores deve ser feita de forma a mapear a faixa de tensão do dispositivo utilizado para gerar os sinais de controle das bombas para

a faixa de operação de tensão das bombas (0 a 12V). Neste trabalho, optou-se por utilizar $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$, resultando em $v_o = v_s$.

O amplificador operacional selecionado para implementar o circuito mostrado na Figura 5 foi o L272 (STMICROELECTRONICS, 2003). A opção por este modelo deu-se por sua corrente de saída de 1A, a qual é mais que o dobro do necessário para acionar o modelo de bomba escolhido, pela possibilidade de operação com baixas tensões, pela tensão de saturação ser 60 mV considerada baixa e pelo fato de cada circuito integrado possuir dois amplificadores operacionais encapsulados, diminuindo a quantidade de componentes do circuito completo para acionamento das seis bombas do sistema de controle de nível.

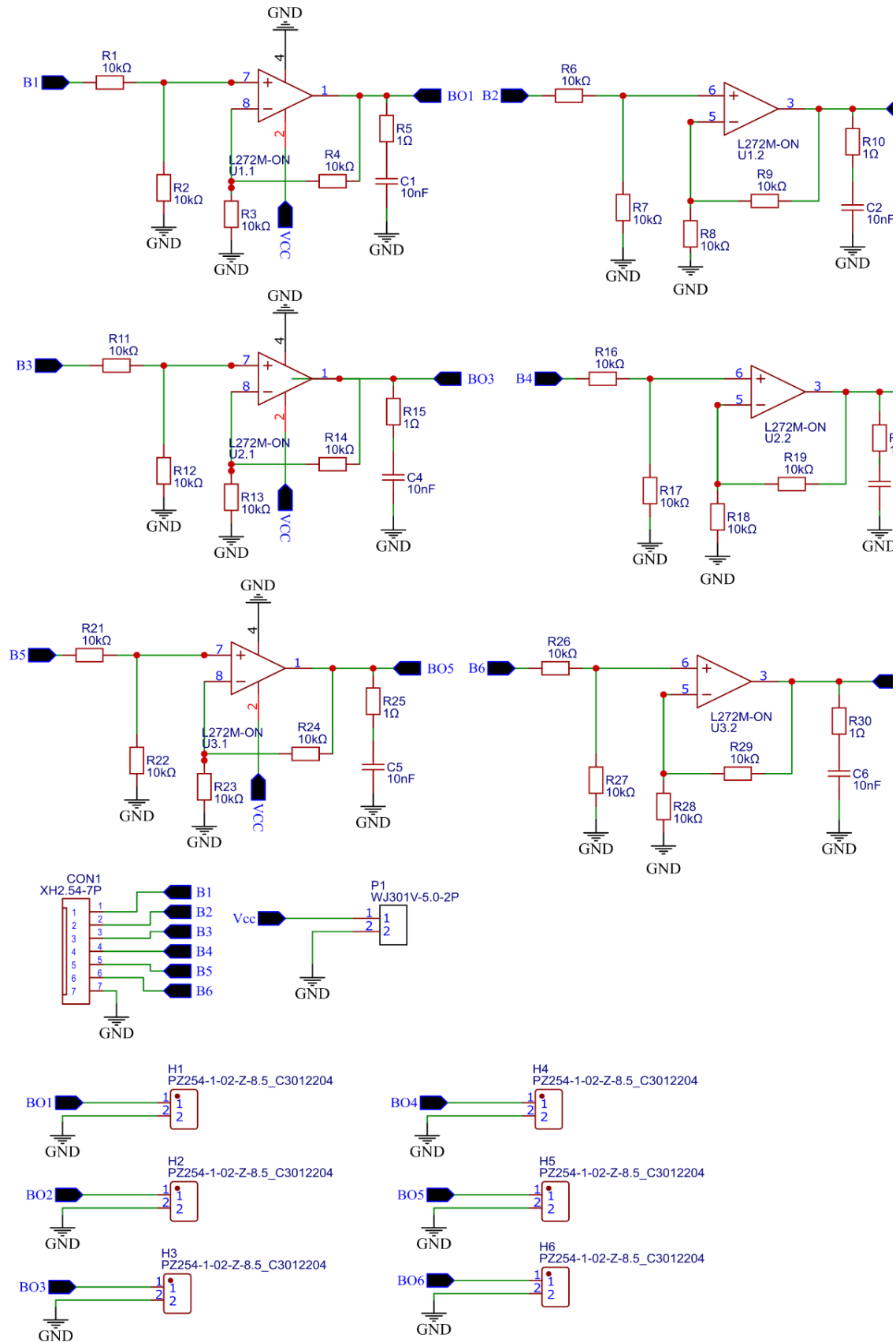
Considerando o amplificador operacional selecionado, os valores das resistências e o circuito escolhido para a realização da etapa de potência, projetou-se uma placa de circuito impresso mostrada na Figura 6 e cujo esquemático é mostrado na Figura 7.

Figura 6 – Placa de circuito impresso dupla face projetada para a etapa de potência das bombas.



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 7 – Esquemático da placa de circuito impresso projetada para a etapa de potência das bombas.



Fonte: o próprio autor (2023).

4. Teste do Sistema e Resultados Experimentais

A planta de controle de nível de tanques acoplados descrita na Seção 3 foi implementada conforme mostrado na Figura 8. A Figura 9 mostra em detalhes um dos tanques modulares construídos, enquanto a Figura 10 apresenta a placa de circuito impresso fabricada e com os componentes soldados.

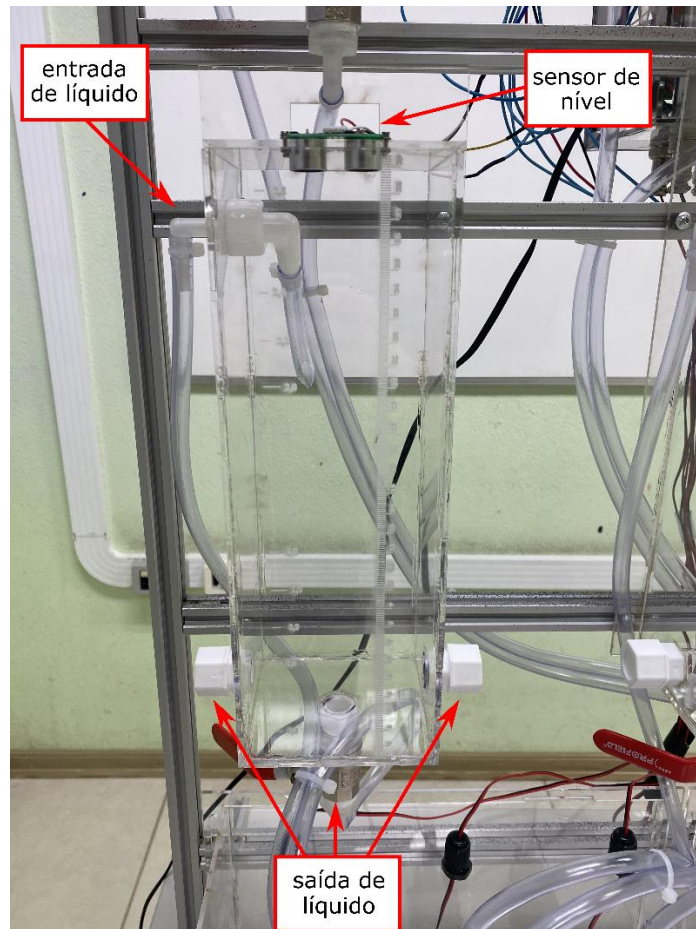
Conforme explicado na Seção 2, o sistema projetado e construído foi testado utilizando uma placa de aquisição de dados USB-6009 da National Instruments em conjunto com o software Labview®. Como a placa de aquisição de dados utilizada possui uma quantidade limitada de entradas e saídas analógicas, não foi possível testar o sistema completo simultaneamente. Desta forma, serão detalhados aqui os resultados experimentais de apenas um dos tanques.

Figura 8 – Planta de controle de nível de tanques acoplados.



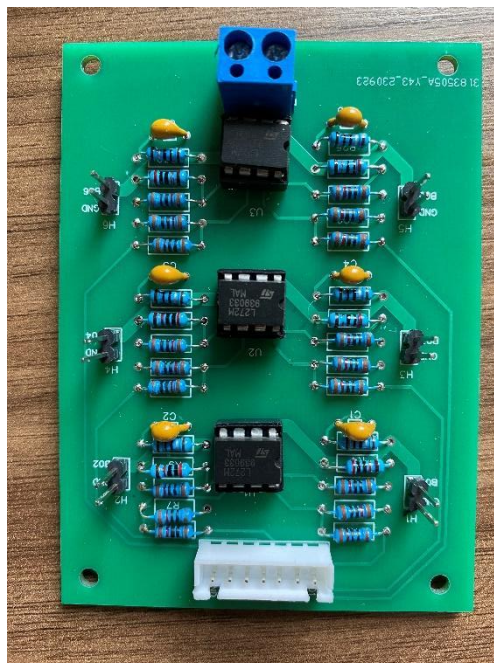
Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 9 – Tanque modular.



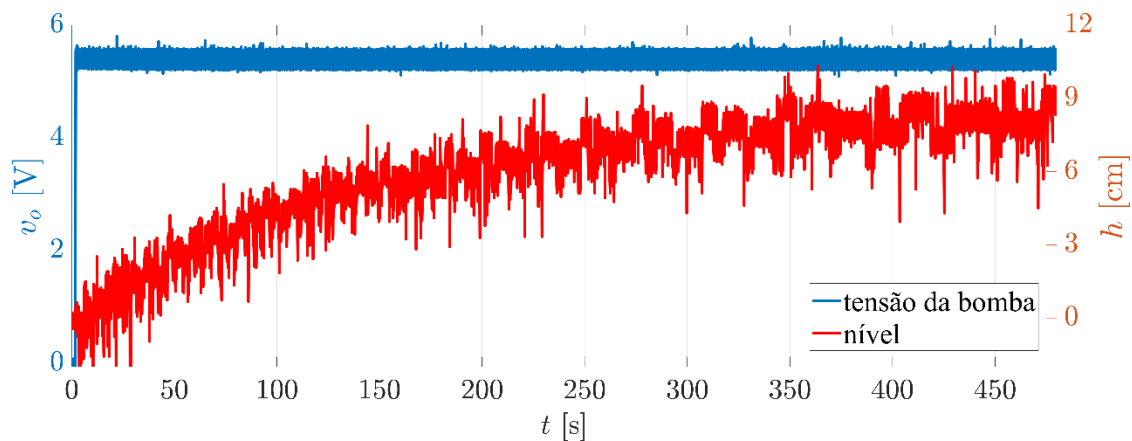
Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 10 – Placa de circuito impresso montada.



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 11 – Resultados de medição do nível de líquido de um tanque.



Fonte: o próprio autor (2023).

A Figura 11 mostra os resultados de medição de nível de líquido e da tensão aplicada na bomba obtidos para um dos tanques aplicando um degrau acionando a bomba com uma tensão de 5,5 volts. Pode-se constatar que a placa de acionamento das bombas funcionou de forma satisfatória pois a tensão aplicada é, na média, muito próxima do valor do sinal enviado na entrada da placa. De fato, a diferença entre o sinal enviado e a medição da tensão efetivamente aplicada foi de apenas 1,8%.

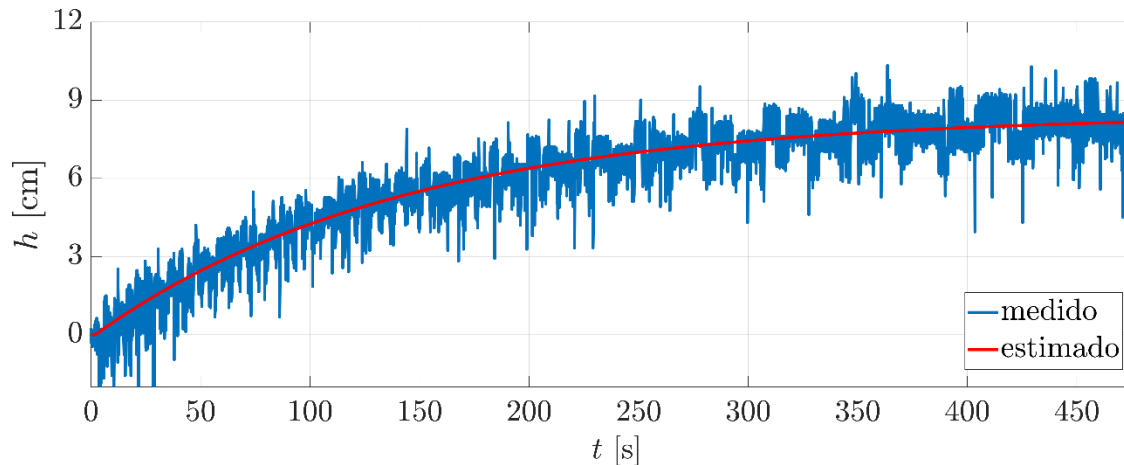
No que tange à medição do nível de líquido, pode-se concluir que o sistema baseado em sensores ultrassônicos foi capaz de medir a variação conforme a bomba injeta mais líquido no tanque, embora seja perceptível a presença de oscilações devido a turbulências no interior do tanque além de um nível considerável de ruído de alta frequência. Analisando a Figura 11, nota-se que o tanque apresenta uma resposta típica de sistema de primeira ordem, entrando em regime permanente, com a vazão do tanque para reservatório com um nível de líquido de aproximadamente 8 centímetros.

Assumindo a tensão da bomba como entrada e o nível de líquido do tanque como saída, a função de transferência foi estimada utilizando a função *ftest()* do software MATLAB®, resultando em:

$$\frac{H(s)}{V_b(s)} = \frac{0,01114}{s + 0,007125}, \quad (6)$$

onde $H(s)$ representa a transformada de Laplace do nível de líquido e $V_b(s)$ representa a transformada de Laplace da tensão aplicada na bomba.

Figura 12 – Comparação entre as saídas do sistema e da função de transferência estimada.



Fonte: o próprio autor (2023).

A Figura 12 mostra o resultado da aplicação da tensão da bomba na função de transferência dada pela equação (6), em comparação com o nível de líquido medido, onde pode-se constatar que a função de transferência estimada representa com boa fidelidade o sistema.

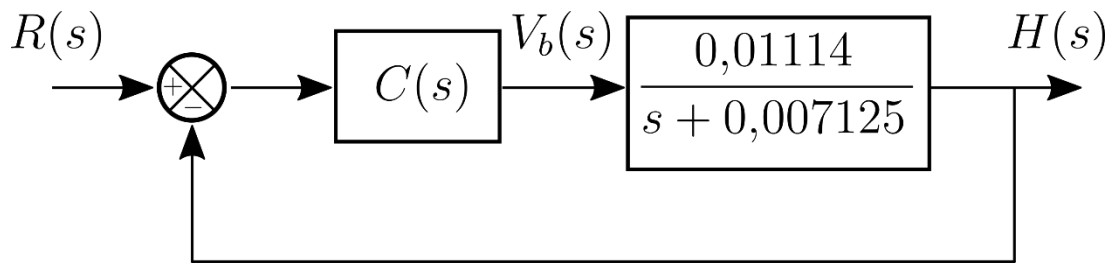
Por fim, foi realizado um teste do sistema operando em malha fechada, conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 13. Definiu-se como requisito de desempenho para o projeto do controlador que o sistema responda 100% mais rápido em malha fechada do que em malha aberta e que apresente erro zero em regime permanente para entradas do tipo degrau. De forma a atender às especificações de desempenho em malha fechada, chegou-se à seguinte função de transferência para o controlador:

$$C(s) = 1,28 \left(\frac{s + 0,007125}{s} \right). \quad (7)$$

Em malha fechada, a função de transferência resultante é dada por:

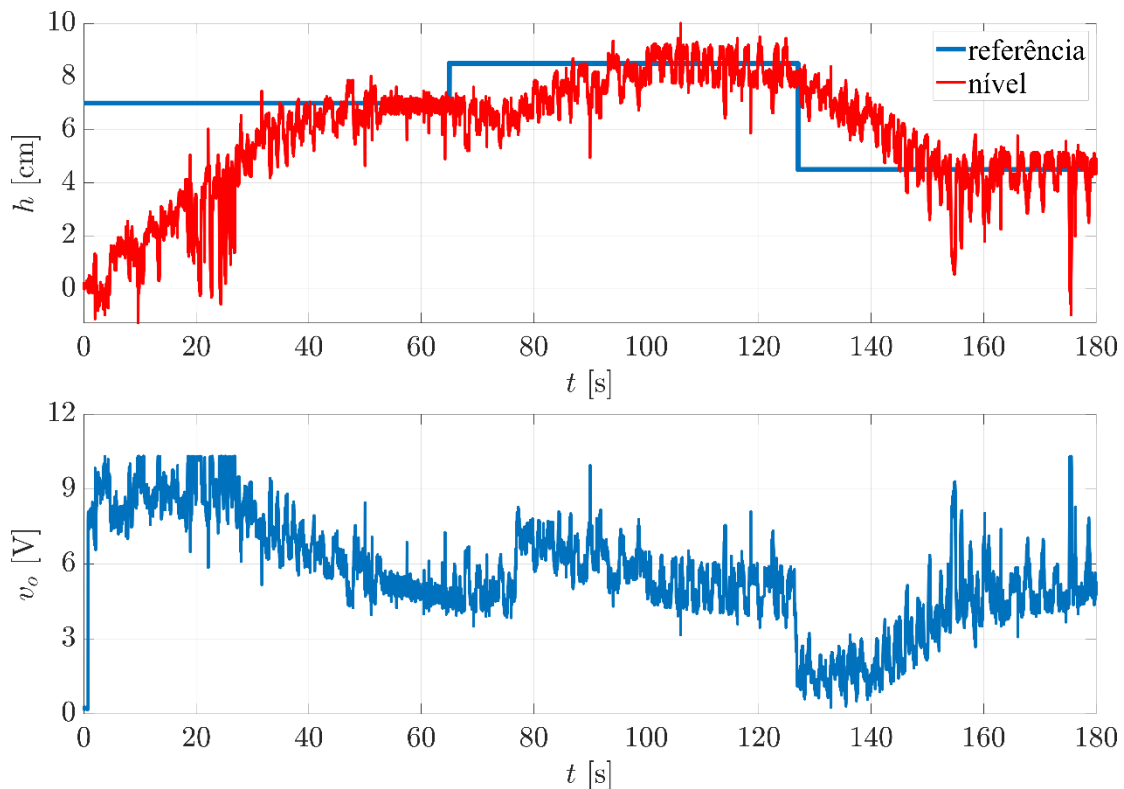
$$G(s) = \frac{0,01425}{s + 0,01425}. \quad (8)$$

Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 14 – Resultados do sistema em malha fechada.



Fonte: o próprio autor (2023).

O sistema de controle mostrado na Figura 13 foi implementado no Labview®, e os resultados obtidos são mostrados na Figura 14. De forma geral, pode-se perceber que o sistema de controle atuou de forma satisfatória e cumpriu com os requisitos de desempenho, atingindo o regime permanente significativamente mais rápido do que em malha aberta e oscilando em torno do valor da referência. Não obstante, melhores resultados poderão ser obtidos se a qualidade do sinal da medição de nível de líquido for aprimorada através da diminuição do ruído.

Desta maneira, pode-se concluir que a implementação física da planta de tanques acoplados foi realizada com sucesso e o sistema se comportou de acordo com o que foi projetado.

Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto de uma planta de tanques acoplados para estudo de sistemas de controle e automação. Além da estrutura mecânica, construída com alumínio estrutural, e dos tanques, construídos com acrílico transparente, também foi projetada e fabricada uma placa de circuito impresso para acionamento das bombas, além de um sistema eletrônico para medição do nível de líquido nos tanques.

Resultados experimentais obtidos utilizando uma placa de aquisição de dados USB-6009 juntamente com o *software* Labview® mostraram que tanto o sistema de medição de nível quanto o sistema de acionamento das bombas apresentaram um funcionamento satisfatório e de acordo com aquilo que foi projetado. No caso do sistema de medição de nível, melhorias podem ser efetuadas, uma vez que uma quantidade significativa de ruído foi medida. Por fim, foi realizada a estimação da função de transferência de um dos tanques para projeto de um controlador para verificação do funcionamento da planta em malha fechada. De forma geral, pode-se concluir que o sistema funcionou de acordo com o desejado, demonstrando que a planta de tanques acoplados pode ser utilizada no estudo de sistemas de controle e automação.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um sistema mais robusto para medição em tempo real do nível de líquido nos tanques, além do desenvolvimento de um sistema para medição da vazão de entradas e saídas dos tanques. Adicionalmente, sugere-se também que sejam adicionadas válvulas com controle eletrônico de abertura.

Referências

ALIEXPRESS. Ultrasonic sensor US-016. 2023a. Disponível em <<https://www.aliexpress.com>>

ALIEXPRESS. 12V Brushless Pump. 2023b. Disponível em <<https://www.aliexpress.com>>

ASTRÖM, Karl. J; HAGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. PID Controllers, 2nd Edition. Instrument Society of America. 1995.

ALPI, Lucas Bollo. Desenvolvimento de uma Planta Didática para o Controle de Nível de Tanques Acoplados. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS. 2016.

BAZANELA, Alexandre Sanfellice; DA SILVEIRA JUNIOR, João Manoel Gomes. Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto. 1. ed. Editora UFRGS, 2005. ISBN: 8570258496.

DUARTE, Mateus Anderson Barreto. Detecção e Isolamento de Falhas em um Sistema de Tanques Acoplados Utilizando Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado. UFRN. 2020.

JUNIOR, José Alberto Naves Cocota. Modelagem e Controle de Nível de um Sistema de Quatro Tanques. Dissertação de Mestrado, UFRJ. 2009.

DA FONSECA, Daniel Guerra Vale. Modelagem e Controle Adaptativo de uma Planta Didática de Nível com Instrumentação Industrial. Dissertação de Mestrado. UFRN. 2012.

LAUBWALD, E. "Coupled Tanks Systems 1". Disponível: <http://control-systemsprinciples.co.uk/whitepapers/coupled-tanks-systems.pdf>.

MENDES, Flavio Vidigal. Modelagem e Controle de Nível de um Tanque de Área Variável. Trabalho de Conclusão de Curso. UFOP. 2017.

PINTO, Igor Ferreira. Controle de Nível em um Sistema de Tanques Usando Visão Computacional. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRJ. 2016.

STMICROELECTRONICS. Folha de dados do L272. 2003. Disponível em <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/l272.pdf>>.