

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE NÍVEL DIDÁTICO CONSTITUÍDO POR TANQUES DE SEÇÕES TRANSVERSAIS VARIÁVEIS PARA ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE

José Henrique Azevedo Nunes (UFPI), E-mail: josehan421@gmail.com

Luís Miguel Feitosa Soares da Costa (UFPI), E-mail: luismiguelsoares2009@gmail.com

José Medeiros de Araújo Júnior (UFPI), E-mail: jmjunior@ufpi.edu.br

Leandro Luttiane da Silva Linhares (IFRN), E-mail: luttiane.leandro@ifrn.edu.br

Lucas Lemos Carvalho Batista (UFPI), E-mail: archerfh@ufpi.edu.br

Resumo: Os sistemas de nível são encontrados em vários tipos de indústria em que se faz necessário o armazenamento de líquidos, como nas indústrias petroquímicas, alimentícias, farmacêuticas, etc. Esse tipo de processo também se destaca por ser amplamente utilizado academicamente, no estudo de técnicas de controle, pois são sistemas que são facilmente reproduzidos de maneira prática com menores dimensões, permitindo a execução de experimentos didáticos e de pesquisa. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo mostrar o desenvolvimento de um sistema de nível artesanal, de baixo custo, e que possui dois tanques com características atípicas, apresentando diferentes perfis de seções transversais. Tais perfis ocasionam não linearidades incomuns quando comparado a outros processos de nível e, também, permitem estudos de técnicas de controle mais sofisticadas. Por fim, como forma de consolidar o projeto do sistema supracitado e confirmar a sua aplicabilidade para o estudo de técnicas de controle, foram testados dois tipos de controladores: um tradicional PID e um controlador PID fuzzy, o qual é uma técnica não linear baseada na lógica nebulosa. Os resultados obtidos mostraram que o controlador PID fuzzy apresentou sobressinal máximo 41.2% menor para o tanque 01 e 42.88% menor para o tanque 02 em relação aos valores obtidos pelo PID. Em contrapartida, os tempos de assentamento foram 10% e 9.1% maiores que os apresentados pelo PID nos dois tanques, respectivamente.

Palavras-chave: Controle PID, Lógica Fuzzy, Sistema de Nível, Ziegler-Nichols.

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL LEVEL SYSTEM CONSISTING OF TANKS WITH VARIABLE CROSS-SECTIONS FOR THE STUDY OF CONTROL TECHNIQUES

Abstract: Level systems are found in various types of industries where liquid storage is required, such as petrochemical, food, and pharmaceutical industries. This type of process also stands out for its widespread academic use in the study of control techniques, as these systems can be easily reproduced in a practical way on a smaller scale, allowing for the execution of educational and research experiments. In light of this, the present work aims to present the development of a low-cost liquid-level system featuring non-standard two tanks with distinct cross-sectional profiles. These profiles result in unusual nonlinearities when compared to other level processes and also enable the study of more advanced control techniques. Finally, to consolidate the design of the aforementioned system and confirm its applicability for the study of control techniques, two types of controllers were tested: a traditional PID controller and a fuzzy PID controller, which is a nonlinear technique based on fuzzy logic. The results obtained showed that the fuzzy PID controller achieved a maximum overshoot that was 41.2% lower for Tank 01 and 42.88% lower for Tank 02 compared to the values obtained with the PID controller. In contrast, the settling times were 10% and 9.1% higher than those obtained with the PID controller for the two tanks, respectively.

Keywords: PID Control, Fuzzy Logic, Level System, Ziegler-Nichols

1. Introdução

Os sistemas de nível são essenciais em diversas indústrias que necessitam do armazenamento e manuseio de líquidos. Esses sistemas são amplamente utilizados em setores como o químico, petroquímico, alimentício, farmacêutico, entre outros, garantindo a eficiência e segurança dos processos produtivos. Pela sua ampla presença no

meio industrial, sistemas de nível didáticos são tradicionalmente utilizados em cursos técnicos e de engenharia que abordam teorias de controle e automação. No entanto, as versões comerciais desses sistemas geralmente são caras, tornando-se inviáveis de serem adquiridas por boa parte das instituições de ensino técnico e superior. Como forma de contornar esta situação, uma possibilidade atrativa consiste em se desenvolver sistemas de nível artesanais, simples de se fazer manutenção e de baixo custo. Esses sistemas, se bem projetados, tornam-se ferramentas suficientemente adequadas para o aprofundamento de ensino e pesquisa de técnicas de controle e automação, tanto em nível de graduação como de pós-graduação.

Um dos principais parâmetros desses sistemas é o valor do nível do líquido, o qual deve ser mantido em um patamar desejado, de tal modo que, com uma melhor qualidade no controle do nível, se tenha uma eficiência maior do processo (SABRI; AL-MSHAT, 2015). Nesse sentido, conforme mostrado em Campos (2017), estes sistemas são relevantes no desenvolvimento e estudo de técnicas de controle, uma vez que auxiliam no aprimoramento dos estudantes para o mercado de trabalho.

Em termos de pesquisas, percebe-se que a maioria dos sistemas de nível didáticos utilizados para aplicação e estudo de técnicas de controle possui tanques com formatos cilíndricos ou retangulares. Como exemplo, tem-se o trabalho de Bhandare *et al.* (2024), que faz uso de um sistema de nível com tanques acoplados, com formatos retangulares, controlado por um CLP (Controlador Lógico Programável). Da mesma forma, Pillay (2021) fez o projeto de um sistema didático de controle de nível com dois tanques em cascata, com formatos cilíndricos, para ser utilizado com o objetivo de demonstrar conceitos fundamentais de engenharia de controle. Como último exemplo, temos o trabalho de Hussain *et al.* (2018), onde os autores propõem o controle de nível em três tanques cilíndricos e interligados a partir do controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Uma das técnicas de controle que pode ser implementada para melhorar o desempenho dos sistemas de nível é a dos controladores PID. Esses algoritmos são considerados os mais utilizados na indústria, sendo que esse sucesso pode ser explicado por causa de sua simplicidade, grande estabilidade, robustez, funcionamento confiável e regulação conveniente (ZHOU, 2022). Por este motivo, os controladores PID são tomados como modelo para ensinar fundamentos de controle em muitas universidades e faculdades técnicas (HÄGGLUND; GUZMÁN, 2024).

Na literatura, são encontrados diversos trabalhos que utilizam o controlador PID nos mais diversos tipos de aplicações, como em Leal e Moura (2023) e Batista (2024). Entretanto, apesar das vantagens já citadas, o controlador PID convencional pode não ser adequado para sistemas complexos e com não linearidades. Para lidar com estas características, cientistas e pesquisadores utilizam, por exemplo, técnicas de controle baseadas em lógica fuzzy, a qual é capaz de converter a experiência humana em uma forma compreensível para computadores, como mostrado em Simões e Shaw (2007). Os controladores baseados em lógica fuzzy são considerados uma boa metodologia, pois produzem resultados superiores quando comparados com algoritmos convencionais de controle (KUMAR; NAKRA; MITTAL, 2011), e são alvo de várias pesquisas na área de controle, por exemplo, Jin *et al.* (2020) e Mendonça *et al.* (2022).

Diante do exposto, este trabalho propõe a construção artesanal de um sistema (planta) de nível, a partir do uso de materiais e componentes de baixo custo, destinado ao estudo e implementação de diferentes estratégias de controle. O sistema é composto por dois tanques transparentes que facilitam a visualização da variável de interesse (nível), além

de possuírem formatos pouco convencionais, apresentando diferentes perfis de seções transversais, a fim de que o processo controlado disponha de maior complexidade. Como ponto de partida para os experimentos de controle, com o objetivo de consolidar o projeto da planta, foi utilizado o controlador PID, pelo fato de que ele é o mais utilizado na indústria e o mais estudado em termos acadêmicos. Em seguida, foi implementado um controlador PID fuzzy, cuja escolha se deu pelo fato de que ele é uma técnica mais sofisticada, que apresenta a característica de ser não linear, sendo mais adequada para lidar com processos complexos.

2. Fundamentação teórica

Nesta seção são apresentados alguns aspectos gerais e importantes sobre a planta de nível didática, e é mostrada a base teórica dos controladores utilizados no presente trabalho.

2.1. Sistemas de nível

A constante industrialização do mundo trouxe consigo uma crescente demanda pela utilização de sistemas de nível. Segundo Maya e Leonardi (2014), observa-se que esses processos, geralmente, envolvem fluxos e acúmulos de líquidos em tanques, os quais devem ter seus níveis controlados. Assim, para o melhor desempenho desses sistemas, é necessária a implementação de diferentes controladores, sejam eles na forma manual ou de forma automatizada.

Em termos didáticos, é evidente a importância do estudo de técnicas de controle aplicadas nesse tipo de processo, uma vez que grande parte da indústria utiliza controladores em seus sistemas de nível. Sendo assim, o presente trabalho apresenta o projeto de uma planta didática de nível, a qual pode ser utilizada para o estudo e realização de experimentos na área de controle. Esta planta tem o diferencial de ser fabricada artesanalmente e com elementos de baixo custo (apresentados na seção 3), bem como possuir tanques com características pouco comuns, tais como diferentes perfis de seções transversais, que possibilitam diferentes não linearidades quando comparada a outros processos de nível, tornando-a apta a aplicação de diferentes técnicas de controle, desde as mais clássicas até mais sofisticadas, em atividades de ensino e de pesquisa.

A Figura 1 apresenta uma visão panorâmica dos tanques que compõem o sistema de nível desenvolvido e sua disposição. As diferentes geometrias dos tanques introduzem não linearidades ao sistema, pois a área transversal disponível para o armazenamento do líquido varia com a altura. Dessa forma, uma mesma variação de volume pode produzir diferentes variações no nível, dependendo da região do tanque. Em áreas de menor seção transversal, uma determinada vazão de entrada provoca uma elevação mais acentuada do nível, enquanto, em regiões de maior seção transversal, a mesma vazão resulta em uma variação de nível relativamente menor.

Para o projeto deste sistema, foram necessários diferentes componentes, tais como três tanques, sendo um reservatório (vermelho) e dois para realização do controle do nível, azul escuro (T01) e azul claro (T02), conforme pode ser visto na Figura 1. Além desses tanques, foram utilizados também um microcontrolador, uma bomba para a movimentação do fluido, um driver de acionamento para a bomba, uma fonte de alimentação e um sensor de pressão para a medição do nível.

Este sistema tem como objetivo permitir a aplicação prática de controladores implementados por estudantes e pesquisadores, de modo a facilitar a compreensão do funcionamento de diferentes leis e/ou algoritmos de controle, como por exemplo, o controlador PID. Maiores detalhes técnicos do projeto deste sistema serão apresentados na seção 3.1.

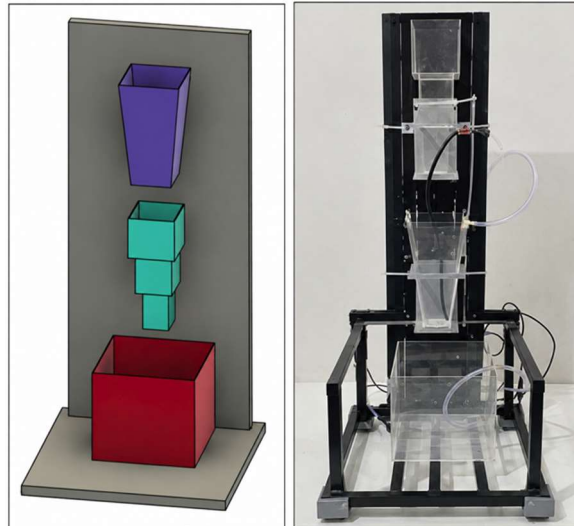


Figura 1 – Esquema da estrutura física do sistema didático de nível proposto (Fonte: Elaborada pelos autores).

2.2. Controlador PID

Para consolidação do projeto da planta e a confirmação da sua aplicabilidade em estudos de técnicas de controle, foi utilizado inicialmente o controlador PID. Este controlador é composto pela combinação de três termos - proporcional, integral e derivativo – que, em conjunto, atuam no transitório e no regime permanente da resposta dos sistemas (MESQUITA; CORRÊA; 2016). A lei de controle gerada por esse controlador, em sua forma discreta, é expressa pela Equação 1, em que $u_c(kT_s)$ é calculado a partir do sinal de erro de referência, $e(kT_s)$, K_p é o ganho proporcional, T_i é a constante de tempo integrativa, T_d é a constante de tempo derivativa, T_s é o período de amostragem e kT_s corresponde a um determinado instante de tempo, o qual é múltiplo do período de amostragem (HÄGGLUND, 2023).

$$u_c(kT_s) = u_c(kT_s - T_s) + g_1 e(kT_s) + g_2 e(kT_s - T_s) + g_3 e(kT_s - 2T_s) \quad (1)$$

Sendo que:

$$g_1 = K_p \cdot \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s}\right) \quad (2)$$

$$g_2 = K_p \cdot \left(-1 - \frac{2T_d}{T_s}\right) \quad (3)$$

$$g_3 = K_p \cdot \left(\frac{T_d}{T_s}\right) \quad (4)$$

Para aplicação do controlador PID no referido sistema de nível, o mesmo deve ter seus parâmetros, K_p , T_i e T_d determinados. Para isto, deve-se utilizar técnicas de sintonia, dentre as quais se destacam o método da resposta ao degrau de Ziegler-Nichols (BORASE *et al*, 2020). Essa regra é muito utilizada para sintonizar controladores PID em que as dinâmicas da planta não são precisamente conhecidas (OGATA, 2010), e é a técnica de sintonia que será aplicada no presente trabalho, devido à sua simplicidade e às características da resposta da planta de nível projetada.

2.3. Controladores fuzzy

Em várias situações reais os processos a serem controlados possuem acentuada complexidade e não linearidades, de modo que é necessário recorrer a técnicas de controle

mais sofisticadas. Para contornar isso, uma boa alternativa é o uso de algoritmos de controle baseados na lógica fuzzy, pois são estratégias não lineares, baseadas na experiência e conhecimentos de especialistas no sistema a ser controlado (NGUYEN; KREINOVICH; SIRISAENG TAKSIN, 1996).

Os controladores fuzzy possuem três etapas essenciais de funcionamento: fuzzificação, inferência e defuzzificação (BATISTA, 2022). A etapa de fuzzificação consiste na utilização de funções de pertinência para converter os sinais de entrada em um intervalo $[0,1]$, que pode estar associado a rótulos linguísticos. Na etapa de inferência, implicações fuzzy são utilizadas para simular a tomada de decisão humana. Essas implicações, ou regras fuzzy, relacionam os antecedentes - conjunto de condições de entrada - para gerar os consequentes - ações de controle - mediante expressões do tipo “Se <antecedente> Então <consequente>” (Simões; Shaw, 2007). Por fim, a etapa de defuzzificação é a operação que transforma o conjunto de ações de controle em um único valor discreto (MACHADO; MATIAS, 2020). O método de defuzzificação empregado neste trabalho e mais frequentemente utilizado, por ser computacionalmente eficiente, é o centro de gravidade (EKER; TORUN, 2006).

Tendo em vista essas três etapas, suponha um controlador fuzzy que possua como entradas o erro, e , e a variação do erro, $\dot{e}$, e uma única saída, u . As funções de pertinência para e e $\dot{e}$ são denotadas como A_i ($i \in I = [-m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m]$) e B_j ($j \in J = [-n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n]$), respectivamente. Dessa maneira, as regras fuzzy são expressas na forma “Se e é A_i e $\dot{e}$ é B_j , Então u é u_{ij} ”, em que o termo u_{ij} é um valor discreto em vez de um subconjunto fuzzy. A partir dessas considerações, Qiao e Mizumoto (1996) mostram que, ao utilizar o método de inferência produto-soma, o valor do grau de ativação da regra fuzzy, f_{ij} , é calculado pela Equação 5, e que, aplicando o método centro de gravidade para a defuzzificação, a saída do controlador é expressa pela Equação 6.

$$f_{ij} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \quad (5)$$

$$u = \frac{\sum_{i,j} f_{ij} \cdot u_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (6)$$

Na seção 3.3 é mostrado em detalhes como o controlador fuzzy utilizado neste trabalho foi implementado.

3. Metodologia

Nesta seção são mostradas, de forma mais detalhada, a construção da planta de nível didática, a sintonia dos parâmetros do controlador PID e a implementação do controlador PID fuzzy, cuja versão utilizada neste trabalho é proposta por Qiao e Mizumoto (1996).

3.1. Projeto de sistema de nível

A planta construída, como já citado, contém dois tanques, de diferentes formatos, para controle da altura de líquido. O primeiro tanque, T01, possui formato semelhante a um tronco de pirâmide, já o segundo, T02, é composto por três blocos retangulares de diferentes seções transversais. As Tabelas 1 e 2 contêm, respectivamente, as medidas dos tanques T01 e de T02.

Tabela 1 – Medidas do tanque T01

Altura	Largura base menor	Profundidade base menor	Largura base maior	Profundidade base maior
24cm	6 cm	6 cm	12 cm	12 cm

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 2 – Medidas do tanque T02

	Altura	Largura	Profundidade
1º Nível	9 cm	5 cm	5 cm
2º Nível	9 cm	7 cm	7 cm
3º Nível	9 cm	9 cm	9 cm

Fonte: dados da pesquisa.

Para medir indiretamente a altura dos tanques é utilizado o sensor de pressão MPS20N0040D-D, mostrado na Figura 2(a), o qual trabalha com pressões diferenciais no intervalo de 0 a 40 kPa, e um conversor analógico-digital HX710B, que possui 24 bits e frequência de amostragem de até 40 amostras por segundo. Vale destacar que, antes da utilização do referido sensor, o mesmo passou por um processo de calibração, a qual foi realizada relacionando valores de pressão diferencial medidos pelo sensor com as respectivas alturas da coluna de água previamente estabelecidas como valores de referência. A relação entre pressão diferencial e altura foi determinada com base no Teorema de Stevin, expresso na Equação 7 (Doca; Biscuola; Bôas, 2012):

$$\Delta P = \rho gh \quad (7)$$

em que ΔP é a diferença de pressão entre o ponto de medição e a atmosfera, ρ é a densidade do líquido, g é a aceleração da gravidade e h é a altura da coluna de líquido. Considerando $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$, $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ (dado que o líquido utilizado nos experimentos é a água), e que as alturas dos tanques T01 e T02 são 24 cm e 27 cm, respectivamente, tem-se que as pressões diferenciais máximas são de aproximadamente 2,354 kPa e 2,649 kPa. Como o sensor utilizado apresenta faixa nominal de 0 a 40 kPa, a faixa de pressão efetivamente utilizada corresponde a aproximadamente 5,89% da faixa nominal do sensor para T01 e 6,62% para T02.

Assim, em termos de resolução, como o conversor analógico-digital do sensor possui valor nominal de 24 bits, a faixa de operação correspondente às alturas máximas dos tanques compreende aproximadamente 987.339 diferentes níveis para T01 e 1.111.071 níveis para T02. Esses valores correspondem a aproximadamente 19,9 e 20,1 bits, respectivamente, da resolução nominal do conversor, ou seja, apesar de a faixa nominal do sensor ser significativamente superior à pressão efetivamente utilizada, a faixa de operação dos experimentos ainda proporciona uma elevada resolução, equivalente a aproximadamente 20 bits da resolução nominal do ADC.

No sistema de nível, estes sensores se comunicam com o software de controle através da plataforma Arduino, a qual também é utilizada para enviar o sinal de comando do sistema de controle, na forma de PWM, para o hardware de acionamento do atuador. Neste trabalho, o modelo de Arduino escolhido foi o Uno R3, o qual se caracteriza por possuir saídas digitais que fornecem no máximo 5 V e 40 mA, o que torna necessária uma fonte auxiliar para alimentação da bomba escolhida para o projeto. Ressalta-se que esta corrente elétrica de 40 mA não reflete o valor de operação do sistema de nível em regime contínuo.

Quanto ao atuador, foi adotada a minibomba de água RS-385, mostrada na Figura 2(b), que tem como função transferir água do reservatório para um dos dois tanques (T01 ou T02), onde o nível é controlado. No entanto, dado que a sua tensão nominal é de 12 V e a corrente é de 600 mA, torna-se necessário o uso de uma fonte dedicada para o seu funcionamento.



(b)

Figura 2 – (a) Módulo sensor de pressão para medição do nível e (b) Minibomba para transferência de água entre o reservatório e os tanques (Fonte: arquivo dos autores).

Já o driver de acionamento é o hardware responsável pela recepção e transmissão do sinal PWM do Arduino para o circuito do atuador. Desse modo, o Arduino, que possui uma saída de tensão de 5 V, pode realizar o controle do **acionamento** da bomba de 12 V. Além disso, o circuito driver de acionamento conta com componentes como diodos, resistores, transistores e um optoacoplador, como pode ser visto na Figura 3.

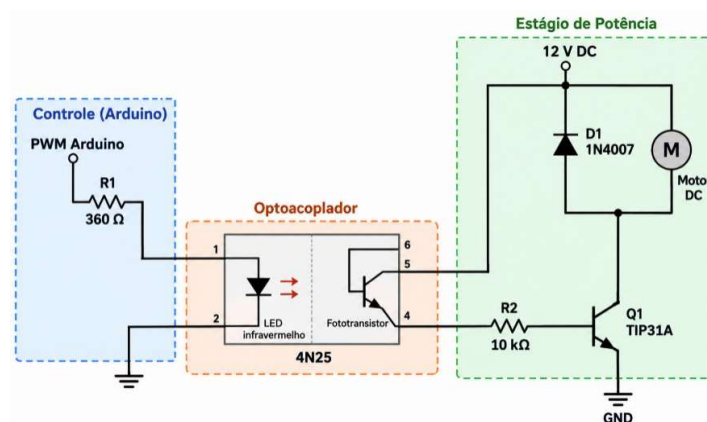


Figura 3 – Esquemático do Driver de acionamento (Fonte: arquivo dos autores)

O modelo de fonte escolhido foi do tipo colmeia, modelo S60-12, o qual possui 60 W de potência, com tensão de entrada de 127 V ou 220 V e tensão de saída de 12 V. A sua corrente é de 5 A, sendo, assim, capaz de alimentar o sistema de bombeamento, e também possuindo margem para futuras modificações no sistema de nível.

Cada um dos componentes descritos nesta seção desempenha uma importante função no contexto do sistema de controle de nível em malha fechada, cujo funcionamento pode ser melhor compreendido a partir do diagrama presente na Figura 4.

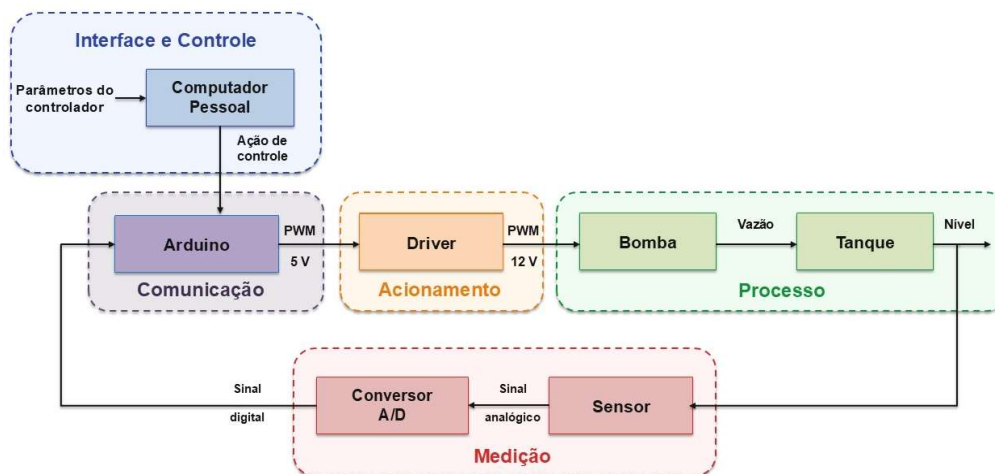


Figura 4 – Esquemático de funcionamento do sistema de nível (Fonte: arquivo dos autores)

Nesse sentido, o Arduino tem a função de receber um sinal do módulo sensor de pressão e o repassa ao computador pessoal (PC) para que este, que possui o algoritmo do controlador, calcule o sinal de controle, que é transferido de volta ao Arduino. Com base neste sinal de controle, o Arduino gera um sinal de PWM de 5 V, que é aplicado na entrada do driver de acionamento da bomba, o qual possui como saída um sinal de PWM de 12 V capaz de controlar o atuador, que por sua vez realiza a transferência de água do reservatório para um dos tanques. Esse processo se repete a cada período de amostragem e dessa maneira é feito o controle do nível de líquido.

Por fim, dada a apresentação e explicação dos componentes utilizados no projeto do sistema de nível, a Tabela 3 apresenta os valores dos mesmos, a fim de se mostrar o custo aproximado que foi necessário para a construção desse sistema.

Tabela 3 – Valores dos componentes utilizados no sistema de nível

Arduino Uno	R\$30,00
Fonte colmeia	R\$25,00
Acrílico	R\$200,00
Sensor de Pressão	R\$15,00
Bomba de água e Mangueiras	R\$40,00
Placa de circuito, componentes e Jumper	R\$60,00
Rolo de filamento PLA 1Kg	R\$75,00
Estrutura Metálica, elementos de fixação e acessórios	R\$ 76,00
Total	R\$ 521,00

Fonte: dados da pesquisa

Deve-se ressaltar que os valores apresentados na Tabela 3 são apenas estimativas, podendo sofrer alterações devido a fatores como oscilações cambiais, inflação, etc. De qualquer maneira, fica claro que o sistema de nível desenvolvido é de baixo custo, considerando-se que se trata de um equipamento didático com possibilidades de uso tanto em ensino como em pesquisa.

3.2. Projeto dos controladores PID

O sistema de nível proposto servirá de base, no presente trabalho, para a aplicação dos controladores PID e PID fuzzy, de modo individual, em cada um dos tanques que compõem a planta. É importante destacar que, para implementação dos controladores é necessária a determinação do período de amostragem, o qual, no presente trabalho, foi norteadada pelo critério $\frac{T}{15} \leq T_s \leq \frac{T}{5}$. Por este critério, o período de amostragem está relacionado diretamente com a constante de tempo. Para identificá-la, foram obtidas as curvas de resposta ao degrau aplicando-se entradas com amplitude de 55% e 60% de PWM na bomba de água responsável pelo abastecimento dos tanques T01 e T02, respectivamente. A partir desses ensaios, os valores encontrados para as constantes de tempo foram de 34,9 s para o tanque T01 e 26,5 s para o T02. Consequentemente, os períodos de amostragem para os tanques T01 e T02, respectivamente, foram: $T_s = 5$ s e $T_s = 3,5$ s.

Em termos dos controladores PID aplicados em cada um dos tanques, foi feita a sintonia deles, inicialmente, por meio do primeiro método de Ziegler-Nichols, e depois, realizada uma resintonia de forma manual. Para isso, foram escolhidas curvas de resposta ao degrau obtidas a partir de entradas com valores de 55% e 60% de PWM nos tanques T01

e T02, respectivamente. Os valores de L (tempo morto), T (constante de tempo) e K (ganho estático) obtidos a partir da aplicação do referido método e os parâmetros dos controladores PID obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros obtidos a partir da regra de sintonia Ziegler-Nichols

Tanque	L	T	K	Kp	Ti	Td
T01	1,5s	34,9s	0,2	139,6	3	0,75
T02	1,6s	26,5s	0,276	71,97	3,2	0,8

Fonte: dados da pesquisa

Esses ganhos do controlador PID foram obtidos a partir das seguintes equações: $Kp = 1.2 \frac{T}{KL}$; $Ti = 2 \cdot L$; $Td = 0.5 \cdot L$. Esse controlador, conforme mencionado anteriormente, foi adotado não só por ser o mais usado na indústria, mas também devido à sua simplicidade e célere implementação.

3.3. Projeto do controlador PID fuzzy

Como segunda técnica de controle a ser aplicada na planta de nível, optou-se pelo controlador fuzzy, cuja versão escolhida foi o PID fuzzy, proposto por Qiao e Mizumoto (1996). Este controlador se caracteriza por possuir como entradas o erro (e), o qual é a diferença entre a saída desejada e a saída atual do processo controlado, e a variação do erro ($\dot{e}$), e uma saída (u_c), a qual corresponderá à entrada do sistema controlado. Além disso, este tipo de controlador se caracteriza por possuir, em sua estrutura, dois fatores de escala (K_e e K_d) e dois ganhos (α e β), conforme mostra a Figura 5(a).

Na aplicação deste controlador, a fuzzificação se deu com a utilização, para cada entrada, de cinco funções de pertinência triangulares, rotuladas por NG (Negativo Grande), NP (Negativo Pequeno), ZE (Zero), PP (Positivo Pequeno) e PG (Positivo Grande), conforme a Figura 5(b). A partir destas funções, a cada instante de amostragem, os valores das entradas e e $\dot{e}$ são convertidos para valores fuzzy, ou seja, são gerados os vetores $\{\mu_{e_{NG}}, \mu_{e_{NP}}, \mu_{e_{ZE}}, \mu_{e_{PP}}, \mu_{e_{PG}}\}$ e $\{\mu_{\dot{e}_{NG}}, \mu_{\dot{e}_{NP}}, \mu_{\dot{e}_{ZE}}, \mu_{\dot{e}_{PP}}, \mu_{\dot{e}_{PG}}\}$, respectivamente, em que cada elemento presente no vetor corresponde a um grau de pertinência a uma determinada função de pertinência.

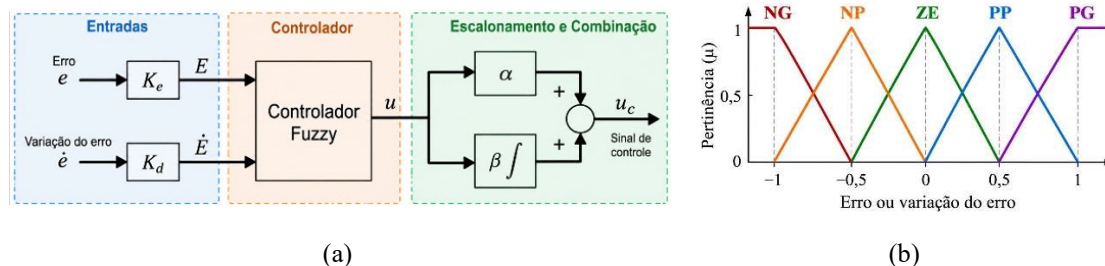


Figura 5 – (a) Estrutura do controlador PID fuzzy e (b) Funções de pertinência utilizadas para as entradas erro e variação do erro (Fonte: Qiao e Mizumoto, 1996)

Para a etapa da inferência, foi utilizada a base de regras apresentada na Tabela 5 (QIAO; MIZUMOTO, 1996). Essa base de regras é utilizada para relacionar as variáveis de entrada (antecedentes) com valores adequados de controle (consequentes), a cada período de amostragem. Em seguida, um único valor discreto de ação de controle é gerado pelo controlador PID fuzzy, sendo que este valor é calculado pelo método de defuzzificação

centro de gravidade, que relaciona os antecedentes e consequentes mencionados por meio da Equação 6.

Tabela 5 – Base de regras do controlador PID fuzzy

$e/\dot{e}$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	-1	-0,7	-0,5	-0,3	0
NP	-0,7	-0,4	-0,2	0	0,3
ZE	-0,5	-0,2	0	0,2	0,5
PP	-0,3	0	0,2	0,4	0,7
PG	0	0,3	0,5	0,7	1

Fonte: Qiao e Mizumoto (1996)

Por fim, o sinal de controle, $u_c(kT_s)$, que chega ao atuador ainda depende dos ganhos α e β , e é dado pela Equação 8. Os parâmetros do controlador PID fuzzy, α , β , K_d e K_e , foram sintonizados manualmente por tentativa e erro, de modo a se chegar a respostas que apresentassem o menor sobressinal máximo possível, baixo tempo de assentamento, sinal de controle suave e com o mínimo de saturação. Os valores encontrados e utilizados para ambos os tanques são: $\alpha = 20$; $\beta = 90$; $K_e = 0,3$; $K_d = 0,5$.

$$u_c(kT_s) = \alpha \cdot u(kT_s) + \beta \cdot \sum u(kT_s) \quad (8)$$

É importante destacar que Qiao e Mizumoto (1996) propõem a utilização das funções de pertinência e da base de regras apresentadas nesta seção para qualquer sistema que se deseje controlar. Dessa maneira, o foco está na sintonia dos parâmetros α , β , K_d e K_e mostrados na Figura 5(a).

3.4. Índices de desempenho

Para realização de uma análise comparativa entre os dois controladores, foi utilizado um conjunto de índices de desempenho, essenciais para avaliação e consolidação dos resultados. Esses índices foram escolhidos com o objetivo de se avaliar, de maneira abrangente, os resultados obtidos a partir das estratégias de controle. Foram escolhidos os seguintes índices: tempo de assentamento (tempo necessário para que a curva da resposta alcance valores dentro de uma faixa de 2% em torno do valor de regime); sobressinal máximo, Equação 9; integral do erro absoluto (IAE), Equação 10; integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto (ITAE), Equação 11; variância do sinal de saída, Equação 12; e variância da ação de controle, Equação 13.

$$Mp = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \quad (9)$$

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e(k)| \quad (10)$$

$$ITAE = \sum_{k=1}^N k|e(k)| \quad (11)$$

$$var_y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \underline{y})^2 \quad (12)$$

$$var_u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u(k) - \underline{u})^2 \quad (13)$$

Nessas equações, $y(t_p)$ corresponde ao valor da saída no instante de pico; $y(\infty)$ corresponde ao valor da saída em regime permanente; $e(k)$ representa o erro de referência; $y(k)$, a saída do sistema, $u(k)$ corresponde a variável de controle; $\underline{y}$, a média das N amostras de $y(k)$; e $\underline{u}$, a média das N amostras $u(k)$.

4. Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados da aplicação dos controladores PID e PID fuzzy nos tanques T01 e T02, de maneira individual, além de ser feita uma análise comparativa entre os controladores a partir de índices de desempenho e das curvas de resposta e de sinal de controle. Os resultados apresentados para cada tanque foram obtidos a partir de um único ensaio experimental com cada tipo de controlador utilizado.

4.1. Controle do tanque T01

Inicialmente, foi realizado o controle de nível do tanque T01, utilizando os controladores PID e PID fuzzy, sendo que, para este último, os ganhos são os apresentados na seção 3.3, e para o PID, os ganhos utilizados foram valores ressintonizados a partir dos presentes na Tabela 4. Vale destacar que essa ressintonia foi necessária pelo fato de que, ao se utilizar os ganhos presentes na Tabela 4, a resposta do sistema mostrou sobressinal demasiadamente grande, o que é característico do método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010). A fim de solucionar este problema, foi feita uma sintonia fina, de forma manual, reduzindo-se o valor de K_p até que a resposta atingisse resultados aceitáveis, de modo que os ganhos finais do controlador PID para o tanque T01 foram: $K_p = 15$; $T_i = 3$; $T_d = 0,75$. Após a aplicação dos controladores, obteve-se como respostas as curvas presentes na Figura 6, e os sinais de controle obtidos são apresentados na Figura 7.

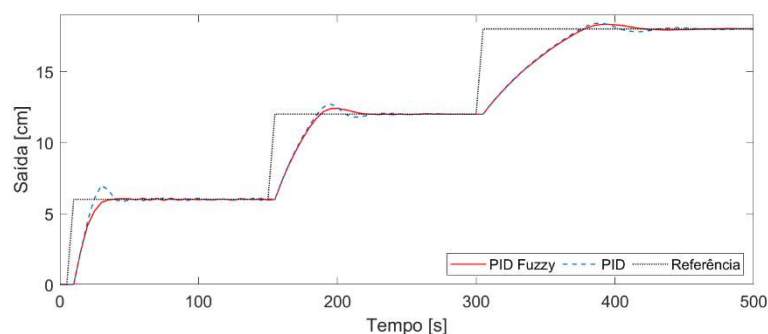


Figura 6 – Resposta do tanque T01 com os controladores PID e PID fuzzy (Fonte: arquivo dos autores)

A partir das Figuras 6 e 7, pode-se perceber que o controlador PID fuzzy obteve o melhor desempenho, com menor sobressinal máximo em diferentes valores de set-points. Além disso, pode ser notado que este controlador consegue produzir uma ação de controle mais

suave, o que é importante para a vida útil do atuador. Quanto a esta ação, em ambos os controladores, o seu valor satura em 100% de PWM somente após a ocorrência de variação do valor de referência. Neste sentido, para mitigar o acúmulo da ação integrativa, foram implementados limitadores condicionais que restringem a variável manipulada estritamente ao intervalo de 0 a 100% de PWM.

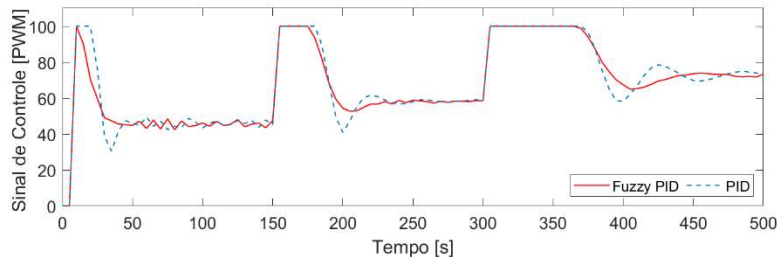


Figura 7 – Ação de controle do PID e PID fuzzy no tanque T01 (Fonte: arquivo dos autores)

A superioridade apresentada pelo PID fuzzy é decorrente desse controlador ser não linear, conseguindo, assim, lidar de maneira mais eficaz com as não linearidades do processo de nível, em detrimento do controlador PID clássico, que é linear. Por fim, para completar a análise dos resultados, a Tabela 6 contém índices de desempenho que aprofundam a comparação entre os dois controladores.

Tabela 6 – Índices de desempenho para controladores aplicados em T01

Índice de desempenho	PID	PID fuzzy
Sobressinal Máximo do 2º patamar (%)	5,83	3,33
Tempo de assentamento do 2º patamar (s)	50	55
IAE do 2º patamar ($cm \cdot s$)	21,78	21,65
ITAE 2º patamar ($cm \cdot s^2$)	283	257
Variância – sinal de saída (2º patamar)	2,4253	2,4059
Variância – ação de controle (2º patamar)	339,8939	295,0274

Fonte: dados da pesquisa

Além do sobressinal máximo, já mencionado, os resultados presentes na tabela mostram que o controlador PID fuzzy apresentou, em relação ao PID, valores ligeiramente melhores para o índice IAE (integral absoluta do erro) e para a variância do sinal de saída. Para o índice ITAE (integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto) e a variância da ação de controle, a melhoria foi mais significativa. Portanto, o controlador PID fuzzy, no geral, mostrou melhor desempenho no controle do tanque T01, apresentando resultado inferior somente quanto ao tempo de assentamento.

4.2. Controle do tanque T02

Em seguida, foram aplicados os controladores PID e PID fuzzy no controle do nível do tanque T02. Os ganhos do controlador PID fuzzy são os mesmos apresentados na seção 3.3, e os do PID, foram obtidos, também, a partir da ressintonia dos parâmetros presentes na Tabela 4. Esta ressintonia se deu pelo mesmo motivo e de maneira semelhante a que foi realizada para T01, sendo obtidos os seguintes ganhos: $K_p = 16$; $T_i = 3,2$; $T_d = 0,8$. A partir da aplicação dos controladores, foram obtidas as respostas presentes nas Figuras 8 e 9, as quais contêm as curvas de resposta do tanque T02 devido à aplicação de cada controlador, e os respectivos sinais de controle.

Analisando as referidas figuras, inferimos, de forma semelhante ao feito para T01, que o controlador PID fuzzy obteve o melhor desempenho, tendo em vista novamente a suave ação de controle gerada e o menor sobressinal máximo, conforme mostrado na Tabela 7.

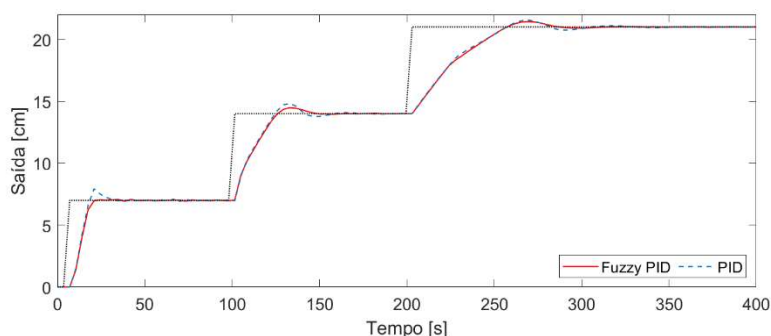


Figura 8 – Resposta do tanque T02 com os controladores PID e PID fuzzy (Fonte: arquivo dos autores)

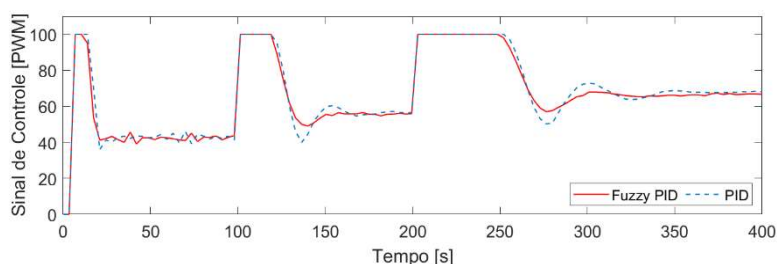


Figura 9 – Ação de controle do PID e PID fuzzy no tanque T02 (Fonte: arquivo dos autores)

Da mesma forma que no tanque T01, deve-se destacar que a ação de controle apresentada pelos dois controladores satura em 100% de PWM apenas quando há mudanças no sinal de referência. Para evitar valores elevados na ação integrativa, limitadores condicionais restringem a variável manipulada no intervalo de 0 a 100% de PWM.

Tabela 7 – Índices de desempenho para controladores aplicados em T02

Índice de desempenho	PID	PID fuzzy
Sobressinal Máximo do 2º patamar (%)	5,71	3,36
Tempo de assentamento do 2º patamar (s)	38,5	42
IAE do 2º patamar ($cm \cdot s$)	26	24,81
ITAE 2º patamar ($cm \cdot s^2$)	271	216
Variância – sinal de saída (2º patamar)	3,2260	3,1641
Variância – ação de controle (2º patamar)	396,821	365,4813

Fonte: dados da pesquisa

Pela Tabela 07, observa-se que o controlador PID fuzzy apresentou os melhores índices IAE e ITAE, embora tenha obtido um tempo de assentamento 3,5 s maior em relação ao obtido pelo controlador PID. Essa desvantagem no tempo de assentamento ocorre em razão do pequeno sobressinal alcançado pelo PID fuzzy, o qual é 41,2% inferior comparado ao sobressinal alcançado pelo PID. Além disso, pode ser visto que o PID fuzzy apresentou menores valores da variância do sinal de saída e da ação de controle. Dessa forma, as curvas e os índices analisados evidenciam a superioridade do controlador PID fuzzy no controle do tanque T02. É interessante destacar que os valores presentes nesta tabela diferem dos contidos na Tabela 6 pelo fato de que os tanques, ao apresentarem formatos distintos, acabam apresentando também dinâmicas diferentes.

Assim, de maneira geral, o controlador PID fuzzy se sobressai, na maioria dos índices de desempenho analisados, em relação ao PID clássico. Isto se justifica pelo fato deste tipo de controlador conseguir lidar melhor com sistemas em presença de características não

lineares, favorecendo a obtenção de resultados superiores no controle do sistema didático proposto.

5. Conclusão

A partir dos resultados apresentados, percebe-se que o projeto do sistema de nível didático de baixo custo e com tanques apresentando geometrias variáveis se apresentou funcional para o estudo de técnicas de controle, tanto em nível de disciplinas de graduação/pós-graduação, como em pesquisas científicas. Destaca-se que este sistema, por possuir dois tanques distintos, possibilita não só mais estudos de caso, mas também o aprofundamento na análise de desempenho de diferentes controladores. Em termos de validação experimental do sistema proposto, os controladores implementados no presente trabalho se mostraram eficazes, principalmente o controlador PID fuzzy, que obteve os melhores resultados para os dois tanques. Vale salientar que, apesar de no presente trabalho terem sido utilizados controladores mais tradicionais, é possível se aplicar técnicas de controle mais sofisticadas, como controle preditivo e robusto. Sendo assim, como trabalhos futuros, pretende-se implementar outros tipos de controladores, aplicar técnicas de modelagem experimental, a partir de algoritmos como redes neurais e estimadores baseados em mínimos quadrados, e expandir o sistema, fazendo o acoplamento com outros tanques com outros formatos.

Referências

- BATISTA, L. L. C. *Aplicação de metaheurísticas na otimização de escalonamento de ganhos de controladores PID por meio de lógica fuzzy*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2022.
- BATISTA, L. Y. A. *Desenvolvimento de um controlador PID na plataforma de prototipagem Arduino para controle de vazão de um tanque*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/14529>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- BHANDARE, D. S.; JAPE, V. S.; KULKARNI, H. H.; MAHAJAN, S. M.; SABLE, P.; PAWAR, Y. *Automatic Liquid Level Control of Two Tank System using PLC*. International Conference on Intelligent Systems and Advanced Applications (ICISAA), p. 1-6, India, 2024, <https://doi.org/10.1109/ICISAA62385.2024.10828622>.
- BORASE, R. P.; MAGHADE, D. K.; SONDKAR, S. Y.; PAWAR, S. N. *A review of PID control, tuning methods and applications*. International Journal of Dynamics and Control, v. 9, n. 2, p. 818-827, 17 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>.
- CAMPOS, G. S. C. *Desenvolvimento de bancada didática para controle de nível de 4 tanques, utilizando placa de aquisição de dados NIUSB6009, controlador PID e sistemas supervisórios programados no LabVIEW*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/635>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V. *Tópicos de física: mecânica*. 21ª Edição. Editora Saraiva, 2012.
- EKER, İ.; TORUN, Y. *Fuzzy logic control to be conventional method*. Energy Conversion and Management, v. 47, n. 4, p. 377-394, mar. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.008>.
- HÄGGLUND, T.; GUZMÁN, J. L. *Give us PID controllers and we can control the world*. IFAC-Papers On Line, v. 58, n. 7, p. 103-108, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.018>.
- HÄGGLUND, T. *Process control in practice*. 1ª Edição. Editora De Gruyter, 2023.
- HUSSAIN, M. K.; VENKATARAMAN, A.; SHAJAHAN, M. S. M.; JAMAL, D. N. *Tuning of PID controller using GA, SA and QFT for three interacting tank process*. 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), p. 549-553, India, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553819>.

- JIN, X.; CHEN, K.; ZHAO, Y.; JI, J.; JING, P. *Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller*. Measurement, v. 164, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108023>.
- KUMAR, V.; NAKRA, B. C.; MITTAL, A. P. *A review on classical and fuzzy PID controllers*. International Journal of Intelligent Control and Systems, v. 16, n. 3, p. 170-181, set. 2011.
- LEAL, G. V.; MOURA, R. R. *Desenvolvimento de um pêndulo invertido sobre duas rodas*. Brazilian Journal of Production Engineering, v. 9, n. 5, p. 70-79, 23 out. 2023. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v9i5.42714>.
- MACHADO, L.; MATIAS, I. O. *Modelo de otimização GA-fuzzy para malhas de aterramento de subestações*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 12, n. 3, p. 68-83, out. 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15202>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- MAYA, P. A.; LEONARDI, F. *Controle essencial*. 2ª Edição. Editora Pearson, 2014.
- MESQUITA, B.; CORRÊA, A. C. *Aplicação e análise de algoritmo de auto-sintonia embarcado em controlador lógico programável no controle angular de posição*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 8, n. 1, p. 141-155, abr. 2016. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11669>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- MENDONÇA, K. H.; GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M.; VILLANUEVA, J. M. M. *Aplicação de sistemas de controle fuzzy para sistemas de distribuição de água*. Revista DAE, v. 70, n. 236, p. 93-106, abr. 2022. <https://doi.org/10.36659/dae.2022.038>.
- NGUYEN, H. T.; KREINOVICH, V.; SIRISAENG TAKSIN, O. *Fuzzy control as universal control tool*. Fuzzy Sets and Systems, v. 80, n. 1, p. 71-86, maio 1996. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00263-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00263-4).
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5ª Edição. Editora Pearson, 2010.
- PILLAY, N. *Design and Implementation of a didactic cascade tank level control system*. International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), p. 1-6, South Africa, 2021, <https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698735>.
- QIAO, W. Z.; MIZUMOTO, M. *PID type fuzzy controller and parameters adaptive method*. Fuzzy Sets and Systems, v. 78, n. 1, p. 23-35, fev. 1996. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00115-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00115-8).
- SABRI, L. A.; AL-MSHAT, H. A. *Implementation of fuzzy and PID controller to water level system using LabView*. International Journal of Computer Applications, v. 116, n. 11, p. 6-10, abr. 2015. <http://dx.doi.org/10.5120/20378-2599>.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2ª Edição. Editora Blucher, 2007.
- ZHOU, W. *Research on the control methods based on liquid level system*. Highlights in Science, Engineering and Technology, v. 13, p. 198-206, ago. 2022. <http://dx.doi.org/10.54097/hset.v13i.1351>.