

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

JÉSSICA FERREIRA PIMENTEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE CONTROLE DE TANQUES
ACOPLADOS PARA ENSINO DE ENGENHARIA**

PATOS DE MINAS - MG

2024

JÉSSICA FERREIRA PIMENTEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE CONTROLE DE TANQUES
ACOPLADOS PARA ENSINO DE ENGENHARIA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como requisito para conclusão do Projeto Final de Curso de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr Daniel Costa Ramos

PATOS DE MINAS – MG

2024

JÉSSICA FERREIRA PIMENTEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE CONTROLE DE TANQUES
ACOPLADOS PARA ENSINO DE ENGENHARIA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como requisito para conclusão do Projeto
Final de Curso de graduação em Engenharia Eletrônica
e de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia
Elétrica campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos.

Patos de Minas, 14 de agosto de 2024

Banca Examinadora

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos – FEELT/UFU (Orientador)

Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Rafael Augusto da Silva – FEELT/UFU (Membro 2)

RESUMO

O estudo de sistemas de controle em sala de aula frequentemente não proporciona o preparo necessário para o mercado profissional devido ao elevado nível de abstração, que pode distanciar o conhecimento teórico da aplicação prática em sistemas reais. Portanto, a introdução de recursos que promovam o aprendizado prático no ambiente universitário tende a melhorar a capacitação dos estudantes. Nesse sentido, o uso de kits didáticos e plantas pilotos para o ensino de sistemas de controle pode aprimorar a experiência prática, simulando sistemas reais e possibilitando a aquisição de habilidades relevantes para o mercado de trabalho. No entanto, kits didáticos frequentemente não são facilmente acessíveis para instituições de ensino públicas no Brasil, devido ao seu alto custo. Dessa forma, uma solução que se adapta melhor à realidade dos alunos brasileiros é o desenvolvimento de protótipos próprios, levando em consideração os requisitos necessários para o estudo. Considerando essas premissas, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle de nível de água de baixo custo. A estrutura será composta por dois tanques de água acoplados, um sensor de medição de nível, uma bomba de água, um Arduino e um computador com MATLAB. A água será transferida pela ação da gravidade de um dos tanques para o outro, sendo devolvida através da bomba. Um controlador PID será implementado no MATLAB para manter o nível da coluna de água em um dos tanques em um valor desejado. Para garantir um bom desempenho do sistema desenvolvido, sua estrutura deverá permitir a elaboração e o estudo de controladores PID em sistemas reais, minimizando distúrbios e erros de medição que possam comprometer a atuação do controlador. Essa abordagem contribuirá para o aprimoramento do aprendizado prático e a capacitação profissional nas aulas da Universidade Federal de Uberlândia.

Palavras-chave: Sistemas de controle. PID. MATLAB. Arduino. Tanque de água.

ABSTRACT

The study of control systems in the classroom often does not provide the preparation required for the professional market due to the high level of abstraction, which can distance theoretical knowledge from practical application in real systems. Therefore, the introduction of resources that promote practical learning in the university environment tends to enhance student training. In this regard, the use of didactic kits and pilot plants for teaching control systems can improve practical experience by simulating real systems and enabling the acquisition of skills relevant to the job market. However, didactic kits are often not easily accessible to public educational institutions in Brazil due to their high cost. Thus, a solution that better adapts to the reality of Brazilian students is the development of custom prototypes, taking into account the requirements necessary for study. Given these considerations, this work aims to develop a low-cost water level control system. The setup will consist of two coupled water tanks, a level measurement sensor, a water pump, an Arduino, and a computer with MATLAB. The water will be transferred by gravity from one tank to the other and returned via the pump. A PID controller will be implemented in MATLAB to maintain the water column level in one of the tanks at a desired value. To ensure the developed system performs well, its structure should enable the design and study of PID controllers in real systems while minimizing disturbances and measurement errors that could affect the controller's performance. This approach will contribute to the enhancement of practical learning and professional training in the classes at the Federal University of Uberlândia.

Keywords: Control systems. PID. MATLAB. Arduino. Water Tank.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Modelagem do sistema.	15
Figura 1.2 - Sistema de tanques acoplados.....	16
Figura 1.3 - Sistema de tanques acoplados.....	16
Figura 2.1- Diagrama de blocos de um sistema representado por $G(s)$	18
Figura 2.2 - Fluxograma do controle em malha aberta.	19
Figura 2.3 - Controle em malha fechada.	19
Figura 2.4 - Kit de controle de nível do SENAI.....	22
Figura 2.5 - Kit didático para controle de nível da Dienzo.	23
Figura 2.6 - Kit Didático para Controle de Nível, Vazão e Temperatura.	23
Figura 2.7 - Exemplos de atuadores elétricos.....	24
Figura 2.8 - Exemplos de flutuadores.....	25
Figura 2.9 - Sensor por pressão diferencial.	26
Figura 2.10 - Célula de carga.....	26
Figura 2.11 - Versões do Arduino.	27
Figura 2.12 - Principais componentes de uma placa Arduino.	27
Figura 2.13 - Página do MATLAB.....	29
Figura 2.14 - Comandos no MATLAB.	29
Figura 3.1 – Alguns dos materiais previstos para a planta didática.	32
Figura 4.1 - Bomba d'água.....	35
Figura 4.2 - Módulo sensor ultrassônico a prova d'água.	36
Figura 4.3 - Tanque de controle.....	37
Figura 4.4 - Módulo Ponte H, Monster Moto Shield.	37
Figura 4.5 - Esquemático da placa Monster Motor Shield.....	38
Figura 4.6 - Análise do funcionamento do sensor ultrassônico.....	39
Figura 4.7 - Dimensões dos tanques.....	40
Figura 4.8 - Espuma em volta do sensor ultrassônico.	41
Figura 4.9 - Sensor ultrassônico posicionado em cima do tanque.	41
Figura 4.10 – Diagrama do sistema idealizado.....	42
Figura 4.11 - Montagem final do protótipo.	43
Figura 5.1 - Vazão com PWM de 5,0 V.	46
Figura 5.2 - Vazão com PWM de 3,0 V.	46
Figura 5.3 - Vazão com PWM de 1,5 V.	46

Figura 6.1 - Variação da altura do nível de água com ruídos.....	49
Figura 6.2 - Controle proporcional.	50
Figura 6.3 - Controle proporcional e integral.	50
Figura 6.4 - Variação do nível de água feita pelo controle PI.	51
Figura 6.5 - Controle proporcional, integral e derivativo.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Lista de materiais e respectivos custos, quando aplicável.....	32
Tabela 6.1 - Duração média para estabilizar em torno do <i>set point</i>	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Kd	<i>Ganho derivativo</i>
Ki	<i>Ganho integral</i>
Kp	<i>Ganho proporcional</i>
PID	<i>Proporcional-Integral-Derivativo</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	<i>Variável do processo</i>
SV	<i>Variável de referência</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
MIMO	<i>Multiple input, multiple outputs</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA DO PROJETO.....	13
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	13
1.3	HIPÓTESE.....	14
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivos Gerais	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	JUSTIFICATIVA.....	14
1.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE.....	18
2.1.1	Sistema de controle de malha aberta	18
2.1.2	Sistema de malha fechada	19
2.2	CONTROLADOR PID	20
2.3	KITS DIDÁTICOS	22
2.4	ATUADORES PARA VAZÃO DE ÁGUA	24
2.5	SENSORES DE NÍVEL DE ÁGUA.....	24
2.5.1	Tipos de sensores de nível	25
2.6	ARDUINO	26
2.6.1	Placa Arduino	26
2.6.2	Arduino IDE	27
2.7	MATLAB.....	28
2.8	PACOTE DE SUPORTE DO MATLAB PARA O HARDWARE ARDUINO	29
2.8.1	Biblioteca Ultrasonic	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MATERIAIS	31
3.2	METODOLOGIA	32
4	TESTES E ESCOLHA DOS COMPONENTES	35
4.1	COMPONENTES	35
4.1.1	Bomba d'água	35

4.1.2	Sensor ultrassônico	36
4.1.3	Tanque d'água	36
4.1.4	Módulo ponte h	37
4.2	TESTES.....	38
4.3	VISÃO GERAL	42
5	PROGRAMAÇÃO.....	44
5.1	SENSOR ULTRASÔNICO	44
5.2	CONTROLE PWM DA BOMBA D'ÁGUA.....	45
5.3	FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR PID	47
5.4	MÉDIA MÓVEL	48
6	RESULTADOS.....	49
7	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A indústria busca desenvolver processos automáticos que melhorem a eficiência e a produção, diminuindo a exposição de operadores humanos à trabalhos perigosos ou cansativos. A incorporação de novas tecnologias faz parte desse processo e toda vez que estas tecnologias provocam uma mudança na forma de produção, é dito que ocorre uma revolução industrial. A Indústria 4.0 tem origem neste conceito, pois refere-se à 4ª revolução industrial. Ela possibilitou o desenvolvimento de fabricas mais inteligentes e gerou uma demanda maior por profissionais que tenham habilidades em áreas como a de controle, automação, eletrônica, comunicação, automação, robótica, etc.

O estudante de engenharia eletrônica e de telecomunicações adquire habilidades que podem ser aplicadas em diversos seguimentos da indústria. Inclusive, um dos campos de atuação para este ramo e que se desenvolve durante o curso é o de sistemas de controle. É uma disciplina que estuda como um conjunto de componentes, interconectados e que podem ser controlados, contribuem para gerar uma resposta desejada. O sistema pode ser em malha aberta ou em malha fechada, com uma realimentação. Um controlador é responsável por manipular a entrada e gerar a saída desejada.

Dentre os processos existentes que podem ser controlados dentro da indústria, destaca-se a de controle de nível, que faz uso de técnicas avançadas para manipular o nível dos fluidos dentro de reservatórios para garantir o controle de estoque e até mesmo a identificação de níveis seguros de armazenamento.

O controle de nível é um sistema realimentado constituído essencialmente de um atuador que preenche o tanque com algum fluido (por exemplo, uma bomba de água), um sistema de escoamento com um fluxo constante (ou controlável) de saída do fluido, um sistema de sensoriamento para medir e acompanhar o nível do tanque (sensor ultrassônico ou capacitivo, por exemplo) e um sistema controlador, onde a lógica do sistema é programada (Controlador Lógico Programável, computador ou um microcontrolador, por exemplo) e a técnica de controle é implementada. Dentre as possíveis técnicas de controle de processos industriais, o controlador tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) é o método mais famoso, ele une as ações derivativa, proporcional e integral para corrigir o sinal de erro.

Existem diferentes métodos utilizados para a sintonia do controlador PID, os quais buscam achar valores de ganho proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d) que ajustam os pesos de cada ação para determinar a melhor resposta do sistema. Porém, quando esses

métodos são aplicados em sistemas reais os resultados oscilam, já que existem perturbações não previsíveis na teoria. Esse fator contribui para a importância da visualização do comportamento do sistema real, pois assim é possível analisar quais os parâmetros que devem ser ajustados e quais métodos geram melhores resultados (Jardim, 2019).

O modelo de um sistema pode ser desenvolvido utilizando unidades didáticas. Com elas podemos obter um modelo de um processo industrial e visualizar como as perturbações contribuem para a mudança dos parâmetros, auxiliando no estudo de sintonia de controladores.

1.1 TEMA DO PROJETO

O tema deste trabalho é o projeto, desenvolvimento e a construção de um protótipo didático de controle de nível de água em tanques acoplados, visando a demonstração prática do controle de nível de água por controladores digitais, em especial, o PID.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Uma forma de contribuir com o aprendizado de técnicas de controle dentro das universidades é por meio da criação de ambientes didáticos com processos que simulem aqueles encontrados na própria indústria. Assim, o estudante torna-se mais capacitado para implementar métodos de controle mais avançados, o que é de extrema necessidade, já que existe uma grande carência de profissionais qualificados no mercado.

Os conceitos da teoria de controle possuem um alto nível de abstração sendo difíceis de serem demonstrados na prática. Desse modo, as plantas piloto e as unidades didáticas oferecem uma visualização aproximada de uma planta de um processo, permitindo desenvolver algoritmos de controle estudados no meio acadêmico e testá-los em condições similares as industriais.

No mercado é possível encontrar kits didáticos de controle de nível, porém acabam tendo um alto custo. Além disso, a maioria possui uma arquitetura fechada de *hardware* e *software*, o que dificulta a implementação de novas técnicas e métodos de controle.

Mais do que poder aplicar na prática os conceitos vistos em sala de aula, o aluno de engenharia também deve ser estimulado a projetar e a desenvolver seus próprios sistemas e recursos, assim o uso exclusivo de kits didáticos pode tirar essa oportunidade, pois eles já possuem um método predefinido de utilização.

1.3 HIPÓTESE

A hipótese central é a possibilidade de melhorar o ensino e a compreensão da teoria de controle e de automação, em especial, do controlador PID, por meio da demonstração visual e prática dos efeitos do controlador em um protótipo de controle de nível.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo deste trabalho é o projeto e construção de um protótipo de baixo custo para controle de nível de água em tanques acoplados, que permita o estudo e a demonstração das teorias de controle.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

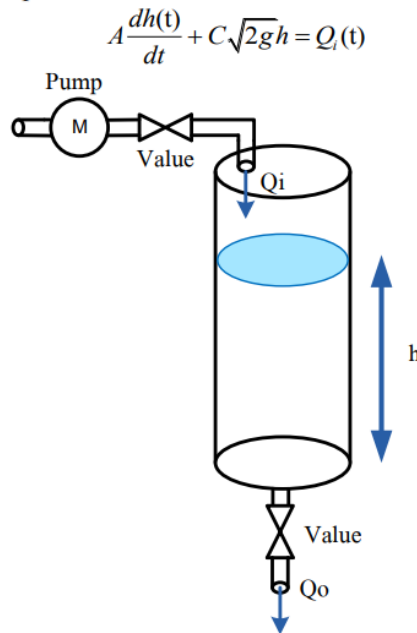
- Estudar a teoria e o modelo matemático deste tipo de sistema;
- Projetar e construir uma estrutura de baixo custo com dois tanques acoplados;
- Realizar o acionamento e a leitura do sensor por Arduino;
- Estabelecer comunicação com o MATLAB para troca, disponibilização de dados e controle PID.

1.5 JUSTIFICATIVA

Devido as necessidades de ferramentas didáticas aplicadas, algumas propostas surgiram trazendo o controle de nível de água em estruturas construídas pelo próprio pesquisador.

O trabalho apresentado por Howimanporn (2018) traz um controle de nível PID em um tanque que apresenta uma entrada de água controlada pelo motor de uma bomba e uma válvula de escape. O modelo matemático do sistema foi apresentado (Figura 1.1). O PID é aplicado na tensão do motor da bomba buscando equilibrar o nível da água no *set point*. Porém, a proposta desse trabalho foi estudar a aplicação da otimização por enxame de partículas (PSO) nos ganhos K_p , K_i e K_d do PID, comparando o uso do PSO em malha aberta com o uso do PSO com um método de escalonamento de ganho. Os resultados mostraram que para o segundo caso a resposta do sistema foi superior.

Figura 1.1 - Modelagem do sistema.



Fonte: (HOWIMANPORN, 2018).

Uma estrutura modular de baixo custo é apresentada por Pulcherio (2021). Ela apresenta dois reservatórios e um tanque com o sistema de controle. O primeiro reservatório, chamado de *reservatório 1*, alimenta o tanque de controle por meio de uma bomba, *bomba 1*. O tanque de controle possui uma saída conectada ao *reservatório 2*, que está em um nível inferior de altura em relação ao tanque e ao *reservatório 1*, dessa forma, a água sai do tanque de controle para o *reservatório 2* pela ação da gravidade. Outra bomba é responsável por elevar a água do *reservatório 2* para o *reservatório 1* (Figura 1.2). A ação de controle é aplicada na tensão da *bomba 1*, buscando equilibrar o nível da água dentro do tanque no valor de *set-point*. O sistema de controle foi implementado no Arduino e os ganhos do controlador PID foram obtidos pelo método da curva de reação. Os resultados obtidos foram satisfatórios, já que o intuito era desenvolver uma unidade didática que pudesse auxiliar no aprendizado das teorias envolvidas nas disciplinas de controle.

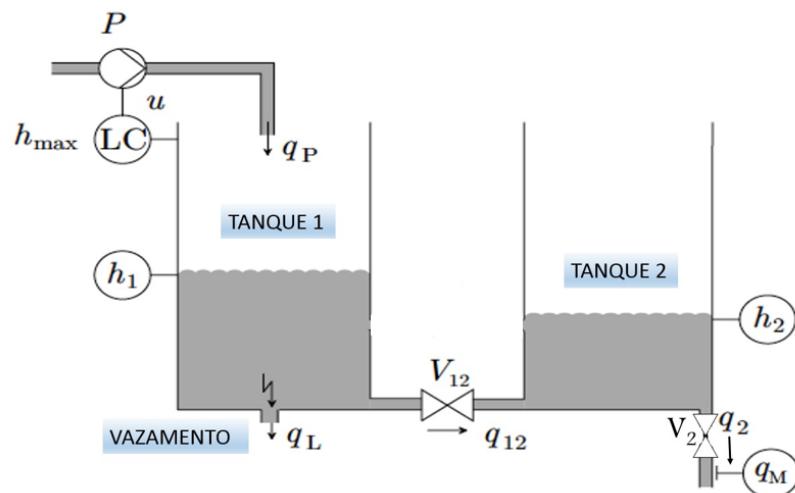
Uma abordagem diferente de controle de nível em tanques acoplados é proposta por Jardim (2019). A Figura 1.3 mostra o sistema desenvolvido. Os parâmetros que atuam no sistema são modificados e as alturas nos dois tanques são obtidas como resultado. Empregou-se o Arduino para coletar e enviar os dados de altura e vazão dos dois tanques para o software MATLAB, que calcula o erro entre a altura do tanque 2 e o *set point* e envia para o Arduino um sinal contendo o nível de tensão em que a bomba que alimenta o tanque 1 deve ser acionada. Além disso, utilizando a ferramenta GUIDE, o MATLAB demonstra o comportamento do sistema.

Figura 1.2 - Sistema de tanques acoplados.



Fonte: (PULCHEIRO, 2021).

Figura 1.3 - Sistema de tanques acoplados



Fonte: (JARDIM, 2019).

Uma comparação entre algumas técnicas de controle em um sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) de tanques acoplados é apresentada por Shaikh (2019). Foram feitos testes com os controladores PID, de lógica Fuzzy e PSO e os resultados mostraram

que o controlador Fuzzy seria melhor aplicado coordenando os parâmetros do PID, obtendo assim melhores resultados.

Uma estrutura simples e com custo mais acessível foi desenvolvida por Pereira (2021). Nesse exemplo, aplicou-se o controle de nível em um tanque conectado a uma bomba que puxava água de um reservatório. Fazendo experimentos em malha aberta, os pesquisadores conseguiram o modelo matemático do sistema. Dessa forma, foi possível simular os controladores proporcional e proporcional integral utilizando o software Simulink© e comparar os resultados com os obtidos por meio da implementação dos controladores no sistema real. Em regime permanente, o comportamento do sistema real se aproximou bastante com o do sistema simulado, porém, em regime transitório, as respostas não foram semelhantes.

Os trabalhos supracitados demonstram a importância de uma planta didática para demonstração da teoria de controle, focando principalmente na comparação entre diferentes técnicas.

Neste trabalho é proposto uma unidade didática com uma estrutura semelhante a apresentada por Pulcherio (2021). No MATLAB será implementado o controlador para monitorar as variáveis do processo a fim de auxiliar no estudo do sistema. O MATLAB se comunicará com o Arduino, que coletará os dados dos sensores e alimentará as bombas. Deseja-se que a unidade didática permita testes de sintonia de controlador PID, como Ziegler-Nichols, lugar das raízes, método da curva de reação, etc., para demonstrar os efeitos da escolha correta dos ganhos do PID.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentou-se as motivações e as dificuldades envolvidas para o desenvolvimento do trabalho. Foi discutido como uma estrutura didática de um sistema de controle pode contribuir grandemente para o aprendizado de sistemas industriais reais, estimulando o processo de obtenção de controladores que mais se adequam aos fatores ambientes e estimulando a correção de falhas em processos industriais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para compreender melhor tudo o que será feito nesse trabalho serão necessários o conhecimento e o estudo das ferramentas que serão utilizadas e de alguns conceitos relacionados a teoria de controle. Neste capítulo serão abordados os seguintes assuntos: sistemas de controle, kits didáticos, Arduino, atuadores para vazão de água, sensores de nível de água e MATLAB.

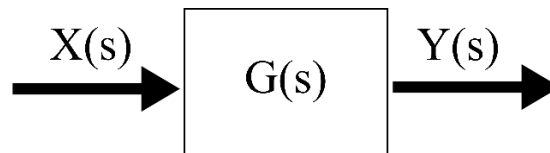
2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

Um sistema é um conjunto de elementos interligados e que produzem uma resposta devido a um estímulo.

As características dinâmicas de um sistema linear e invariante no tempo podem ser descritas por sua função de transferência, que é a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada. Sendo assim, supondo uma saída $Y(s)$ e uma entrada $X(s)$, a função de transferência do sistema será dada pela Equação (2.1). A Figura 2.1 mostra o diagrama de blocos com a função de transferência $G(s)$, a entrada $X(s)$ e a saída $Y(s)$.

$$G(s) = Y(s)/X(s) \quad (2.1)$$

Figura 2.1- Diagrama de blocos de um sistema representado por $G(s)$.



Fonte: A autora.

Conhecendo a função de transferência, para uma entrada $X(s)$ é possível obter a saída $Y(s)$ pela Equação (2.2).

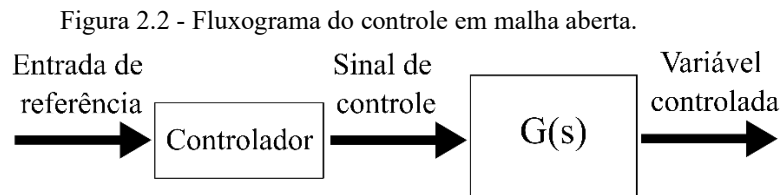
$$Y(s) = G(s).X(s) \quad (2.2)$$

Quando uma variável do sistema é regulada, a fim corrigir o valor da saída ou aproximá-lo de um valor desejado, temos um sistema de controle. Nesse caso, a resposta ou saída do sistema é chamada de variável controlada e a grandeza que é modificada é chamada de variável manipulada (OGATA, 2010).

2.1.1 Sistema de controle de malha aberta

Em sistemas de malha aberta, o resultado da saída não influencia a ação de controle. Portanto, não se faz uso de realimentação e espera-se que sinal de saída seja o desejado sem

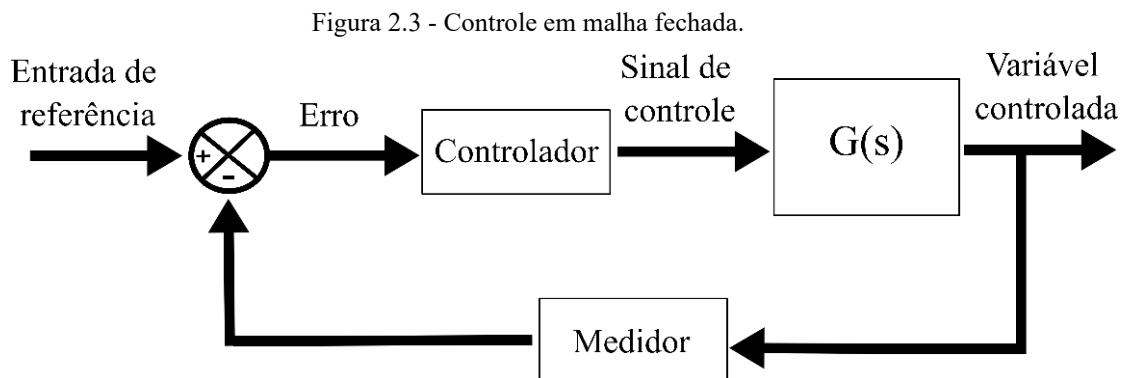
que haja uma medição. O controle em malha aberta (Figura 2.2) normalmente é aplicado em sistemas mais simples e com poucos distúrbios.



Fonte: A autora.

2.1.2 Sistema de malha fechada

Um sistema de controle de malha fechada (Figura 2.3) é aquele que possui uma realimentação, onde há a comparação entre uma entrada e uma saída gerando o que normalmente é definido como um erro. Controladores são empregados para minimizar este erro e tentar fazer o valor da saída se igualar ao da entrada.



Fonte: A autora.

A função de transferência em malha fechada pode ser simplificada para um único bloco equivalente, denominado $T(s)$ por meio da Equação (2.3).

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 \pm G(s) \cdot H(s)} \quad (2.3)$$

Onde $G(s)$ é a função de transferência em malha aberta, considerando tanto o sistema quanto o controle, e $H(s)$ é a função de transferência do ramo de realimentação. O sinal no denominador é oposto ao sinal da realimentação na entrada do somador.

Neste tipo de sistema, a saída é obtida por um sensor que mede a variável de saída, o qual pode estar ligado a um Controlador Lógico Programável (CLP), ou a um microcontrolador ou a uma placa de aquisição de dados, ou seja, a uma central que irá processar a informação e comparar com a informação de entrada, gerando o sinal de erro para o controlador que antecede o sistema.

Existem inúmeros tipos de controladores, sendo que neste trabalho serão abordados apenas os controladores clássicos como o Proporcional (P), Proporcional+Integral (PI), Proporcional + Derivativo (PD), Proporcional + Integral + Derivativo (PID), etc., dado que o escopo deste trabalho é no ensino de introdutório de controle.

2.2 CONTROLADOR PID

O controlador PID é a ferramenta mais utilizada em sistemas de controle, chegando a ser aplicado em mais de 90% dos controladores industriais, isso graças a simplicidade e a eficiência que ele oferece a mais, se comparado com outros controladores (Ang, 2005).

O PID compreende as ações proporcional, integral e derivativo que são ajustadas por valores de ganhos K_p , K_i e K_d respectivamente. Os métodos de sintonia PID buscam encontrar valores de ganhos K_p , K_i e K_d para proporcionar uma saída estável e que se aproxime da referência desejada (*set-point*), ou seja, buscam diminuir o erro entre uma variável do processo, PV e um valor de referência, SV. Para a situação onde temos um sistema estável, o erro entre PV em estado estacionário e SV é chamado de *Offset* (Ogata, 2010).

O ajuste da variável do processo PV é feito por meio de uma variável manipulada, como a tensão aplicada em uma resistência que varia a temperatura de um líquido ou a tensão aplicada em uma bomba que varia o nível de um líquido.

A ação proporcional atua na variável manipulada de forma diretamente proporcional ao erro, portanto, quanto maior o erro maior sua ação. A saída do controlador proporcional em função do tempo t , $u_p(t)$, é determinada pela Equação (2.4).

$$u_p(t) = K_p e(t). \quad (2.4)$$

O ganho K_p regula a ação proporcional, modificando a intensidade da resposta ao erro, se seu valor for muito grande, o sistema ficará instável e a variável PV irá oscilar em torno do valor desejado, mas, se seu valor for muito pequeno, a variável PV não terá oscilações, porém sua variação ficará muito lenta demorando a se estabilizar e gerando um grande offset. Dessa forma, deve-se buscar um K_p que faça com que PV se aproxime da referência e se estabilize o mais rápido possível, o que é mais difícil usando somente o controle proporcional.

O controle integral é capaz de eliminar o erro estacionário deixado pelo controle proporcional. Sua contribuição cresce ao longo do tempo, integrando o sinal de erro enquanto ele existir. A saída do controlador integral é dada pela Equação (2.5).

$$u_i(t) = K_i \int e(t) dt. \quad (2.5)$$

O ganho K_i regula a ação integral, se seu valor for muito pequeno a contribuição deste controle será reduzida, porém, se seu valor for muito grande, a resposta poderá oscilar.

O controle derivativo possui uma resposta proporcional a taxa de variação do erro. Dessa forma, ele pode aumentar a estabilidade do sistema antecipando a reação da ação proporcional e deixando a resposta mais amortecida. Por exemplo, se em um curto período de tempo houver uma grande variação no erro o controle derivativo irá agir aumentando a estabilidade do sistema antes que o erro se torne muito elevado. A resposta do controle derivativo em função do tempo é dada pela Equação (2.6)

$$u_D(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t). \quad (2.6)$$

Associando os controles proporcional, integral e derivativo, teremos o controlador PID, cuja resposta em função do tempo será obtida pela Equação (2.7)

$$u(t) = u_p + u_I(t) + u_D(t) = K_P e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.7)$$

Sua função de transferência é dada pela Equação (2.8).

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (2.8)$$

Ao longo dos anos, métodos e testes de sintonia PID são desenvolvidos e estudados para buscar gerar os melhores valores dos ganhos de K_p , K_i e K_d , para os mais diversos tipos de sistemas. Em geral, busca-se uma resposta estável, rápida e com menos oscilações. No entanto, não há um método de sintonia que gere o melhor desempenho em todos os sistemas. Portanto, em cada sistema, diferentes técnicas de sintonia podem ser testadas para verificar qual melhor se adequa.

2.3 KITS DIDÁTICOS

Os kits didáticos oferecem o aparato necessário para que o estudante tenha a experiência daquilo que será vivenciado dentro do mercado de trabalho, aplicando técnicas conhecidas na teoria e testando-as em um ambiente real.

O Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) já utiliza kits didáticos em seus cursos, um deles, (Figura 2.4), serve para implementar sistema de controle de nível. Fora a estrutura de alumínio e acrílico, no kit também vem uma fonte, uma bomba de água, uma válvula e um Controlador Lógico Programável (CLP) WEG. Ele tem capacidade para até seis alunos e o controlador pode ser implementado no CLP do kit ou em algum microcontrolador.

Segundo o site da instituição: “As soluções didáticas móveis para formação profissional oferecidas pela Fábrica de Kits foram projetadas com conceito modular e flexível, ampliam o engajamento e dão maior suporte ao processo educacional para docentes e alunos, conectando teoria e prática”. Os kits didáticos do SENAI também são oferecidos a cursos fora da instituição, basta entrar em contato por e-mail.

Figura 2.4 - Kit de controle de nível do SENAI.



Fonte: SENAIWEB.

Existem empresas que também desenvolvem kits voltados para alunos em sala de aula, uma delas é a Dienzo Soluções Didáticas que fornece kits para todo o Brasil. Segundo a Dienzo: “O kit didático é formado por vários equipamentos distintos que envolvem situações isoladas, para que o aluno tenha uma experiência real sobre determinado assunto estudado”.

O kit para controle de nível da Dienzo, Figura 2.5, possui uma estrutura de alumínio, dois reservatórios de acrílico, uma bomba hidráulica, seis sensores digitais (três em cada

reservatório) de nível e um painel de comando. Ele vem também com um manual e com sugestões de aulas. Na data deste trabalho, o valor desse kit é de R\$ 14900,00.

Outra empresa que também desenvolve kits para didáticos para o mercado é a Exsto Tecnologia. A Figura 2.6 mostra o Kit Didático para Controle de Nível, Vazão e Temperatura XC229 da Exsto. Ele é um kit mais robusto e já possui controladores em malha fechada, ou seja, o aluno ou o pesquisador não tem a necessidade de implementá-los, isso, apesar de ser uma vantagem em alguns casos, pode tornar o kit menos versátil para o aluno que deseja aprender a implementar seu próprio sistema de controle.

Figura 2.5 - Kit didático para controle de nível da Dienzo.



Fonte: Dienzo.

Figura 2.6 - Kit Didático para Controle de Nível, Vazão e Temperatura.



Fonte: Exsto.

2.4 ATUADORES PARA VAZÃO DE ÁGUA

Os atuadores são dispositivos acoplados às válvulas de água, que permitem o acionamento automatizado da válvula para o controle de pressão e fluxo de forma remota por meio de painel, computador ou botão. Assim, a presença de operadores no local é dispensada, e é possível conseguir precisões melhores no posicionamento da válvula.

Os atuadores mais comuns são os elétricos e os pneumático (Figura 2.7). Os atuadores operados pneumaticamente utilizam a pressão para gerar força mecânica e movimentar a válvula, já os operados eletricamente utilizam a energia dada por corrente elétrica. A posição da válvula é ajustada ou inserida pelo operador automaticamente.

Os atuadores pneumáticos oferecem mais força e velocidade se comparados com os elétricos, além disso, essas variáveis podem ser ajustadas facilmente pelo operador. Os atuadores pneumáticos também são mais baratos que os elétricos, porém os custos de manutenção e operação são mais elevados.

Os atuadores elétricos também possuem outras desvantagens, como o superaquecimento e a não resistência a umidade.

Figura 2.7 - Exemplos de atuadores elétricos.

Atuadores elétricos para válvulas de processo



www.mtibrasil.com.br

Fonte: Mtibrasil.

2.5 SENSORES DE NÍVEL DE ÁGUA

A medição de nível consiste em atribuir um valor para altura da coluna de um material dentro de um recipiente.

As técnicas de medição de nível são classificadas em duas categorias: as que medem diretamente o valor da altura do nível (medição direta), e as que chegam a este valor por meio de outras variáveis (medição indireta).

Quando os valores de medição precisam ser transmitidos para realizar cálculos mais complexos, a medição é feita empregando sensores de nível. Eles enviam suas leituras por meio de sinais analógicos ou digitais (Silveira, 2018).

2.5.1 Tipos de sensores de nível

A seguir serão apresentadas algumas tecnologias para medição de nível (Figura 2.8).

- **Sensor de Nível Flutuador:** O Sensor de Nível flutuador ou flutuadores é o mais comum, ele é formado por uma parte que flutua sobre o material, como uma boia, e um dispositivo que registra a posição do flutuador à medida que ele se move junto com o material. Exemplos de flutuadores são mostrados na abaixo.

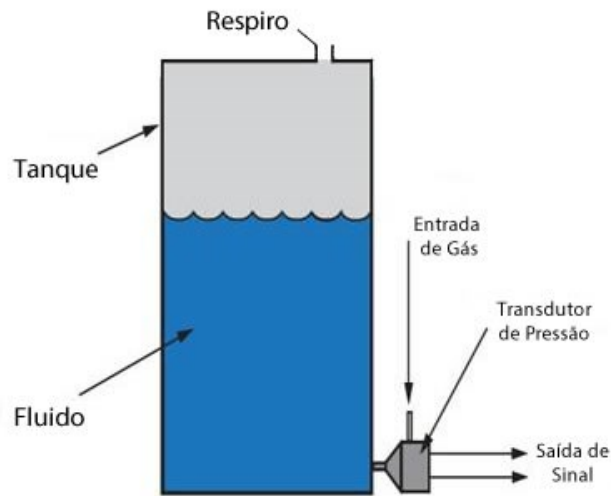
Figura 2.8 - Exemplos de flutuadores.



Fonte: Adaptado da Internet pelo Autor.

- **Sensor de Nível Ultrassônico:** Este sensor calcula a medida de nível em um tanque pelo tempo que um pulso de ultrassom transmitido demora para ir até o fluido e retornar. Dessa forma, como a velocidade do som é conhecida, é possível saber a distância entre o sensor e o material.
- **Sensor de Nível por Pressão Diferencial:** Neste tipo de sensor (Figura 2.9), a medida de nível é obtida pela diferença de pressão na parte inferior do reservatório e no topo acima da coluna, onde normalmente é adicionado um respiro para manter a pressão atmosférica como referência.
- **Células de Carga:** A célula de carga (Figura 2.10) gera sinais analógico quando uma força é aplicada sobre ela. Colocando células de carga na base da estrutura de um tanque que possui geometria conhecida e sabendo a densidade do material, é possível obter as variações de nível pela variação da pressão sobre a célula de carga.

Figura 2.9 - Sensor por pressão diferencial.



Fonte: (SILVEIRA, 2018).

Figura 2.10 - Célula de carga.



Fonte: Robocore.

2.6 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento que conta com recursos que facilitam a programação e a utilização do microcontrolador presente em suas placas. Por ser fácil de usar, o Arduino é muito empregado em kits didáticos, sendo uma opção de baixo custo e com uma vasta gama de materiais disponíveis. Isso tudo faz dele uma boa opção para quem está começando a programar.

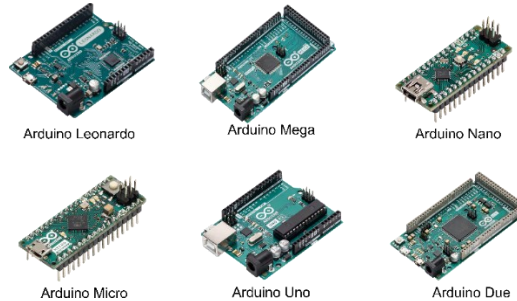
O Arduino é composto por uma parte de *hardware*, que são suas placas, e um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment - IDE*).

2.6.1 Placa Arduino

A primeira placa Arduino desenvolvida foi a Uno, por isso todas as outras versões que chegaram depois se basearam nela. A Figura 2.11 mostra algumas das versões mais populares. Basicamente, as características mais importantes que mudam em cada placa Arduino são: a quantidade de entradas e saídas, memória, velocidade de processamento e, por vezes, o

tamanho, que em algumas placas é reduzido para facilitar aplicações que necessitam de pouco espaço.

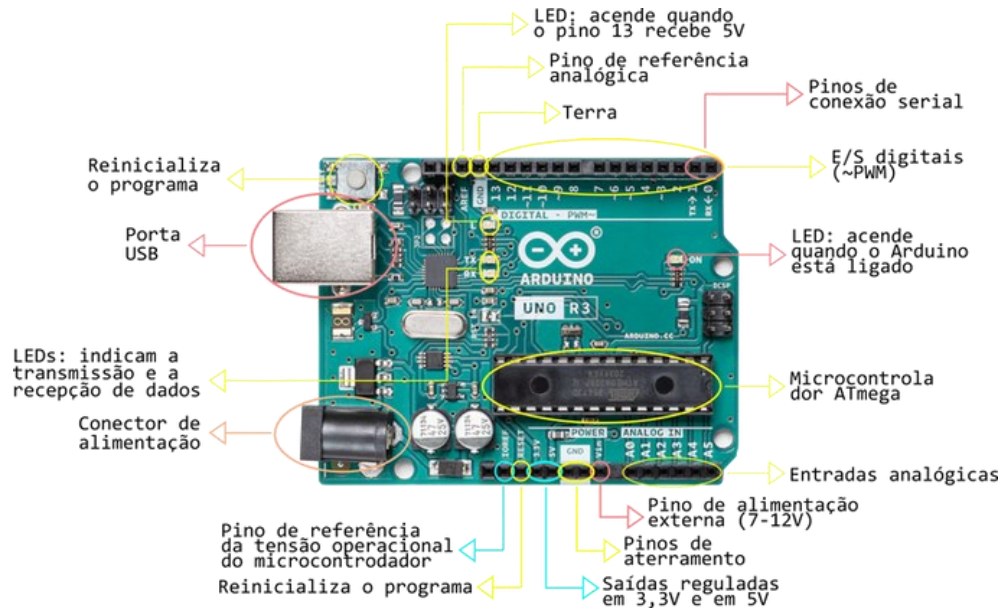
Figura 2.11 - Versões do Arduino.



Fonte: Adaptado do Site do Arduino pela Autora.

Todas as placas Arduino possuem conectores para entrada e saída, entrada USB, conector de alimentação e outros componentes que trazem mais funções e facilitam o desenvolvimento de projetos. A anatomia da placa Arduino Uno Rev 3 é ilustrada na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Principais componentes de uma placa Arduino.



Fonte: Robotatos (2022).

2.6.2 Arduino IDE

O Arduino IDE é uma plataforma de programação que pode ser executada em Mac OS X, Windows e Linux. Ele facilita a programação e a gravação de códigos para a placa sem a necessidade de conexão com a internet, basta escrever o código, conectar a placa em um computador por uma entrada USB e fazer a gravação (Arduino, 2022).

O Arduino possui um programa, que já vem instalado em seu microcontrolador, chamado de *Bootloader*. Toda vez que ligamos ou reiniciamos o Arduino esse programa é o primeiro a ser executado. Sua principal função é facilitar a gravação de um novo código para o microcontrolador por meio do Arduino IDE (Arduino, 2024).

2.7 MATLAB

O MATLAB é uma plataforma de programação desenvolvida pela MathWorks e voltada para a execução de álgebra linear e computação numérica. Seu nome é a sigla de MATrix LABoratory, ou, para o português, Laboratório de Matrizes, pois sua linguagem é expressa por operações envolvendo matrizes.

A biblioteca de funções matemáticas do MATLAB permite criar e fazer cálculos utilizando vetores e matrizes, trabalhar com números reais e complexos, projetar gráficos em duas e em três dimensões, entre outras funções. Com o tempo, novas ferramentas foram adicionadas e hoje é possível aplicar o MATLAB nas áreas de processamento de sinais e de imagens, sistemas de controle, comunicação wireless, computação financeira, robótica, *Deep learning*, Inteligência Artificial, entre outras áreas (Opencadd, 2021).

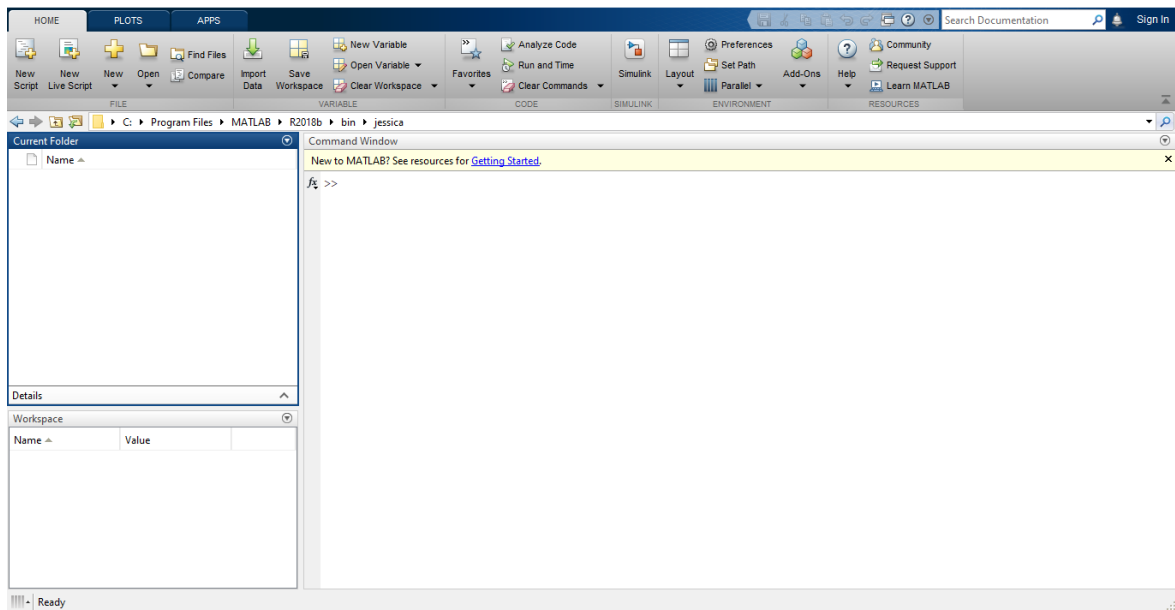
O MATLAB ainda contém o SIMULINK, um pacote adicional que permite modelar sistemas dinâmicos, sendo aplicado para sistemas discretos ou contínuos no tempo e lineares ou não lineares.

Para ter acesso ao MATLAB, a MathWorks oferece uma avaliação gratuita por 30 dias. Além disso, também existe uma licença gratuita para estudantes de algumas universidades.

Ao iniciar o MATLAB, espera-se que apareça uma janela semelhante à mostrada na Figura 2.13. Dentro da janela *Current Folder* serão mostrados os arquivos de códigos criados, normalmente estes arquivos são salvos com a extensão *.m* dentro da pasta *bin*, que vem junto com os dados de instalação.

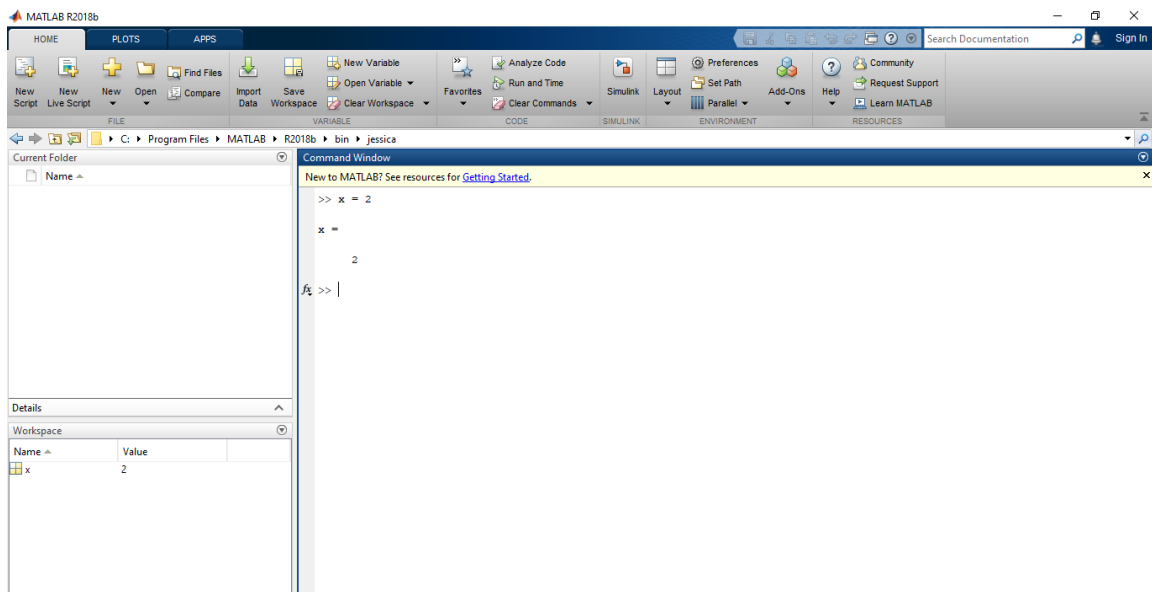
Na janela de comandos (*Command Window*) o usuário poderá escrever sentenças e comandos. As variáveis definidas serão armazenadas dentro do *Workspace* (Figura 2.14). Selecionando uma variável do *Workspace*, abre-se uma tabela que mostra os valores da variável.

Figura 2.13 - Página do MATLAB.



Fonte – A autora.

Figura 2.14 - Comandos no MATLAB.



Fonte – A autora.

2.8 PACOTE DE SUPORTE DO MATLAB PARA O HARDWARE ARDUINO

Com a utilização cada vez mais ampla da placa Arduino em diversas aplicações, o MATLAB desenvolveu um pacote de suporte para a interação com placas Arduino por meio da porta USB, Wi-Fi ou Bluetooth. Esse recurso fornece bibliotecas e funções que permitem visualizar e analisar dados coletados por meio leitura das entradas analógicas e digitais, e, ainda,

permitem a escrita nos pinos de saída para, por exemplo, controlar motores DC em diversas aplicações.

2.8.1 Biblioteca Ultrasonic

A biblioteca ‘Ultrasonic’ faz parte do pacote de suporte do MATLAB para a interação com o Arduino. Essa biblioteca é exclusiva para o uso de sensores ultrassônicos e permite medir distância de um obstáculo que esteja na frente de um sensor ultrassônico.

No código é criado um objeto do tipo arduino. Por exemplo:

```
arduinoObj = arduino ('com3', 'uno', 'libraries', 'Ultrasonic');
```

O objeto ‘arduinoObj’ recebe as seguintes propriedades:

- Porta: porta COM onde o Arduino está conectado;
- Modelo: modelo da placa Arduino;
- Biblioteca: biblioteca que será utilizada, no caso, ‘Ultrasonic’.

Após criar o objeto do tipo arduino, definimos em outro comando as portas da placa Arduino onde os pinos *Trigger* e *Echo* estão conectados. Por exemplo:

```
ultrasonicObj = ultrasonic (arduinoObj, 'D2', 'D3');
```

Especificamos entre parênteses no código acima as seguintes propriedades do objeto ‘sensor’:

- Objeto arduino: pelo exemplo, o objeto ‘arduinoObj’ que representa a placa Arduino onde o sensor está conectado;
- Pino trigger: entrada/saída onde está conectado o pino trigger do sensor. No exemplo acima é a entrada/saída digital D2 do Arduino;
- Pino Echo: Entrada/saída onde está conectado o pino Echo do sensor. No exemplo acima é a entrada/saída digital D3 do Arduino.

A função `readDistance()` mede o valor da distância de um objeto que está na frente do sensor ultrassônico. Seguindo o exemplo acima, a função é escrita tendo como parâmetro o objeto ‘sensor’. Por exemplo:

```
readDistance(ultrasonicObj).
```

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade didática consiste em um sistema com dois tanques acoplados ligados por uma válvula e uma bomba. Pela válvula, a água escoo do tanque principal para o secundário e pela bomba ela será devolvida ao tanque principal.

O microcontrolador irá atuar no sistema por meio dos comandos enviados pelo MATLAB. Optou-se por utilizar a placa Arduino para facilitar a implementação e, inclusive, a comunicação com o MATLAB, pois a placa é capaz de enviar e receber dados pela porta serial.

Um sensor será utilizado para coletar e enviar as medições da altura do nível de água para o Arduino por meio de sinais eletrônicos. Algumas técnicas envolvem medição de vazão (Jardim, 2019), pressão, massa (Pulcherio, 2021), entre outras. A melhor técnica de medição será avaliada conforme o desempenho e o custo, pois alguns métodos como o uso do sensor ultrassônico podem ser afetados por turbulências na superfície da água, e outros métodos, como a medição por pressão diferencial, são mais precisos, porém possuem custo mais elevado.

Os dados de controle serão obtidos por meio de um modelo teórico do sistema e dos cálculos feitos pelo MATLAB utilizando os parâmetros reais.

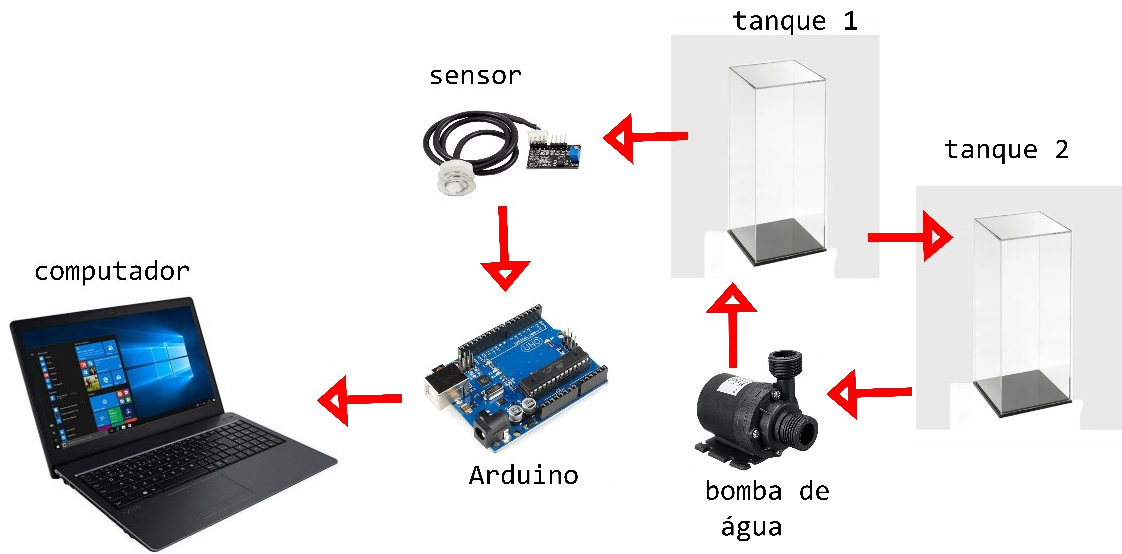
Sendo assim, serão destacados neste capítulo os principais componentes idealizados e a sequência de etapas necessárias para fazer a montagem e o funcionamento da unidade didática.

3.1 MATERIAIS

Os principais materiais para a planta didática são o Arduino para o controle e comunicação com o computador, o sensor para medição de nível, a bomba d'água para bombear o fluido para o tanque e a estrutura física dos tanques, no qual será avaliado o uso de acrílico para melhor visualização do controle de nível.

Será avaliado a utilização de módulos adicionais, com a adição de botão de emergência, leds indicadores, tela LCD, dentre outros. A Figura 3.1 ilustra os componentes básicos do projeto e a ligação entre eles. Na Tabela 3.1 são indicados os principais materiais que serão utilizados e seus respectivos custos. O valor total gasto com os materiais foi de R\$ 467,73, comprovando que o valor gasto com este projeto é bem inferior ao dos kits existentes no mercado, tendo como referência o kit da Dienzo, que custa R\$ 14900,00 a unidade.

Figura 3.1 – Alguns dos materiais previstos para a planta didática.



Fonte: A autora.

Tabela 3.1 - Lista de materiais e respectivos custos, quando aplicável.

Nome	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Placa Arduino Uno	R\$ 121,92	1	R\$ 121,92
Mini bomba de água	R\$ 97,79	1	R\$ 97,79
Módulo Sensor de Distância HC-SR04	R\$ 25,90	1	R\$ 25,90
Driver Monster Moto Shield VNH3SP30	R\$ 179,82	1	R\$ 179,82
Recipiente de plástico	R\$ 22,30	1	R\$ 22,30
Computador e MATLAB	-	1	-
Componentes adicionais	~ R\$ 20,00	-	~ R\$ 20,00
TOTAL:			R\$ 467,73

Fonte: A autora.

3.2 METODOLOGIA

Etapas planejadas para o desenvolvimento do trabalho:

1) Revisão e Estudos

O objetivo dessa parte é buscar referências e estudar a teoria necessária para o desenvolvimento do trabalho. Foram considerados exemplos de trabalhos já propostos para facilitar a concepção de ideias e o estudo das teorias sobre os componentes e técnicas que serão utilizados.

2) Planejamento da estrutura e definição dos componentes

Baseado no que foi estudado na etapa 1, foi definida como será a unidade e como ela irá funcionar. Avaliou-se os principais componentes que serão necessários para a construção, levando em consideração o baixo custo. Foram avaliados e escolhidos os recipientes para os tanques de água, também, levando em consideração a possibilidade de poder visualizar as variações do nível do líquido dentro dos tanques. O sensor também foi avaliado de acordo com o custo e o desempenho.

3) Construção da estrutura

Nessa etapa será feita a construção do modelo idealizado, incluindo a ligação e instalação dos componentes elétricos (sensor, bomba de água, etc.). Os recipientes escolhidos para serem os tanques serão ligados por uma mangueira com uma válvula para controle de fluxo. A ligação da mangueira foi feita na base do recipiente principal e na parte superior do secundário acima do nível da água para evitar pressão na saída da mangueira, dessa forma, havendo uma diferença de altura, a água escoará do tanque principal para o secundário. Uma bomba d'água foi instalada para elevar o líquido e devolve-lo para o tanque principal, onde foi instalado o sensor para medir as variações do nível. O Arduino irá fazer a leitura dos níveis e enviar para o MATLAB.

4) Leitura dos dados com o Arduino

Para que o sistema funcione devidamente bem, foi necessária uma boa leitura do sensor, por isso testes serão feitos para verificar a precisão dos dados e como possíveis turbulências afetarão no desempenho. O Arduino em conjunto com o sensor fornecerá essa possibilidade.

5) Comunicação entre o Arduino e o MATLAB

A comunicação via serial entre o Arduino e o MATLAB auxiliará na disposição dos dados, na verificação das variações de níveis devido as tensões aplicadas na bomba e no seu controle a partir disso. Para isso, o MATLAB irá receber os valores de níveis coletados pelo Arduino.

6) Implementação do controlador PID no MATLAB

Os dados recebidos do Arduino são usados para implementar o controlador do sistema. O MATLAB irá fornecer os valores de tensão que o Arduino deverá aplicar na bomba e simultaneamente verificar a variação de nível causada. Dessa forma, de acordo com o comportamento do sistema, o controlador PID será modelado e serão feitos estudos para buscar a melhor sintonia.

7) Validação e Melhorias

A última etapa consistiu em avaliar o desempenho do sistema como um todo e a acessibilidade de implementação para alunos.

4 TESTES E ESCOLHA DOS COMPONENTES

Como foi definido o uso da placa Arduino e do ambiente MATLAB para processar os dados obtidos pelo sensor, implementar as equações de controle e construir gráficos para a visualização dos resultados, buscou-se por componentes fáceis de instalar e utilizar com o Arduino.

Ao longo do desenvolvimento desse projeto, algumas adaptações e substituições foram feitas nos componentes para que eles pudessem funcionar em equilíbrio. Neste capítulo, serão mencionadas quais foram essas adaptações e quais características foram importantes para o ajuste final que possibilitou o funcionamento do controlador.

4.1 COMPONENTES

Abaixo, estão listados os componentes escolhidos e quais foram os critérios utilizados para a escolha deles.

4.1.1 Bomba d'água

A bomba d'água adquirida foi o modelo ZYW680 (Figura 4.1). Ela utiliza uma tensão DC de 12V com 19W de potência e possui uma vazão de 800L/h. Esse modelo fornece um bom desempenho por um baixo custo se comparado com outras bombas.

Figura 4.1 - Bomba d'água



Fonte: A autora.

Especificações técnicas:

- Modelo: ZYW680;
- Tensão nominal: 12Vcc;
- Potência: 19W;

- Fluxo: 800L/h;
- Altura máxima de elevação: 5m

4.1.2 Sensor ultrassônico

A primeira alternativa encontrada para o sensor de nível foi o módulo Sensor Ultrassônico JSN-SR04M (Figura 4.2). Ele possui precisão para medir distâncias entre 20 cm à 200 cm de um objeto e chamou atenção por ser à prova d'água, o que poderia vim a ser útil devido às características deste projeto. Além disso, sua conexão é muito semelhante com a do módulo sensor de distância HC-SR04, possuindo a mesma pinagem (VCC: alimentação de 5V; TRIG: entrada de pulso; ECHO: saída de pulso; GND: terra) e podendo ser ligado diretamente ao Arduino e energizado por 5V.

Figura 4.2 - Módulo sensor ultrassônico a prova d'água.



Fonte: Saravati, 2024.

4.1.3 Tanque d'água

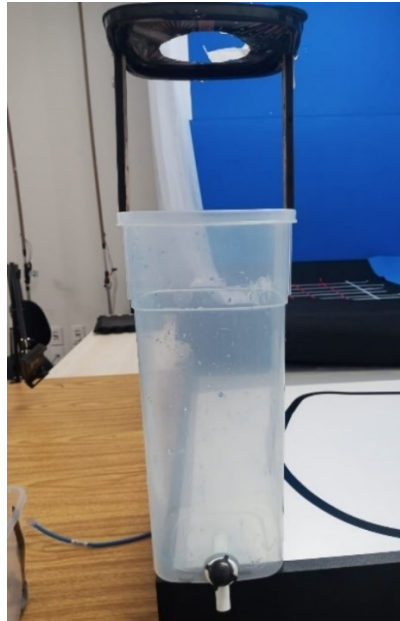
Após analisar os preços de alguns recipientes, constatou-se que a princípio o recipiente de acrílico poderia gerar um custo desnecessário para o protótipo, podendo ser substituído por um recipiente de plástico transparente. Assim, considerando o baixo custo, o recipiente escolhido para ser o tanque de controle de nível de água é mostrado na Figura 4.3.

Foi construído um suporte para fixar o sensor ultrassônico em cima do tanque, garantido uma distância de pelo menos 20 cm da coluna de água.

Especificações técnicas:

- Material: Polipropileno Plástico;
- Dimensão (comprimento x largura x altura): (21,7 x 10,5 x 12,0 cm).

Figura 4.3 - Tanque de controle.

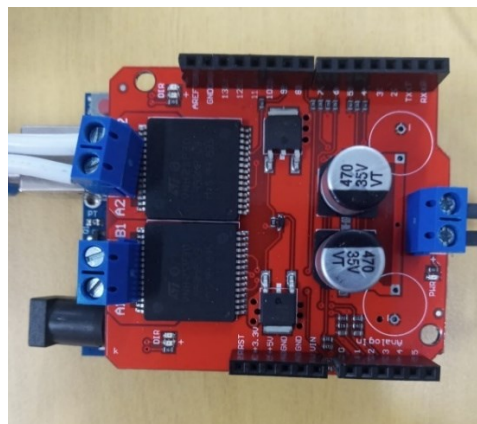


Fonte: A autora.

4.1.4 Módulo ponte h

Para controlar a bomba d'água utilizando o Arduino foi necessário adquirir um módulo ponte H capaz de controlar motores DC de alta corrente, como é o caso do motor da bomba. Após testar alguns modelos de módulos ponte h, o que primeiro permitiu um bom funcionamento da bomba foi o Monster Moto Shield (Figura 4.4). Esse é um Driver Ponte H que possui duas pontes H baseadas no chip VN12SP30. Sua saída fornece até 30A de corrente e pode ser alimentado com até 16V de tensão, ou seja, ele é capaz de acionar motores DC que operam com até 16V, dependendo da fonte de alimentação da placa. Outros modelos testados, como o Mini Módulo Ponte H L298N e o Mini Módulo Ponte H L293D, não foram capazes de fornecer tensão e corrente suficientes para acionar a bomba em sua potência máxima.

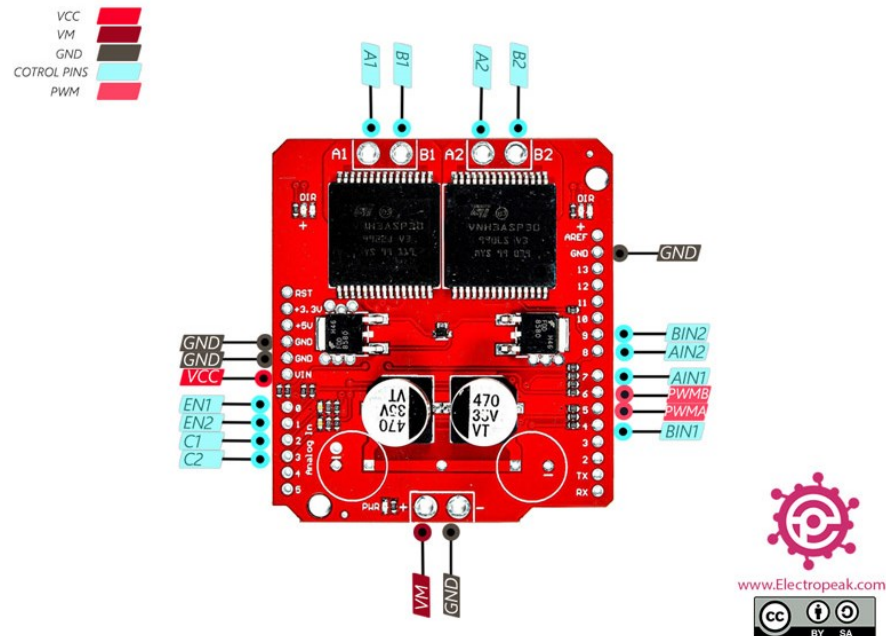
Figura 4.4 - Módulo Ponte H, Monster Moto Shield.



Fonte: A autora.

A Figura 4.5 mostra os principais pinos responsáveis pela ligação e controle de motores DC de alta corrente. Os pares de pinos (A1, B1) e (A2, B2) são as entradas dos motores, MOTOR1 e MOTOR2, respectivamente. Portanto, este módulo consegue alimentar até dois motores DC ao mesmo tempo (Electropeak).

Figura 4.5 - Esquemático da placa Monster Motor Shield.



Fonte: (Electropeak, 2024).

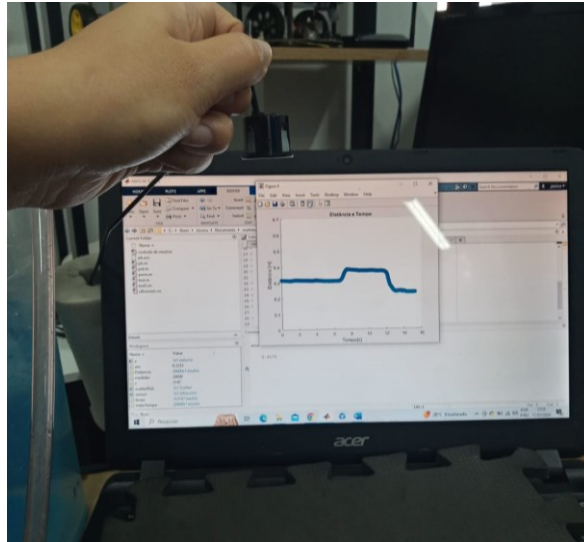
Os pinos responsáveis pelo controle do MOTOR1 são os pinos 8, 7 e 5, indicados na figura como AIN2, AIN1 E PWMA, respectivamente. Os pinos AIN2 e AIN1 devem ser ligados alternadamente em nível lógico alto (5V) e em nível lógico baixo (0V) para alternar a direção de rotação do MOTOR1. Já o pino PWMA, recebe o sinal PWM responsável pelo controle da potência do MOTOR1. Por fim, para o controle do MOTOR2, a placa possui os pinos 9, 4 e 6, cuja nomenclatura e funções são semelhantes às dos pinos responsáveis pelo controle do MOTOR1.

A fonte de alimentação do motor deve ser ligada nos pinos VM e GND, respeitando uma tensão máxima de 16V e, por fim, a placa é alimentada pelo pino VCC com 5V de tensão.

4.2 TESTES

A Figura 4.6 ilustra um dos testes realizados com o sensor ultrassônico. O sensor está medindo a distância entre ele e a superfície da mesa. O gráfico de dispersão visto na imagem auxilia na representação dos resultados, facilitando a detecção de variações ou ruídos que prejudicariam o funcionamento do projeto.

Figura 4.6 - Análise do funcionamento do sensor ultrassônico.



Fonte: A autora.

Uma das características desejadas para um sistema de controle de nível é que o tempo de resposta do controlador seja rápido, por isso a taxa de variação do nível deve ser satisfatória. Contudo, a taxa de variação do nível depende da área da base do recipiente e da capacidade de vazão da bomba e da válvula por onde escorre o líquido.

No decorrer deste trabalho, percebeu-se a importância do bom desempenho da bomba d'água, mais especificamente, buscando uma boa taxa de vazão, pois isso afetaria consideravelmente a escolha do tanque d'água, já que, uma taxa de vazão muito pequena em relação às dimensões do recipiente que seria preenchido prejudicaria o funcionamento correto do controlador, pois o mesmo poderia entrar em estado de saturação devido às restrições da bomba d'água que limitariam o alcance do sinal de controle que o controlador PID poderia enviar. Felizmente, a bomba d'água escolhida obteve um bom custo-benefício, pois bombas com custos menores forneceriam uma vazão menor, restringindo ainda mais as características dos demais componentes.

Na ilustração da Figura 3.1, o recipiente onde será aplicado o controle de nível é representado pelo Tanque 1. A escolha das dimensões desse tanque foi feita a partir de testes e simulações, com todos os outros componentes já instalados e o código preliminar do controlador já implementado no MATLAB. O sensor ultrassônico foi alinhado em cima do tanque para medir a distância entre ele e a superfície da água. Também, instalou-se uma torneira para controlar o fluxo de água que cairia no Tanque 2.

A válvula por onde escorre a água que cai no Tanque 2, foi fixada em uma posição, de modo que não houve mudanças significativas no fluxo de água deste componente, dessa forma, como a vazão da bomba é limitada a 800L/h, a taxa de variação do nível depende apenas da

área da base do recipiente. Ou seja, essa área não deve ser grande a ponto de atrapalhar a dinâmica do processo de controle.

A Figura 4.7 exemplifica todos os recipientes que foram examinados. O recipiente da extremidade esquerda foi o primeiro a ser testado. Esse acabou sendo muito pequeno, pois, mesmo com a torneira toda aberta, a água transbordava facilmente quando a bomba ultrapassava metade da sua potência máxima, limitando o alcance do sinal de controle. A alternativa foi experimentar um tanque com diâmetro mais largo, como o recipiente do meio. Porém, esse tanque exigiu ganhos muito altos do PID, com isso, o controlador precisou enviar uma potência maior do que a bomba poderia fornecer para tentar aumentar a vazão e entrou em estado de saturação, pois a vazão máxima da bomba não foi suficiente para aumentar rapidamente o nível do tanque e diminuir o erro. Dessa forma, optou-se, nesse momento, por utilizar um tanque mais alto e estreito, como o último tanque da direita, pois, utilizar uma bomba com maior vazão geraria um maior custo para o protótipo.

Figura 4.7 - Dimensões dos tanques.



Fonte: A autora.

Com a escolha do tanque o sensor ultrassônico apresentou muitos erros de medição, pois ele precisava ficar suficientemente alto, segundo o fabricante, a uma distância de 25 centímetros do objeto. Assim, devido a largura estreita do tanque, as ondas ultrassônicas do sensor batiam nas paredes do recipiente antes que chegassem ao fundo, pois a altura do sensor aumentou a largura de feixe do sinal ultrassônico.

Para amenizar a interferência causado pela largura estreita do tanque d'água, cogitou-se utilizar outros sensores, por exemplo, o sensor de pressão diferencial ou o sensor de força resistivo. Apesar do sensor de pressão diferencial oferece uma alta exatidão de medição, ele

não era viável devido ao tamanho pequeno do tanque e da altura da coluna de água que não gerariam grandes diferenças de pressão.

A solução encontrada para impedir que as paredes do reservatório interferissem na medição do nível de água foi diminuir a largura do feixe do sensor ultrassônico com o uso de uma espuma. A espuma foi capaz de eliminar os ruídos ultrassônicos refletidos pelas paredes do reservatório, simulando uma espuma acústica (Vibrasom, 2022).

O sensor foi envolvido por uma espuma em forma de cilindro oco (Figura 4.8), deixando uma abertura para que somente ondas perpendiculares ao fundo do tanque pudessem se deslocar do sensor para a água e da água para o sensor. Sendo assim, a espuma criou uma barreira para as ondas sonoras que se propagavam diagonalmente em direção ao sensor e um caminho onde somente as ondas refletidas do fundo do tanque pudessem atravessar (Figura 4.9).

Figura 4.8 - Espuma em volta do sensor ultrassônico.



Fonte: A autora.

Figura 4.9 - Sensor ultrassônico posicionado em cima do tanque.



Fonte: A autora.

4.3 VISÃO GERAL

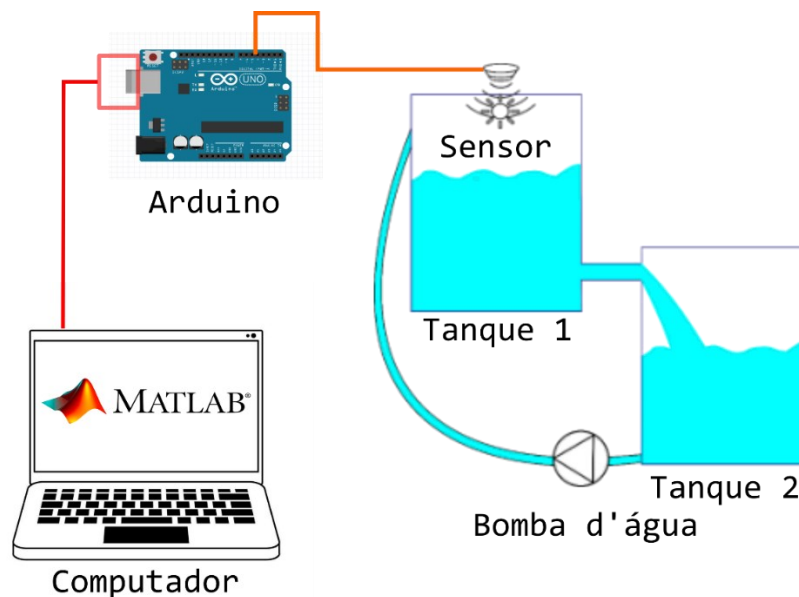
A Figura 4.10 ilustra a estrutura do sistema desenvolvido nesse projeto. Pela válvula, a água escorre do tanque 1 para o tanque 2 e depois é bombeada de volta para o tanque 1. O sensor ultrassônico conectado ao Arduino mede o tempo que a onda ultrassônica leva para viajar em direção a lâmina de água e voltar para o sensor. Esse tempo é enviado da placa Arduino para o software MATLAB instalado no computador, e com esse dado o MATLAB calcula a distância entre o sensor e lâmina de água.

Pela programação, o MATLAB calcula a altura da coluna de água do tanque 1, que corresponde a diferença entre a distância entre o sensor e a lâmina e a distância entre o sensor e o fundo do tanque.

Com o PID implementado no MATLAB, o programador escolhe a variável de entrada, que é a altura desejada para o nível de água do tanque 1. O objetivo do controlador é fazer o nível de água do tanque 1 (variável de saída) se igualar ao valor da altura desejada (referência).

Com valor do erro entre a variável de entrada e a variável de saída, o controlador calcula o valor de tensão PWM que deve ser aplicado na bomba, ou seja, o MATLAB fornecerá o valor de tensão que o Arduino deverá aplicar na bomba para que ela aumente ou diminua a vazão de água que vai para o tanque 1. Com o MATLAB também será possível visualizar o comportamento do sistema por meio de análises gráficas.

Figura 4.10 – Diagrama do sistema idealizado.



Fonte: A autora.

Na estrutura final, foi adaptado um suporte para manter o sensor fixo em cima do Tanque 1 e um recipiente de plástico para o ser o Tanque 2, com um apoio para o Tanque 1. Depois da ligação e conexão dos componentes, segue a apresentação do protótipo na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Montagem final do protótipo.



Fonte: A autora.

5 PROGRAMAÇÃO

Como um dos objetivos deste trabalho era utilizar a plataforma MATLAB para a implementação do controlador PID, foi necessário instalar o pacote Arduino dentro da plataforma MATLAB para facilitar a comunicação com a placa Arduino. Algumas funções contidas nesse pacote, como as que fazem parte da biblioteca ‘Ultrasonic’, foram de extrema importância para a construção do código implementado na plataforma MATLAB.

A programação se desenvolveu em etapas separadas, que por fim se somaram e resultaram no programa final. As primeiras linhas do código foram escritas para testar o desempenho do sensor ultrassônico nas medições de distâncias entre ele e um obstáculo, como uma coluna de água. Após isso, as atenções se voltaram para a instalação da bomba d’água e para o controle PWM, que seria a base para aplicar o controle PID.

5.1 SENSOR ULTRASÔNICO

O sensor ultrassônico foi o primeiro *hardware* desse projeto a ser testado por comandos do MATLAB, o que também permitiu fazer as primeiras interações entre o MATLAB e a placa Arduino.

O pacote de suporte do Matlab para a interação com o Arduino oferece a biblioteca Ultrasonic que permitiu medir a distância até um objeto com o sensor ultrassônico.

No programa, primeiramente, especifica-se a conexão com o *hardware* Arduino por meio de um objeto e define-se a biblioteca Ultrasonic como parâmetro da função:

```
a = arduino('com3', 'uno', 'libraries', 'Ultrasonic');
```

O objeto ‘a’ recebe as seguintes propriedades:

- Porta: porta COM3 onde o Arduino está conectado;
- Modelo: modelo Arduino Uno;
- Biblioteca: biblioteca ‘Ultrasonic’.

Em outra linha de código, são definidas as portas da placa Arduino onde os pinos *Trigger* e *Echo* estão conectados:

```
sensor = ultrasonic (a, 'D2', 'D3');
```

No código acima são especificadas as seguintes propriedades do objeto ‘sensor’:

- Objeto arduino: objeto ‘a’ que representa a placa arduino;

- Pino trigger: entrada/saída digital D2, onde está conectado o pino trigger do sensor;
- Pino Echo: Entrada/saída D3, onde está conectado o pino Echo do sensor.

A função `readDistance()` mede o valor da distância de um objeto que está na frente do sensor ultrassônico (`ReadDistance`). Assim, no código escreve-se a função, tendo como parâmetro o objeto 'sensor':

```
readDistance(sensor).
```

A função `readDistance(sensor)` é capaz de fornecer a distância entre o sensor e a coluna de água dentro tanque, sendo assim, para saber a altura do nível de água dentro do tanque basta subtrair a distância entre o sensor e o fundo do tanque sobre a distância medida entre o sensor e coluna de água:

$$\text{Altura nível de água} = \text{distância entre sensor e fundo do tanque} - \text{distância entre sensor e coluna de água}$$

A distância entre o sensor e a coluna de água varia durante a simulação do controlador e por isso seu valor é medido a cada repetição do cálculo da altura da coluna de água, dentro de um loop.

Como a distância entre o sensor e o fundo do tanque é uma constante, ela pode ser medida fisicamente com um instrumento de medida, porém, preferiu-se obtê-la por meio do próprio sensor ultrassônico, pois assim seu valor estaria, também, sujeito as imprecisões geradas pelo sensor, bem como o valor medido da distância entre o sensor e a coluna de água.

5.2 CONTROLE PWM DA BOMBA D'ÁGUA

A bomba d'água foi ligada na saída do MOTOR2 do módulo ponte h, que se refere aos pinos A2 e B2. Para acionar esta saída, o sinal de controle deve ser enviado para a entrada digital do pino 6 da placa Monster Motor Shield e uma fonte de 12V deve ser utilizada para fornecer a tensão e a corrente necessária para alimentar a bomba.

O MATLAB possui a função `writePWMVoltage(a, pin, voltage)`, responsável por gerar um valor de tensão em um pino digital PWM do hardware Arduino. Nessa função deve-se especificar entre parênteses, respectivamente, o objeto que representa a conexão com o hardware Arduino, o pino que será acionado pelo sinal PWM e o valor de tensão PWM que deve estar entre 0V-5V.

As Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 indicam a vazão na saída da mangueira conectada a bomba d'água, utilizando tensão PWM de 5,0 V, 3,0 V e 1,5 V, respectivamente.

Figura 5.1 - Vazão com PWM de 5,0 V.



Fonte: A autora.

Figura 5.2 - Vazão com PWM de 3,0 V.



Fonte: A autora.

Figura 5.3 - Vazão com PWM de 1,5 V.



Fonte: A autora.

5.3 FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR PID

Neste trabalho, o controlador PID foi programado manualmente utilizando fórmulas matemáticas para o cálculo do erro e para o cálculo e a soma das componentes que correspondem as ações proporcional, integral e derivativo.

Primeiramente, chegou-se ao valor do erro, subtraindo a saída dada pelo sensor do valor de entrada que corresponde à altura desejada para o nível do tanque. A variável de entrada foi expressa no início da programação. O erro foi expresso pela Equação (5.1).

$$\text{erro} = \text{alturaDesejada} \times \text{alturaMedida} \quad (5.1)$$

As componentes das ações proporcional, integral e derivativa são obtidas a partir do valor do erro e do valor das constantes K_p , K_i e K_d utilizadas para a sintonia do controlador. O valor dessas constantes foi decidido após finalizar todo o código, por meio da sintonia do controlador.

A ação proporcional deve ser proporcional ao erro e é calculada como o valor do erro vezes a constante K_p , ou seja, como indicado pela Equação (5.2).

$$\text{açãoProporcional} = \text{erro} \times K_p \quad (5.2)$$

Para entender melhor a ação integral dentro do código do controlador implementado, definiu-se, primeiramente, um intervalo de tempo Δx para cada interação dentro de um loop. Sendo Δx uma constante, ou seja, como indicado pela Equação (5.3).

$$\Delta x = (t_2 - t_1) = (t_3 - t_2) = (t_4 - t_3) = \dots (t_n - t_{n-1}), \quad (5.3)$$

para um número muito grande de interações separadas em um intervalo de tempo pequeno $[a,b]$, podemos aproximar a integral do erro em função do tempo como um somatório de Riemann, que é a soma de todos os erros vezes Δx , ou seja, como indicado pela Equação (5.4).

$$\int_b^a e(t) dt \cong (e(t)_1 \times \Delta x) + (e(t)_2 \times \Delta x) + \dots + (e(t)_n \times \Delta x). \quad (5.4)$$

Para criar esse somatório dentro de um loop programado no MATLAB, a ação integral do controlador PID foi programada pela Equação (5.5).

$$\text{açãoIntegral} = (\text{integralPassada} + \text{erro} \times \Delta x) \times K_i. \quad (5.5)$$

A variável `integralPassada` guardar o valor da açãoIntegral calculado na interação passada. Isso significa que no final de cada interação deve-se atualizar o valor da variável `integralPassada` para o novo valor da açãoIntegral, para que assim esse valor possa ser usado na próxima interação.

Por fim, a ação derivativa é proporcional a variação do erro, o que significa que se a altura medida pelo sensor começar a variar bruscamente em um curto intervalo de tempo, esse controle irá atuar mais ativamente assim que o erro começar a variar. Quanto maior a variação do erro em um dado período de tempo, maior a sua ação. Assim, Equação (5.6) foi aplicada para produzir esse controle.

$$\text{açãoDerivativa} = ((\text{erro} - \text{erroPassado}) \div \Delta x) \times Kd. \quad (5.6)$$

Na equação acima, a variável erroPassado é utilizada para guardar o erro calculado na interação passada, portanto esse valor é atualizado no final de cada interação para que o erro presente possa ser utilizado na interação futura.

5.4 MÉDIA MÓVEL

Para tratar os ruídos do sensor ultrassônico, utilizou-se uma média móvel, cuja função é calcular a média das últimas leituras do sensor relacionados à distância. A ideia fundamental é sempre manter um vetor com N leituras atualizado, sendo aqui exemplificado para 3 leituras:

1. A primeira leitura de distância é preenchida nas 3 posições do vetor.

$$\text{vetorDistancia} = (v1 \ v1 \ v1); \quad (5.7)$$

2. A cada interação, os valores do vetor recebem um “shift”, ou seja, um deslocamento para direita, sendo o valor da 3ª posição descartado. A nova leitura armazena o valor na 1ª posição, como exemplificado em (5.9), (5.10) e (5.11).

$$\text{vetorDistancia} = (v2 \ v1 \ v1); \quad (5.9)$$

$$\text{vetorDistancia} = (v3 \ v2 \ v1); \quad (5.10)$$

$$\text{vetorDistancia} = (v4 \ v3 \ v2); \quad (5.11)$$

3. Em cada interação, é realizada a média aritmética simples dos três valores que ocupam as três posições dentro do vetorDistancia, o resultado é apresentado como a distância medida pelo sensor, como indicado por (5.12).

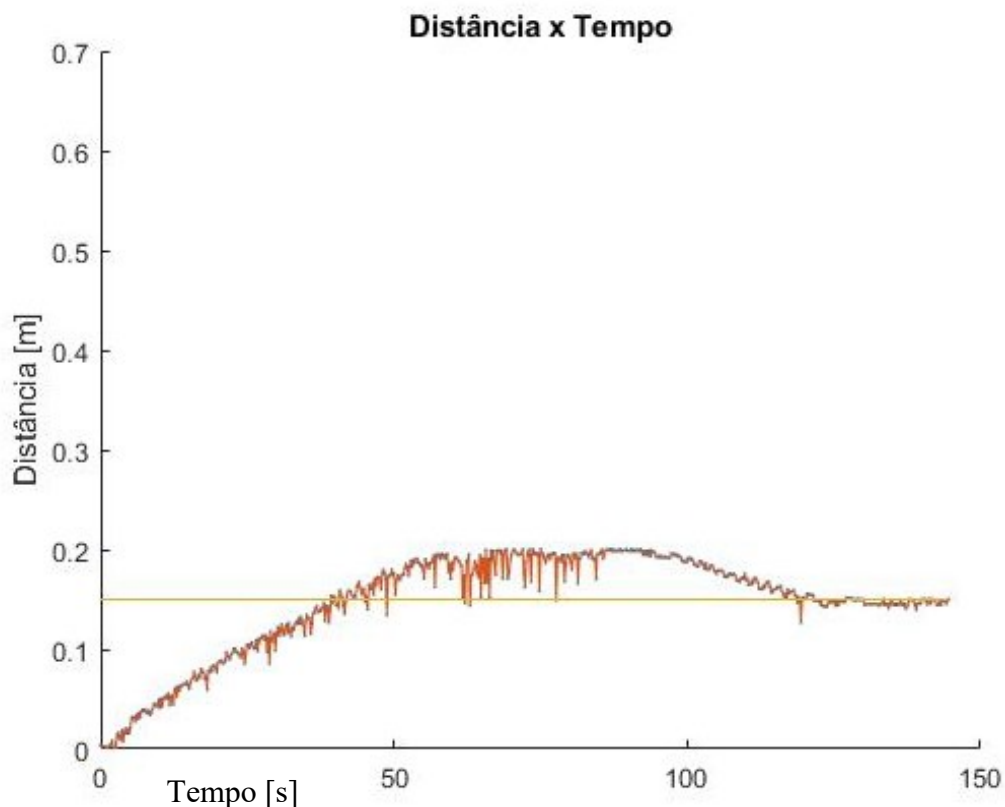
$$\text{distancia} = (v3 + v2 + v1) \div 3; \quad (5.12)$$

Quanto maior o tamanho do vetor e do número de leituras utilizadas para a média, menor será o impacto que uma leitura errada terá na ação de controle. Contudo, o resultado demorará mais para convergir para o valor final e não reagirá a mudanças súbita do nível da água.

6 RESULTADOS

Para se chegar nos resultados apresentados a seguir foi preciso fazer a média móvel da distância medida pelo sensor e assim amenizar os ruídos produzidos durante as simulações. A Figura 6.1 mostra uma simulação onde percebe-se que a quantidade de ruídos presente estava atrapalhando a visualização do desempenho do controlador.

Figura 6.1 - Variação da altura do nível de água com ruídos.

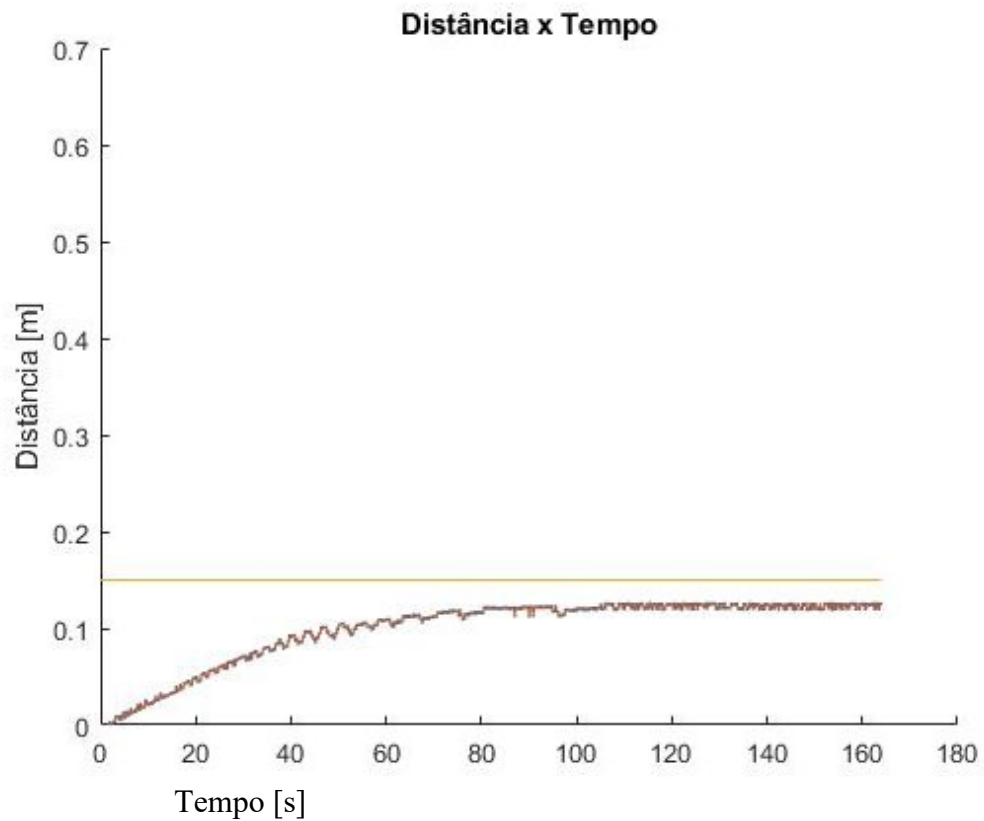


Fonte: A autora.

O controlador foi implementado no MATLAB e os primeiros testes foram realizados aumentando a constante K_p até o ponto em que a saída se aproximou do *set point*, ou seja, a altura do nível de água se aproximou do valor desejado, que neste experimento foi definido como 15 cm.

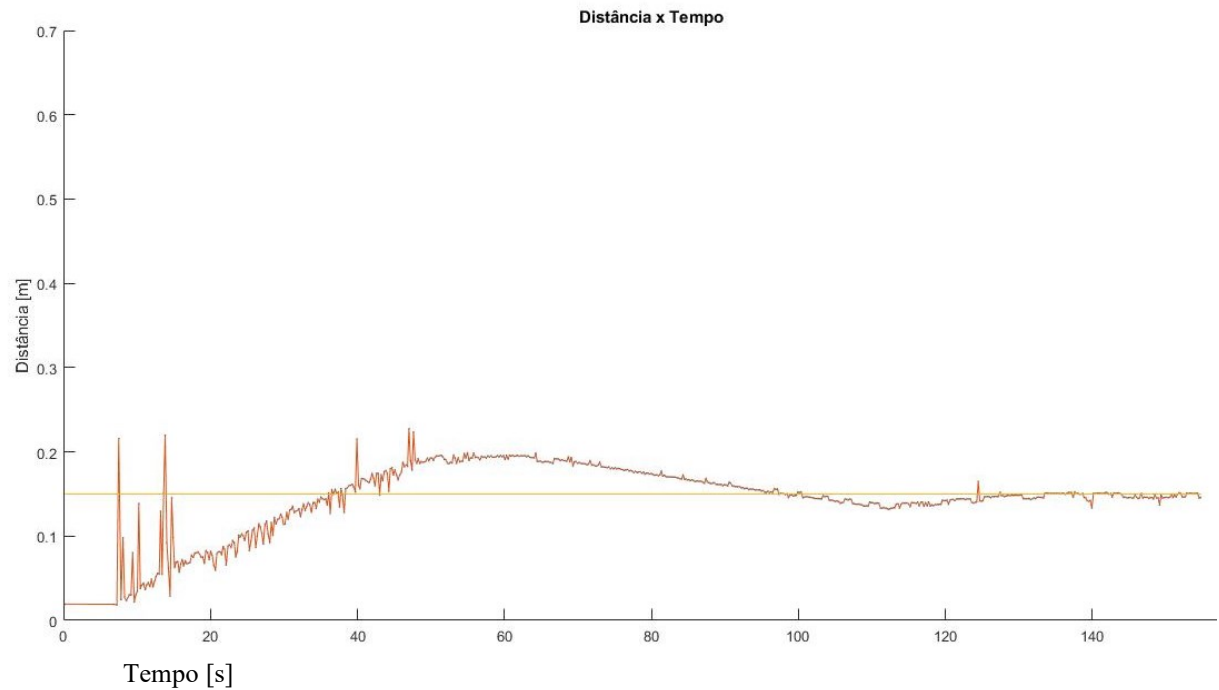
A Figura 6.2 mostra a altura do tanque em metros (m) em função do tempo em segundos (s). Observa-se que somente com o uso da constante K_p , a saída se aproximou da altura desejada, porém, mantendo um valor de erro *off set* bastante alto. Esse resultado, foi obtido simulando o controle proporcional com uma constante $K_p = 60$. Nesse momento, aumentar mais o termo proporcional desestabilizaria o sistema, devido ao alto sinal de saída que seria gerado, sendo assim, aumentou-se a constante K_i para tentar compensar o erro produzido pelo controle proporcional. O resultado está representado no Figura 6.3.

Figura 6.2 - Controle proporcional.



Fonte: A autora.

Figura 6.3 - Controle proporcional e integral.

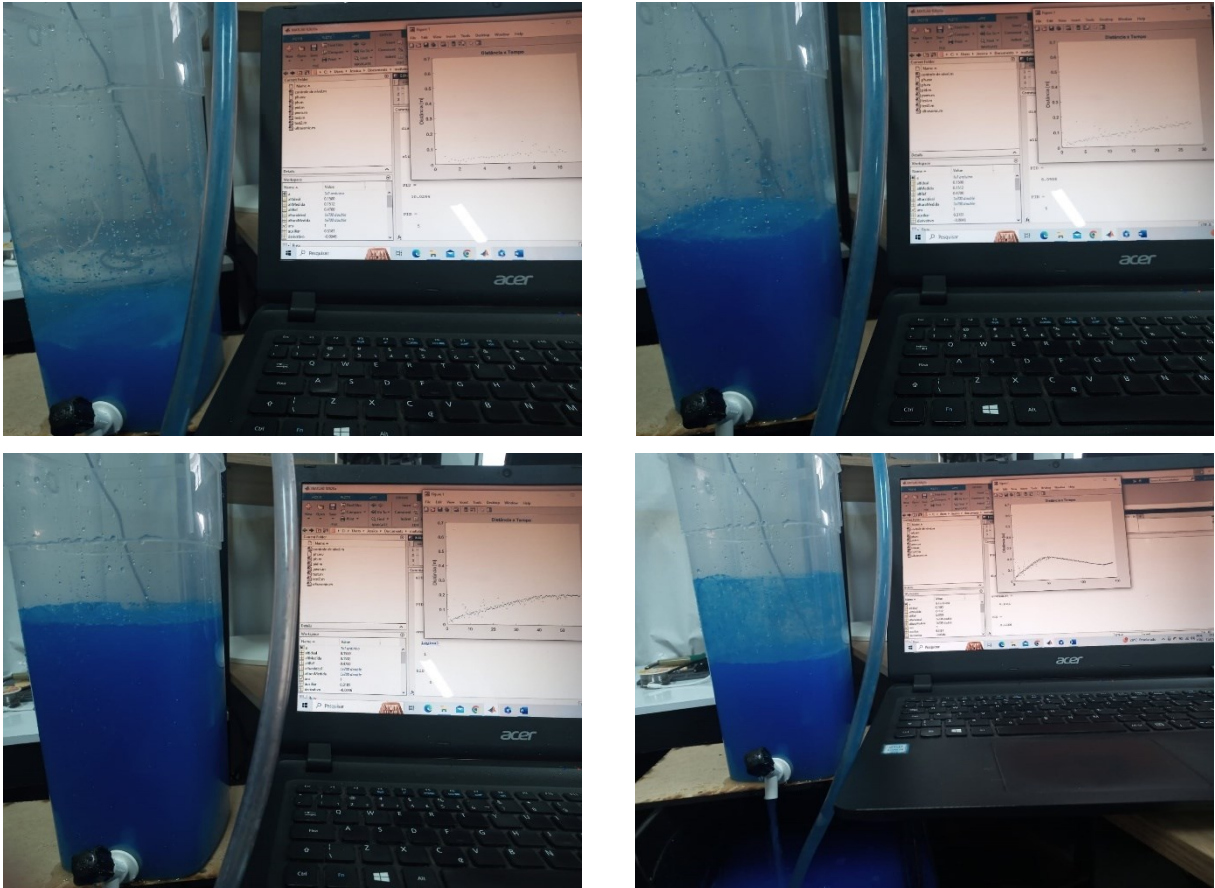


Fonte: A autora

Aplicando o controlador PI, com as constantes $K_p = 60$ e $K_i = 10$, a variável controlada ultrapassou a referência, produzindo um *overshoot* durante o tempo de resposta transiente.

Depois, apesar dos ruídos do sensor ultrassônico, o nível de água conseguiu se estabilizar em torno do valor de referência. A Figura 6.4 indica a variação do nível de água no Tanque 1 durante uma das simulações.

Figura 6.4 - Variação do nível de água feita pelo controle PI.



Fonte: A autora.

Recolhendo uma amostra de 10 simulações executadas sequencialmente, o controle PI conseguiu resultados positivos numa taxa de 100%, minimizando o erro de estado estacionário, apesar dos ruídos gerados pelo sensor. Essa conclusão foi validada pelo baixo tempo médio que o sistema demorou para se estabilizar durante as simulações. A Tabela 6.1 apresenta o tempo coletado em cada simulação juntamente com a média.

Tabela 6.1 - Duração média para estabilizar em torno do *set point*.

	Tempo (s)
Experimento 1	135
Experimento 2	123
Experimento 3	125
Experimento 4	121
Experimento 5	128

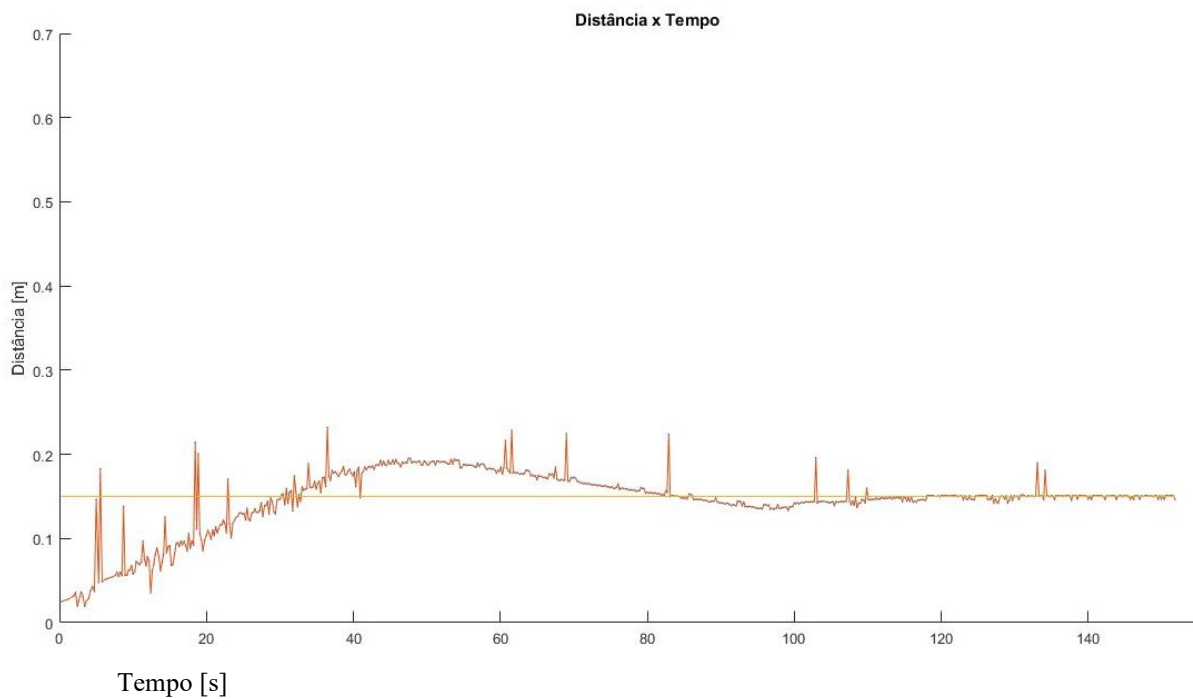
Experimento 6	124
Experimento 7	131
Experimento 8	127
Experimento 9	124
Experimento 10	129
Média Total	126,7

Fonte: A autora.

Com a aplicação do controle PID, tornando a variável K_d não nula, não foi percebida variações na resposta do controlador. Isso porque o sistema de controle de nível já possui uma velocidade de resposta rápida, não havendo a necessidade de antecipar a resposta ao erro. Sendo assim, a ação derivativa pode ser desativada.

A Figura 6.5 apresenta a resposta do controlador PID, com $K_p = 60$, $K_i = 10$ e $K_d = 10$.

Figura 6.5 - Controle proporcional, integral e derivativo.



Fonte: A autora.

7 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou o comportamento de um controlador PID em um sistema real de controle de nível de água. O estudo da teoria de sistemas de controle, dos materiais e de trabalhos relacionados contribuiu para a elaboração do sistema, começando pela escolha dos materiais, levando em consideração o baixo custo. Após os estudos, começou-se a etapa de desenvolvimento, fazendo a compra dos componentes e a elaboração de testes para verificar o funcionamento em conjunto dos mesmos e, a partir disso, realizar as correções. Por fim, o controlador foi implementado no MATLAB e o comportamento da saída do sistema pode ser observado e analisado em gráficos.

Finalizado esse trabalho, o sistema de controle de nível desenvolvido conseguiu ilustrar um sistema de controle com parâmetros reais e com desempenho satisfatório. Espera-se que haja contribuição para o aprendizado prático das teorias de controle e das técnicas de correção de falhas em processos industriais, alcançando uma maior qualidade no estudo da implementação de técnicas de controle PID. Sendo assim, os estudantes da Universidade Federal de Uberlândia campus Patos de Minas poderão se beneficiar desse trabalho pela visualização em um sistema real dos efeitos de um controlador sujeito aos distúrbios do meio.

Vivenciar situações semelhantes com aquelas encontradas dentro do mercado de trabalho torna o estudante mais capacitado para implementar métodos de controle mais avançados, dessa forma, a planta didática desenvolvida oferecerá essa oportunidade.

O sistema desenvolvido também será uma opção de baixo custo para esse tipo de estudo, visto que as unidades didáticas para controle de nível disponíveis no mercado são de difícil acesso devido ao alto valor. Portanto, será oferecida uma opção que poderá ser desenvolvida para o ensino sem que haja grandes gastos.

Algumas contribuições para a melhoria deste projeto em trabalhos futuros incluem testar outros métodos de sintonia PID ou outros tipos de controladores, a troca da bomba de água ou a utilização de mais de uma bomba para melhorar a vazão e evitar a saturação em regime transitório e, por fim, o uso de sensores mais precisos e que causem menos ruídos.

REFERÊNCIAS

- ANG, Kiam H.; CHONG, Gregory. *PID Control System Analysis, Design, and Technology*. IEEE, 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1453566>. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- ARDUINO. Getting Started with Arduino. 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/getting-started-arduino>. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- ARDUINO. Using the Arduino Software (IDE). 2022b. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/the-arduino-software-ide>. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- ARDUINO. Bootloader. 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/retired/hacking/software/Bootloader/>. Acesso em: 20 de julho de 2024.
- Casa das Válvulas. O QUE É UM ATUADOR DE VÁLVULA E COMO ELE FUNCIONA? 2022. Disponível em: <https://casadasvalvulasmg.com.br/atuador-de-valvula-e-como-ele-funciona/#:~:text=O%20atuador%20de%20v%C3%A1lvula%20pode,que%20foi%20inserido%20pelo%20operador>. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- Dienzo. KIT DIDÁTICO - CTN 3000 RACK - CONTROLE DE NÍVEL. Disponível em: <https://www.dienzo.com.br/produtos/kit-didatico-ctn-3000-rack-controle-de-nivel>. Acesso em: 24 de julho de 2022.
- Electropeak. Interfacing VNH2SP30 Monster Motor Shield with Arduino. Disponível em: https://electropeak.com/learn/interfacing-vnh2sp30-monster-motor-driver-shield-with-arduino/#google_vignette. Acesso em: 20 de janeiro de 2024.
- Exsto. Kit Didático para Controle de Nível, Vazão e Temperatura. Disponível em: <https://exsto.com.br/kitdidatico/automacao-ind/xc229-nivel-vazao-temperatura>. Acesso em: 24 de julho de 2022.
- HOWIMANPORN, Suppachai; CHOOKAEW, Sasithorn; SOOTKANEUNG, Warin. *Design of PLC for Water Level Control Employing Swarm Optimization-Based PID Gain Scheduling*. IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8534490>. Acesso em: 05 de junho de 2022.
- JARDIM, Izaac V. **Sistema didático de controle de nível em tanques acoplados**, 2019. UFES, Vitória.
- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno, 5ª. ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2010.
- PEREIRA, Amanda L.; POZAS, Luis F.; ROMERO, Roddy. **Desenvolvimento de kit didático de controle de nível para um sistema tanque simples**, 2021. IFSC, Itajaí.
- PULCHERIO, Felipe S. **Controle de nível PID inferencial em tanque com utilização de Arduino**, 2021. UFMT, Cuiabá.
- ReadDistance. **MathWorks**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/supportpkg/readdistance.html>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

SENAI. Kit de Controle de Nível. Disponível em: <https://senaiweb.fieb.org.br/KitsDidaticos/kits/kit-de-controle-de-nivel/>. Acesso em: 15 de julho de 2022.

SHAIKH, Hafiz M.; KULKARNI, N. R. *Perception on PSO, Fuzzy and Fuzzy-PID for Water Level Control of Coupled Tank System*, IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9105695>. Acesso em: 05 de junho de 2022.

SILVEIRA, Cristiano B. Sensor de Nível: 10 Tipos Diferentes para Aplicar na Indústria. 2018. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/sensor-de-nivel/>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

Vibrasom. Como funciona a espuma acústica? 2022. Disponível em: <https://vibrasom.ind.br/blog/como-funciona-a-espuma-acustica/>. Acesso em 03 de fevereiro de 2024.