



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS



LARA ELISA PEREIRA REIS

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE CONTROLE DE NÍVEL BASEADO
EM ARDUINO: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO SENSOR ULTRASSÔNICO

Patos de Minas

2024

LARA ELISA PEREIRA REIS

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE CONTROLE DE NÍVEL BASEADO
EM ARDUINO: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO SENSOR ULTRASSÔNICO

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Thomás Valente de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini

Patos de Minas

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



HOMOLOGAÇÃO Nº 115

LARA ELISA PEREIRA REIS

**Desenvolvimento de um protótipo de controle de nível baseado em arduíno:
uma abordagem utilizando sensor ultrassônico**

Projeto Final de Curso aprovado nesta data para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus* Patos de Minas (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Thomás Valente de Oliveira
Orientador - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
Coorientador - FEELT/UFU

Prof.ª Dr.ª Marieli de Lima
FEQUI/UFU

Prof.ª Dr.ª Marta Fernanda Zotarelli
FEQUI/UFU

Patos de Minas, 1º de novembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Thomás Valente de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/11/2024, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marta Fernanda Zotarelli, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/11/2024, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marieli de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/11/2024, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Luiz Lima Bertarini, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/11/2024, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5841204** e o código CRC **3C97397D**.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio e pelo exemplo de resiliência. Essa conquista é para vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Geraldo Magela dos Reis, por ser o meu maior apoiador, que sempre acreditou na minha capacidade. Foram momentos difíceis durante essa jornada e, em cada um deles, eu tive a sorte de ter o meu pai ao meu lado.

À minha família, em especial minha mãe, Marli, e minhas irmãs, Ana Luiza e Thayná, vocês são parte fundamental dessa conquista.

Aos meus amigos, especialmente Cristhian, Maycon e Natan, que estiveram presentes em toda a minha graduação. Esse trajeto foi mais feliz e mais leve com vocês.

Ao Gabriel Martinelli, presente nos últimos dois anos de graduação. Foi extremamente importante contar com seu apoio para esse trabalho ser concluído, sou grata por passar essa jornada ao seu lado e por dividir a vida com você.

Ao Daniel Oliveira, técnico da Eng. Eletrônica, que me auxiliou em etapas importantes do projeto, sempre com sua habitual vontade de ajudar o máximo que puder.

Ao meu orientador, Prof. Thomás Valente, pelos ensinamentos e por proporcionar a oportunidade de desenvolver um tema incomum dentro do curso, que no começo era só uma ideia abstrata na minha cabeça.

À Prof.^a Marieli de Lima, um exemplo de profissional que eu quero me tornar. Seu grande apreço ao curso eventualmente me contagiou também.

Aos professores e técnicos da Engenharia de Alimentos, que me guiaram por todos esses anos, repassando seus conhecimentos teóricos e ensinamentos que levarei para a vida. Especialmente, agradeço aos que participaram de momentos importantes e marcantes para mim, Willian, Michelle, Marta Zotarelli, Henrique, Fabrícia, Daniele Loredó e Carla Guidini. Também agradeço ao Diego Bernardes, pelo suporte e empenho em resolver todo e qualquer tipo de problema relacionado ao curso.

À PROAE, em suas representantes Carolina e Daniela, pelo suporte emocional e pela bolsa de assistência estudantil. À Cilésia, da PROGRAD, pelos ensinamentos sobre a vida fora da sala de aula.

Ao programa AFIN, pelo acesso ao curso pré-vestibular gratuito e que possibilitou a aprovação em uma universidade pública.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de cursar a graduação em Engenharia de Alimentos, através de um ensino público e de qualidade.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”

José de Alencar

Resumo

A padronização dos processos na indústria alimentícia garante qualidade e segurança. Enquanto grandes indústrias utilizam automação para controle de nível, pequenas empresas enfrentam dificuldades devido à falta de recursos financeiros. Nesse contexto, desenvolver soluções de baixo custo para controle de nível mostra-se relevante. Este estudo desenvolveu um sistema de monitoramento e controle de nível de líquidos de baixo custo, utilizando um sensor ultrassônico e a ação de controle liga-desliga, baseado em um microcontrolador Arduino. O protótipo foi montado e os dispositivos eletrônicos instalados. Um código foi desenvolvido para a calibração do sensor e, posteriormente, para a implementação da curva de calibração, que obteve coeficiente de determinação (R^2) de 0,9719. Os experimentos de validação do sistema confirmaram sua eficiência, sendo capaz de ajustar automaticamente o nível de água conforme os limites definidos pelo usuário, com erro médio de $-4,7 \pm 7,2$ % quando em operação. Além de ser economicamente acessível, o protótipo mostrou-se adequado para diversas aplicações, como setor de bebidas e alimentos viscosos, embora não seja apropriado para sistemas muito sensíveis.

Palavras-chave: Controle de nível; Automação de baixo custo; Arduino; Sensor ultrassônico; Controle Liga-Desliga.

Abstract

Standardizing processes in the food industry ensures quality and safety. While large industries use automation for level control, small businesses face challenges due to limited financial resources. In this context, developing low-cost solutions for level control is relevant. This study developed a low-cost liquid level monitoring and control system using an ultrasonic sensor and On-Off control, based on an Arduino microcontroller. The prototype was assembled and electronic devices were installed. A code was developed for sensor calibration and subsequently for implementing the calibration curve, achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.9719. System validation confirmed its efficiency, with the system automatically adjusting the water level according to user-defined limits and showing an average error of $-4.7\% \pm 7.2\%$ during operation. Besides being economically accessible, the prototype proved suitable for various applications, although it may not be appropriate for systems requiring high precision.

Keywords: Level control; Low-cost automation; Arduino; Ultrasonic sensor; On-off controller.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	PRINCÍPIO DE ATUAÇÃO DE CONTROLADORES.....	10
1.2	MICROCONTROLADOR ARDUINO.....	12
1.3	SENSOR ULTRASSÔNICO.....	12
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	METODOLOGIA.....	14
3.1	INSTALAÇÕES.....	14
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	14
3.3	CALIBRAÇÃO DO SENSOR ULTRASSÔNICO.....	18
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE LIGA-DESLIGA.....	19
3.5	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5	CONCLUSÃO.....	29
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
	MATERIAL SUPLEMENTAR: CÓDIGO DO PROGRAMA PARA CONTROLE DE NÍVEL.....	32

1 INTRODUÇÃO

A padronização de produtos e processos nas indústrias de diversos setores é um aspecto fundamental para a manutenção da satisfação de seus clientes e para a viabilidade econômica do negócio. Na indústria alimentícia, essa prática assegura a consistência da qualidade dos produtos em todas as etapas de produção, contribuindo para a segurança de alimentos, prevenindo contaminações e garantindo que os alimentos sejam seguros para o consumo. Além disso, a uniformidade dos processos também otimiza a produção, reduzem desperdícios de tempo e recursos e facilitam procedimentos de rastreabilidade, permitindo a identificação da origem de problemas e implementação de medidas corretivas.

Nesse contexto, é necessário realizar o monitoramento e controle das variáveis de processo, garantindo o padrão de qualidade. Temperatura, pressão, vazão e nível de líquidos são variáveis comumente controladas na indústria de alimentos (Berrie, 2013; Zaggout et al., 2023). Sendo assim, em setores que utilizam materiais fluidos, como o setor de bebidas e alimentos viscosos, o controle de nível preciso dos líquidos é crucial para garantir a padronização e a eficiência do processo.

Por exemplo, em uma linha de produção de sucos, se o tanque de polpa de frutas estiver abaixo do nível padrão, o envase pode ser feito com quantidades insuficientes, comprometendo a qualidade do produto, além do desacordo com a legislação. Por outro lado, se o tanque estiver acima do nível, há risco de derramamento e excesso de preenchimento das embalagens. Portanto, para evitar os problemas citados anteriormente, são utilizados tanques de armazenamento, também conhecidos como tanques pulmão, como etapa intermediária antes do envase. Porém, existem desafios significativos no gerenciamento preciso do nível destes tanques, especialmente relacionados à automação e ao controle contínuo (Stephanopoulos, 1984).

Nas grandes indústrias, a automação é comum, sensores são utilizados para monitorar os níveis de tanques e acionar válvulas e bombas automaticamente. No entanto, pequenas empresas, muitas vezes, não dispõem de recursos para equipamentos sofisticados, como envasadoras automatizadas. Nessas situações, o controle de nível pode ser realizado de forma analógica ou mecânica, embora com uma margem de erro significativamente maior em comparação aos equipamentos automatizados, além da necessidade de operadores atuando de forma constante sobre o processo.

1.1 Princípio de atuação de controladores

De forma geral, para realizar o controle de variáveis como nível nas indústrias de alimentos, podem ser empregados controladores com componentes proporcional (P), proporcional e integrativa (PI), proporcional e derivativa (PD), proporcional, integrativa e derivativa (PID), além do controlador liga-desliga:

a. Controlador Proporcional (P): ajusta a variável controlada proporcionalmente ao erro, que é a diferença entre o valor desejado e o valor medido. Pode ser utilizado no controle de velocidade de um motor, por exemplo, e é de implementação simples. Porém, é incapaz de eliminar erros estacionários que ocorrem após mudança de *setpoint*, e não é recomendado para sistemas de ação retardada (Guimarães, 2021; Stephanopoulos, 1984).

b. Controlador Proporcional-Integral (PI): combina as características das componentes de controle proporcional (P) e integral (I). Esse tipo de controlador inclui uma ação integrativa que considera a soma dos erros anteriores, eliminando os desvios acumulados ao longo do tempo. Isso garante que a variável controlada atinja o valor desejado, atuando de forma eficaz tanto em regime transiente (graças à componente P) quanto em regime permanente (graças à componente I). Este controlador proporciona uma resposta mais suave em comparação com o controlador apenas proporcional (P) e assegura erro zero quando o processo atinge o regime permanente. Entretanto, em sistemas instáveis, a garantia de erro zero pode não se aplicar, e a ação integral pode tornar o sistema mais lento e propenso a oscilações (Guimarães, 2021; Stephanopoulos, 1984).

c. Controlador Proporcional-Derivativo (PD): combina as características das ações de controle proporcional (P) e derivativa (D). A ação proporcional atua de maneira imediata sobre o erro presente, enquanto a ação derivativa antecipa mudanças futuras baseada na taxa de variação da variável controlada, suavizando a resposta do sistema e reduzindo oscilações. Isso resulta em um sistema mais estável e com respostas rápidas. No entanto, a ação derivativa é mais sensível a ruídos do sinal do erro e a sintonia dos parâmetros das componentes proporcional e derivativa pode ser mais complexa em relação aos outros controladores (Guimarães, 2021; Stephanopoulos, 1984).

d. Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID): combina as três ações de controle: proporcional, integral e derivativa. Essa combinação permite ajustar a variável controlada de forma precisa e eficiente, minimizando o erro e melhorando a estabilidade do sistema. A sintonia dos parâmetros proporcional, integral e derivativo (ganhos de cada

componente, constante de tempo integral e constante de tempo derivativa) é fundamental para o desempenho do controlador e geralmente é feito através de métodos específicos. O controlador PID oferece vantagens como a capacidade de antecipar a ação de controle com base na taxa de variação do erro, proporcionando elevada precisão e versatilidade. No entanto, ele também apresenta desvantagens, como a falta de resposta adequada quando o erro é constante, a suscetibilidade a ruídos abruptos de alta intensidade, que podem resultar em ações de controle desnecessariamente elevadas, e a complexidade na sintonia devido ao número de parâmetros envolvidos. Devido a essas características, o controlador PID tem sido aplicado em processos industriais mais complexos, como o controle de pressão em sistemas de caldeiras (Guimarães, 2021; Stephanopoulos, 1984).

e. Controlador Liga-Desliga: Além destes, destaca-se o controlador liga/desliga, que também opera baseado no erro medido entre o *setpoint* e o valor medido da variável controlada, alternando o sistema de atuadores apenas entre os estados ligado e desligado. Durante seu funcionamento, um sensor monitora continuamente a variável de controle e envia essa informação ao controlador, que compara o valor medido ao setpoint. Se a variável medida se distanciar do valor desejado (positivamente ou negativamente) em intensidade superior ao intervalo de histerese, o sistema ativará ou desligará o sistema de atuação, sempre na mesma intensidade. Além disso, para minimizar oscilações excessivas e chaveamentos frequentes, muitos controladores liga/desliga trabalham um intervalo de histerese significativo, não alterando o estado de atuação neste intervalo ao redor do valor de setpoint. Esses controladores apresentam vantagens, como simplicidade, baixo custo e robustez. São de fácil compreensão e implementação, sendo uma solução econômica ideal para aplicações em processos mais simples. No entanto, também apresentam desvantagens, como a oscilação contínua da variável controlada, o que pode ser inaceitável em processos que exigem alta precisão. Além disso, o chaveamento frequente pode levar ao desgaste prematuro em componentes mecânicos, como relés, bombas, motores e resistências (Amaral et al., 2023; Leite, 2019).

Embora controladores como o PID ofereçam alta precisão e vantagens para a indústria de alimentos, sua sintonia pode ser bastante complexa, pois requer o ajuste dos três parâmetros (Proporcional, Integral e Derivativo), apresentando trabalhos científicos que abordam de forma aprofundada somente a sintonia. Devido a essa complexidade, optou-se pelo uso do controlador liga-desliga neste trabalho, por sua simplicidade de implementação. Além disso, o protótipo desenvolvido aborda um sistema de controle eficaz, de baixo custo e que seja simples de implementar.

1.2 Microcontrolador Arduino

Neste contexto, o microcontrolador Arduino destaca-se como uma plataforma eletrônica de prototipagem de código aberto (*open-source*). O Arduino é composto por dois componentes principais: a placa, que representa o hardware utilizado na construção de projetos, incluindo um microcontrolador Atmel e circuitos de entrada e saída; e o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) Arduino, o software onde os firmwares são escritos utilizando linguagem C/C++, para executar as tarefas de interesse (Carvalho, 2017; Makiyama, 2022; Nidejelski, 2018).

A utilização deste microcontrolador em projetos é vantajosa devido à sua linguagem de programação simples, especialmente para engenheiros, à ampla versatilidade de desenvolvimento de projetos e ao baixo custo de implementação. Além disso, devido à sua característica de código aberto, o Arduino dispõe de uma extensa documentação, que pode ser empregada em diversos contextos, evitando a necessidade de se construir a partir do zero (Carvalho, 2017; Makiyama, 2022; Nidejelski, 2018).

1.3 Sensor ultrassônico

Dentre os sensores relacionados ao Arduino, destaca-se o sensor ultrassônico, que possui a capacidade de medir distâncias por meio de ondas de ultrassom. O sensor funciona com um transmissor emitindo um sinal ultrassônico e, posteriormente, um receptor detecta o retorno desse sinal, conhecido como *Echo*. Com base no intervalo de tempo entre esses dois eventos, o módulo gera um sinal que possibilita a medição da distância até o objeto em questão, conforme ilustrado na Figura 1 (Melo, 2022; Nidejelski, 2018).

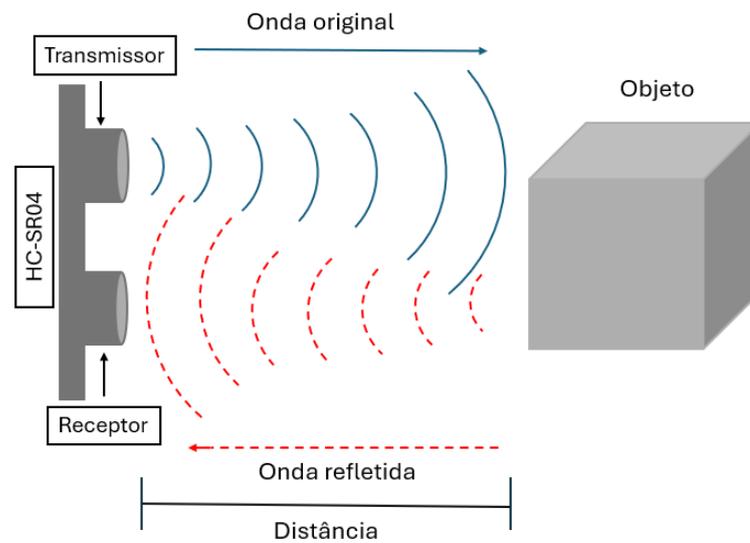


Figura 1 – Princípio de funcionamento sensor ultrassônico HC-SR04.

Fonte: a autora, 2024.

As aplicações de sensores ultrassônicos podem ser variadas, especialmente no ambiente industrial, onde pode ser empregado para automação de linhas de produção, controle de níveis, detecção de objetos, controle de altura e comprimento, bem como controle de velocidade. Além disso, sua capacidade de detectar objetos sólidos e líquidos torna-o particularmente útil na indústria alimentícia, onde pode ser utilizado para detectar fluidos em tanques sem necessidade de contato direto independentemente da cor, uma vez que o nível é determinado de forma indireta por meio do pulso ultrassônico (Carvalho, 2017; Nidejelski, 2018). No entanto, em sua grande maioria, estes sensores são de alto custo e, muitas vezes, inacessíveis para indústrias de alimentos de pequeno porte.

É importante destacar que há poucos estudos que abordam especificamente o tema do controle de nível na indústria de alimentos, com foco na importância da automação para a padronização de produtos e processos. Neste contexto, entende-se que desenvolver um projeto para avaliar a viabilidade da aplicação de um sensor de baixo custo para controlar o nível de fluidos em tanques sem contato, visando atender às necessidades das pequenas indústrias de alimentos, é uma iniciativa relevante.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento e controle de nível de líquidos de baixo custo, utilizando um sensor ultrassônico e a ação de controle liga-desliga, baseado em um microcontrolador Arduino.

2.2 Objetivos específicos

- Projetar e construir um protótipo para determinação e controle automático de nível.
- Instalar os dispositivos eletrônicos no protótipo.
- Elaborar o código de comunicação entre os dispositivos utilizando a IDE para Arduino.
- Calibrar o sensor ultrassônico para o protótipo construído.
- Implementar a curva de calibração determinada no microcontrolador para determinação de nível.
- Determinar os limites de nível máximo e mínimo de controle para o protótipo.
- Implementar sistema de controle de nível liga-desliga.
- Realizar testes de validação do sistema sob condições de operacionais.
- Realizar análise de custos do protótipo e do sistema de controle.

3 METODOLOGIA

3.1 Instalações

O protótipo foi desenvolvido no Laboratório de Química e Análise de Alimentos, enquanto o código de programação foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem e Simulação em Engenharia de Alimentos, ambos da Universidade Federal de Uberlândia, campus Patos de Minas.

3.2 Materiais utilizados

a) Tanque

Para representar um tanque pulmão, foi utilizada uma caixa de poliestireno com capacidade máxima de 11 litros, com dimensões de 23 cm de altura, 25 cm de comprimento e 18 cm de profundidade.



Figura 2 – Tanque utilizado no protótipo.

Fonte: a autora, 2024.

b) Mangueiras

Foram utilizadas duas mangueiras: uma com diâmetro de 19,05 mm (3/4 de polegada) ligada diretamente à fonte de água e à válvula solenoide para alimentação do sistema, e outra, com 8 mm de diâmetro na saída do tanque.

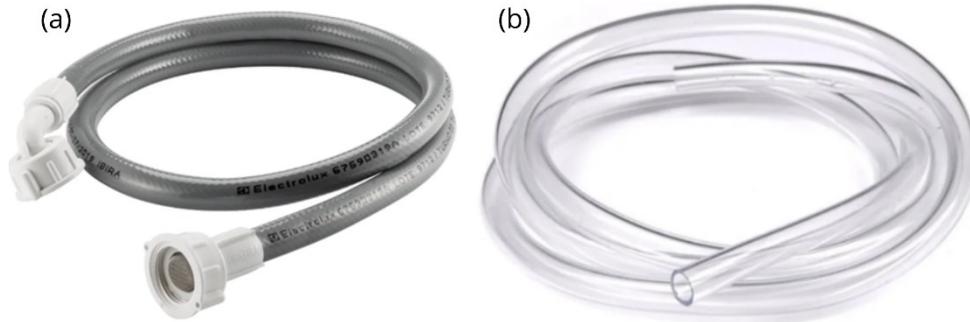


Figura 3 – Mangueiras. (a) Mangueira de 19,05 mm. (b) Mangueira de 8 mm.

Fonte: a autora, 2024.

c) Válvula solenoide

Foi utilizada uma válvula solenoide, que combina um solenoide e uma válvula, regulando o fluxo de líquido por meio do acionamento por corrente elétrica. Foi escolhida pela facilidade de integração ao Arduino e pelo controle preciso do fluxo de líquido conforme os limites mínimos e máximos estabelecidos, respondendo rapidamente aos comandos do microcontrolador.



Figura 4 – Válvula solenoide.

Fonte: a autora, 2024.

d) Sensor ultrassônico

O sensor ultrassônico HC-SR04 foi utilizado para medir a distância até a superfície do líquido e, assim, determinar o volume de líquido no interior do tanque, por meio da emissão de pulsos de ondas ultrassônicas (*Trig*) e o cálculo da distância baseado no tempo de retorno dessas ondas (*Echo*) após serem refletidas pelo líquido.



Figura 5 – Sensor ultrassônico HC-SR04.

Fonte: a autora, 2024.

e) Arduino Uno

No projeto de controle de nível, o microcontrolador Arduino Uno foi utilizado para processar os sinais recebidos do sensor ultrassônico, que determinou o volume de líquido no tanque a partir da medida de distância até a superfície do líquido e, além disso, decidir e emitir o sinal para acionamento (ou não) do atuador, a válvula solenoide, com o objetivo de manter o nível do líquido dentro dos parâmetros de nível desejados.

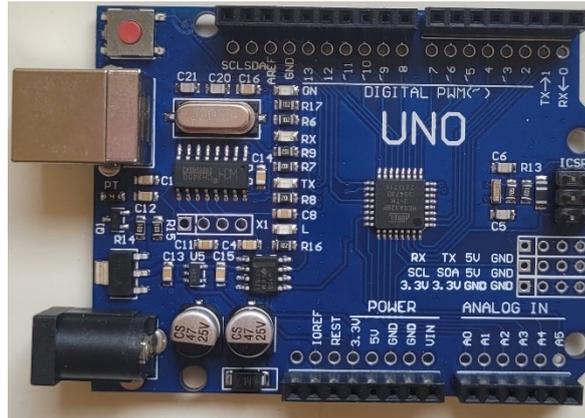


Figura 6 – Arduino Uno.

Fonte: a autora, 2024.

f) Display LCD

Foi usado um display LCD PCF8574 com módulo I2C conectado ao Arduino para exibir o volume de água no interior do tanque determinado pelo sensor.

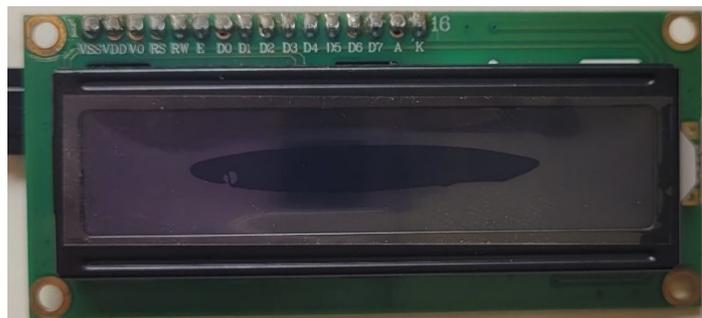


Figura 7 – Display LCD.

Fonte: a autora, 2024.

g) Relé

Um relé JQC3F-5VDC-C foi utilizado para acionar e desligar a válvula solenoide por meio da comunicação com Arduino. Considerando que a válvula opera em uma tensão de 127V, enquanto o Arduino fornece apenas 5V, o relé faz a ponte entre essas duas tensões.



Figura 8 – Relé.

Fonte: a autora, 2024.

3.3 Calibração do sensor ultrassônico

Primeiramente, foi realizada a montagem do protótipo. Dois pequenos orifícios foram perfurados na tampa da caixa de poliestireno para o acoplamento do sensor ultrassônico. O sensor foi então conectado ao microcontrolador Arduino por meio de jumpers, cabos específicos para a conexão de componentes eletrônicos.

Para o procedimento de calibração, o microcontrolador foi conectado a um notebook e, utilizando a IDE do Arduino, foi desenvolvido um código de programação com o objetivo de exibir a distância medida pelo sensor. Com o sistema montado, a calibração foi realizada adicionando-se 1 litro de água, previamente pesada, à caixa, e registrando-se a distância correspondente fornecida pelo sensor em centímetros. Utilizou-se água com corante para melhorar a visualização, sem interferir na densidade do líquido ou na leitura do sensor. Esse procedimento foi repetido até o tanque ser preenchido com, aproximadamente, nove litros de água, constituindo uma medição completa, conforme Figura 9. Este procedimento foi repetido seis vezes, proporcionando dados suficientes para a construção da curva de calibração.

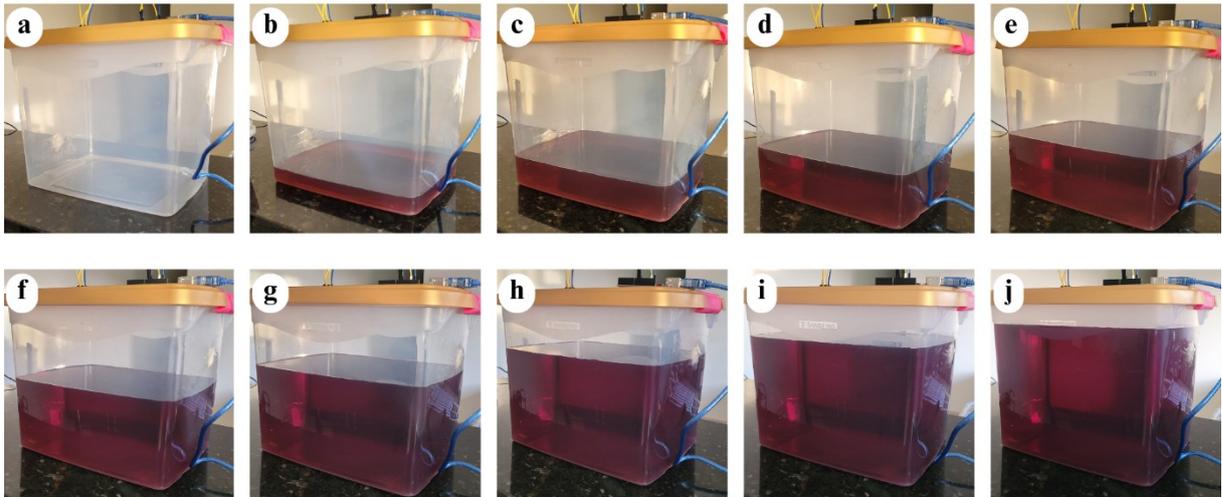


Figura 9 – Experimento de calibração. (a) caixa vazia. (b) 1 litro. (c) 2 litros. (d) 3 litros. (e) 4 litros. (f) 5 litros. (g) 6 litros. (h) 7 litros. (i) 8 litros. (j) 9 litros.

Fonte: a autora, 2024.

A partir dos dados de nível e volume, foi realizada uma regressão linear, resultando na obtenção da equação de uma reta e o coeficiente de determinação (R^2). A programação do Arduino foi então ajustada utilizando a equação obtida, permitindo que a resposta fornecida pelo sensor fosse convertida diretamente em volume de água (em litros).

A validação da calibração, foi realizada por meio de um experimento envolvendo a massa de água. Utilizando uma balança (Welmy BCW 6/15/30, Brasil), diferentes volumes de água foram medidos e comparados com os valores em litros fornecidos pelo sensor. Esse experimento permitiu a verificação do erro associado ao sensor e à calibração realizada.

3.4 Implementação do sistema de controle Liga-Desliga

Após a calibração, foi realizada a implementação do sistema de controle liga-desliga. Inicialmente, o display LCD foi conectado ao microcontrolador Arduino, permitindo a exibição do volume medido pelo sensor. Posteriormente, foi instalada a válvula solenoide, a qual foi conectada a uma fonte de energia e ao relé, que também foi integrado ao sistema por meio do Arduino. Nesta etapa, foram instaladas as mangueiras, com uma conectada à saída do tanque e a outra à fonte de alimentação de água, controlada pela válvula solenoide.

Com a montagem dos componentes concluída, o código de programação foi ajustado para que o display apresentasse o volume em tempo real e para que a válvula fosse acionada ou desativada de acordo com os limites de volume mínimo e máximo, previamente definidos pelo

usuário. Visando obter medições mais estáveis, implementou-se no código um cálculo da mediana em curtos intervalos de tempo para reduzir a oscilação nas leituras, considerando a característica dinâmica do sistema e o movimento da água. Para o funcionamento do controlador liga-desliga, definiu-se um limite máximo de volume que, ao ser alcançado, o Arduino desativa a válvula solenoide, interrompendo a corrente de entrada; assim como um limite mínimo, no qual a válvula é acionada, reestabelecendo-se o fluxo de entrada de líquido no sistema. Esse processo define uma faixa de histerese, que permite a alternância entre os estados de ativação e desativação da válvula, garantindo o controle do fluxo de forma eficiente.

Na Figura 10 pode ser observado o diagrama de blocos do sistema de controle Liga-Desliga, demonstrando o fluxo de informações entre os subsistemas e os limites de controle informados pelo usuário.

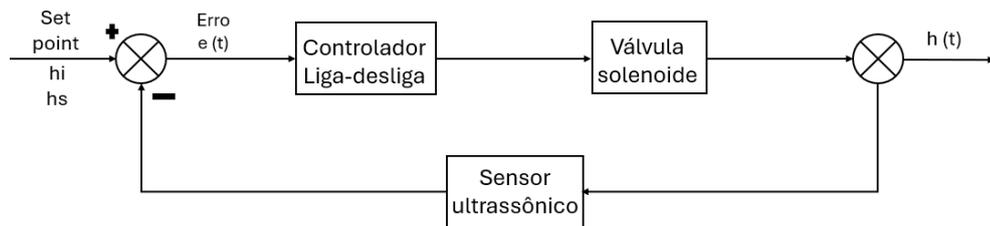


Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema de controle. “hi” e “hs”: limites inferior e limite superior de controle informados pelo usuário, respectivamente.

Fonte: a autora, 2024.

3.5 Validação do sistema de controle

Com o sistema montado e o controle Liga-Desliga implementado, foi iniciada a alimentação do tanque, demonstrando o correto funcionamento do sistema. Foram testados diferentes *set points* para verificar possíveis interferências relacionadas à atuação da válvula solenoide e à precisão na leitura do sensor ultrassônico. Além disso, foi analisado o desvio causado pelo momento de inércia do fluido, resultante das características dinâmicas do sistema em operação.

Para avaliar o desempenho do sistema, realizou-se um teste para determinar a vazão mínima de operação na entrada do tanque. A vazão da torneira foi ajustada até atingir o valor mínimo necessário para garantir um fluxo contínuo de entrada e saída de água, assegurando que o tanque continuasse a ser preenchido, mesmo sob condições de baixa vazão. Após definir a abertura da válvula da torneira, a vazão foi medida da seguinte forma: a tampa foi removida

com cuidado para não afetar a montagem dos componentes eletrônicos, e, utilizando-se um béquer, foi cronometrado um intervalo de 10 segundos para a coleta do volume de água. Em seguida, o volume coletado foi transferido para uma proveta, com o objetivo de se obter maior precisão na medição. Esse procedimento foi repetido três vezes, e a vazão mínima foi calculada a partir da média das medidas obtidas no mesmo intervalo de tempo.

Para determinar a vazão máxima, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado para a vazão mínima, com a precaução adicional de que a abertura da torneira fosse ajustada para evitar respingos que pudessem atingir o sensor e comprometer a precisão das leituras. Um fluxo excessivo também poderia comprometer a leitura do sensor devido à movimentação intensa da água no tanque, interferindo na estabilidade do sistema.

A fim de validar a dinâmica do sistema, foi realizado um teste para calcular o desvio entre o volume real de água – medido pela massa em uma balança, considerando a densidade da água de 1 g/ml – e o volume indicado pelo sistema com base na curva de calibração implementada para o sensor ultrassônico. Com o sistema em funcionamento, foram coletados 58 pontos de amostragem em intervalos de 5 segundos durante três ciclos completos de enchimento (válvula solenoide ativada) e esvaziamento (válvula solenoide desativada), utilizando-se a vazão máxima de operação. Os dados obtidos foram compilados e organizados em um gráfico de dispersão para posterior análise de regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos na calibração, foi gerado o gráfico de correlação entre o nível de água (cm) e o volume (litros), resultando em uma regressão linear com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9719, conforme Figura 11. Esse valor indica um ajuste significativo do modelo, demonstrando que o sensor ultrassônico utilizado é eficaz na medição do nível de água sob condições controladas.

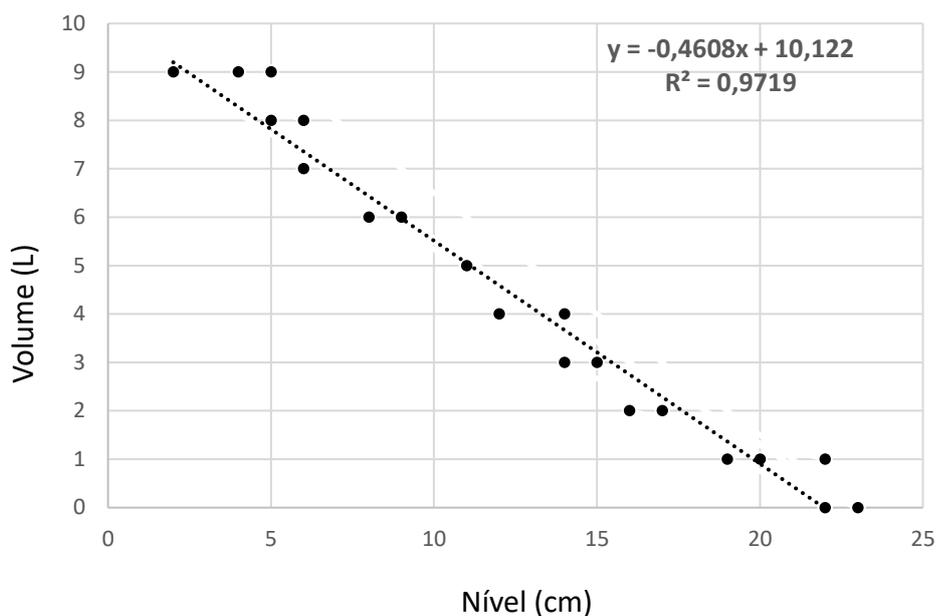


Figura 11 – Calibração: Nível vs volume de água.

Fonte: a autora, 2024.

Galli et al. (2024) obtiveram coeficientes de correlação (R^2) variando de 0,930 a 0,993 em seus experimentos, resultados comparáveis ao R^2 de 0,972 encontrado neste trabalho. No entanto, é importante notar algumas diferenças nas condições dos dois estudos. O sensor ultrassônico modelo HY-SR05, com um alcance de 4,5 metros e uma faixa de tensão de 4,5V a 5,5V, foi utilizado no estudo de Galli et al., enquanto o sensor HC-SR04, que possui um alcance de 4 metros e opera especificamente a 5V, foi empregado neste trabalho. É relevante destacar que os resultados de Galli et al. foram obtidos em condições de operação da água não totalmente estáticas.

O estudo de Silva et al. (2024) apresenta condições experimentais semelhantes às do presente trabalho, empregando o sensor ultrassônico HC-SR04 e o Arduino Uno para a medição do nível de água. Os resultados da calibração indicaram que o protótipo desenvolvido demonstrou, em geral, alta precisão e uma tendência linear.

Após a calibração e a verificação da adequação do sensor ultrassônico para a determinação do nível de água no tanque, procedeu-se a montagem do sistema de controle. Nessa etapa, foram integrados a alimentação contínua do sistema, a válvula solenoide e o relé, responsáveis pelo controle automatizado do fluxo de água. Vale destacar que não foi possível utilizar o líquido colorido nesta fase, uma vez que o sistema operava de maneira dinâmica, com ligação direta à fonte de água, o que inviabilizou essa opção. A Figura 12 ilustra o sistema completo construído, enquanto na Figura 13 pode ser observado o esquema de interligação dos

componentes, demonstrando detalhadamente a configuração física e a comunicação entre os dispositivos.

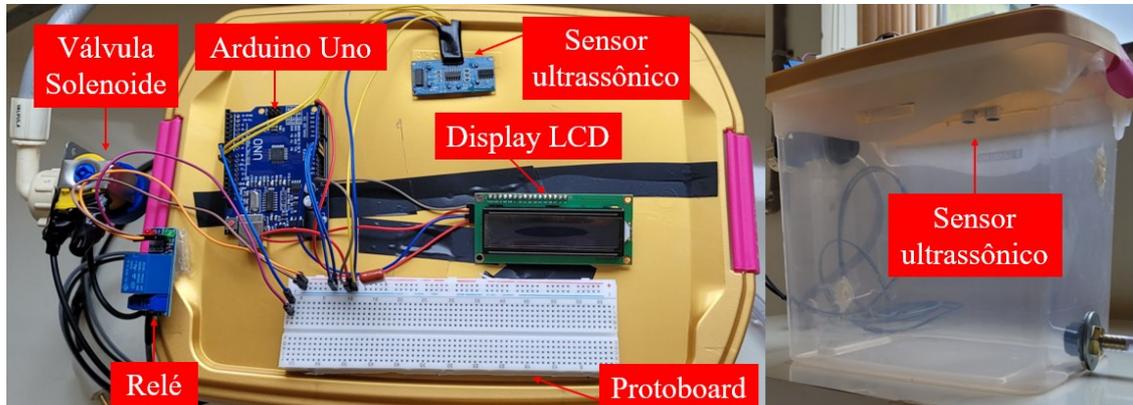


Figura 12 – Sistema montado.

Fonte: a autora, 2024.

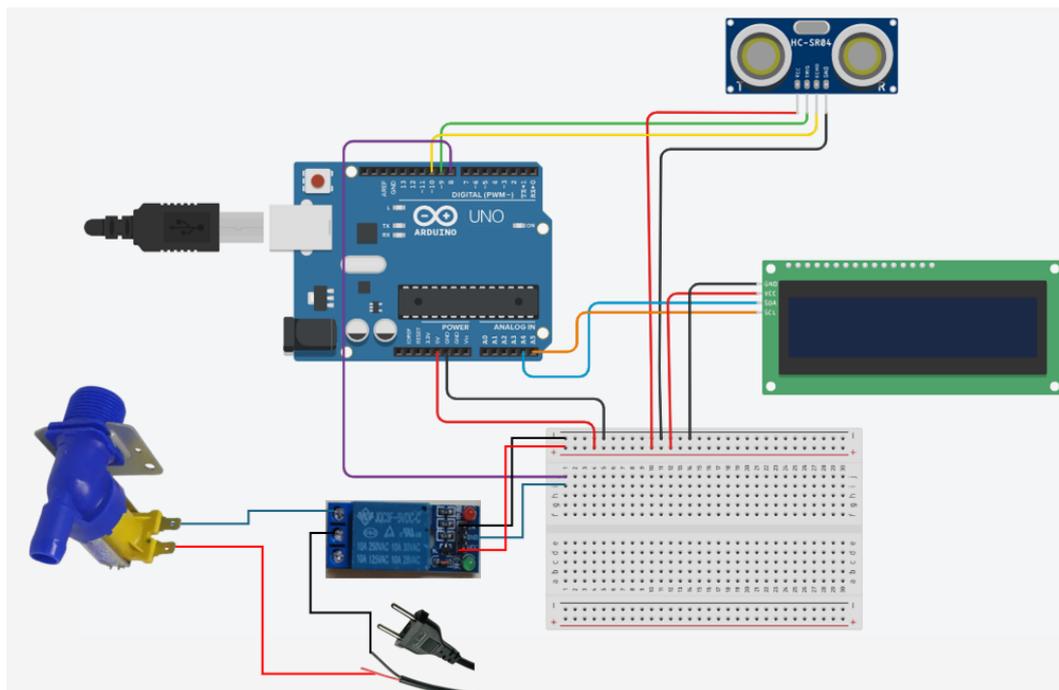


Figura 13 – Esquema de montagem.

Fonte: a autora, 2024.

Amaral et al. (2023) empregaram o controle Liga-Desliga em uma bancada didática para regular o nível dos tanques de processos químicos. A técnica consistiu em manter os níveis de líquido próximos ao valor de referência, acionando e desligando automaticamente as bombas conforme necessário. Os resultados obtidos foram satisfatórios, evidenciando a eficácia do

controle Liga-Desliga na manutenção dos níveis desejados. Contudo, os autores mencionaram que, apesar do bom desempenho do controle Liga-Desliga, existem outros controladores como P, PI e PID que podem ser implementados no futuro para alcançar maior precisão e otimização dos processos.

Adicionalmente, Gimenes e Pereira (2015) utilizaram o controle Liga-Desliga em um tanque com alimentação constante e controlada, empregando um microcontrolador Arduino para regular os níveis com base em sensores de nível. Eles concluíram que este método é viável, econômico, fácil de implementar e preciso, mostrando potencial para aplicações industriais. No entanto, destacaram a necessidade de algumas adaptações, como o embarque do Arduino e a fixação adequada dos fios, para garantir sua eficácia em escala industrial.

Para garantir o controle automático do nível de água com base na ação Liga-Desliga, conforme Figura 14, foi desenvolvido um algoritmo que define a lógica de comunicação, operação e atuação do referido sistema. A implementação desse algoritmo permitiu que o sistema operasse de maneira autônoma, ajustando o nível de água conforme os *set points* previamente definidos pelo usuário, eliminando a necessidade de intervenções manuais frequentes.

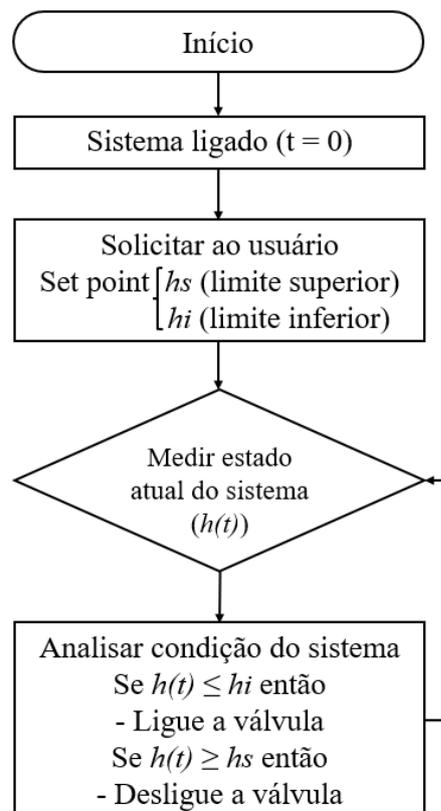


Figura 14 – Fluxograma do algoritmo de funcionamento do sistema Liga-Desliga.

Fonte: a autora, 2024.

Conforme o algoritmo desenvolvido, é possível observar que após a inicialização do sistema, o usuário foi responsável por definir os valores de *set point*, especificando o limite superior (h_s) e o limite inferior (h_i). Posteriormente, o sensor ultrassônico foi ativado, realizando as medições contínuas da quantidade de líquido presente no tanque. Sempre que o valor da medição " $h(t)$ " apresentasse um nível igual ou inferior ao limite inferior (h_i), a válvula solenoide era acionada automaticamente, permitindo a entrada de líquido no sistema. Por outro lado, quando a medição ($h(t)$) indicava que o nível de líquido havia atingido ou ultrapassado o limite superior (h_s), a válvula era desativada, interrompendo o fluxo de entrada. Esse processo de monitoramento e ajuste automático foi executado de maneira cíclica, assegurando que o nível de líquido permanecesse dentro dos parâmetros previamente estabelecidos pelo usuário, com ajustes automáticos e dinâmicos sempre que necessário.

Com o sistema operando de maneira adequada, foi necessário ajustar os limites de controle para otimizar seu desempenho. Observou-se que a definição de limites muito próximos resultava em acionamentos frequentes da válvula solenoide, o que poderia causar desgaste prematuro de componentes sensíveis, como o relé. Ao definir os limites mínimo e máximo em 3 e 8 litros, surgiram alguns desafios operacionais: i) o limite máximo muito próximo à capacidade total do tanque, interferiu nas leituras do sensor ultrassônico; ii) mesmo operando em condições de baixa vazão, foram observados respingos de água que molharam o sensor, afetando a precisão das medições e, potencialmente, causando danos ao componente.

Adicionalmente, durante os testes, o tanque quase completamente cheio apresentou dificuldades para a validação dos resultados por meio da balança, ferramenta necessária para confirmar a precisão da quantidade de água medida pelo sensor. Para mitigar esse problema, os limites foram ajustados, estabelecendo 3 litros como valor mínimo e 5 litros como valor máximo de controle. Esse ajuste evitou o enchimento excessivo do tanque, minimizando os respingos que anteriormente afetavam o sensor, protegendo o dispositivo contra possíveis falhas e garantindo medições mais precisas. A delimitação dessa faixa de 2 litros também contribuiu para evitar acionamentos excessivos da válvula, proporcionando um cenário mais controlado e adequado para a condução dos testes experimentais.

Durante os testes de validação dinâmica, foram calculadas as vazões mínima (19,8 mL/s) e máxima 54,2 (mL/s) de entrada, utilizando-se um béquer para a coleta de água e medições cronometradas. Esses valores foram fundamentais para avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições de operação dinâmica.

Em sistemas estáticos, a precisão do sensor ultrassônico pode alcançar níveis aceitáveis de erro, com variações de menos de 5%. No entanto, em sistemas dinâmicos, como em

reservatórios ou tanques com fluxo contínuo, os erros podem aumentar consideravelmente devido à turbulência, respingos e outras perturbações na superfície da água. Trabalhos como o de Mao et al. (2019) indicam que, em sistemas dinâmicos, a compensação desse tipo de erro pode exigir calibrações adicionais ou o uso de sensores de maior robustez.

Na Figura 15 pode ser observado a comparação entre o volume real de água no tanque e o volume medido pelo sensor ultrassônico e apresentado no display, em intervalos de aproximadamente 5 segundos. A reta de ajuste calculada para esses dados ($y = 1,0669 \cdot x - 0,0639$) apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9343, sugerindo um bom ajuste entre os valores medidos e os reais, ainda que haja uma tendência de desvio observada nos pontos de maior volume. Além disso, pode-se observar que apesar do experimento de calibração ter indicado elevada precisão para o sensor, ao avaliar o sistema em funcionamento foi obtido um erro de medida de, aproximadamente, $-4,7\% \pm 7,2$. Esse desvio pode ser atribuído à inércia do fluido e às características dinâmicas do sistema, que afetam a precisão das leituras.

É possível que, em sistemas com volumes maiores, essa diferença não seja tão evidente como em tanques menores, similares ao utilizados no protótipo. Isso é visível nos pontos do gráfico onde o volume real é superior à 3,5 litros, mostrando uma dispersão mais pronunciada em torno da linha de ajuste. A variação observada poderia ser reduzida em sistemas de maior capacidade, superiores à 1000 litros, onde o impacto de fatores como respingos e inércia tende a ser menos significativo, proporcionando leituras mais consistentes e reduzindo o erro associado.

O estudo de Hermantoro et al. (2024) destaca que a precisão do sensor ultrassônico HC-SR04 pode ser afetada em sistemas dinâmicos devido à interferência causada por respingos e ondas no líquido, o que também foi observado no presente trabalho. Eles relatam que, em condições estáticas, a precisão é significativamente maior, mas à medida que o fluxo de água aumenta, o sensor tende a apresentar erros maiores, especialmente em volumes maiores. Galli et al. (2024) afirmam que, embora os sensores ultrassônicos sejam eficazes e econômicos para medição de níveis de água, sua precisão pode variar dependendo das condições ambientais, como temperatura e umidade, que podem interferir nas leituras em ambientes externos.

O sensor ultrassônico apresenta qualidades vantajosas, que incluem baixo custo, simplicidade de instalação e facilidade de integração com microcontroladores como o Arduino. No entanto, apresenta vulnerabilidade a interferências externas e limitações de precisão em ambientes com grande movimentação de líquido ou em sistemas de maior escala. No contexto do presente estudo, a modularidade e a capacidade de adaptação são vantagens significativas, embora seja essencial considerar as limitações de precisão em condições dinâmicas.

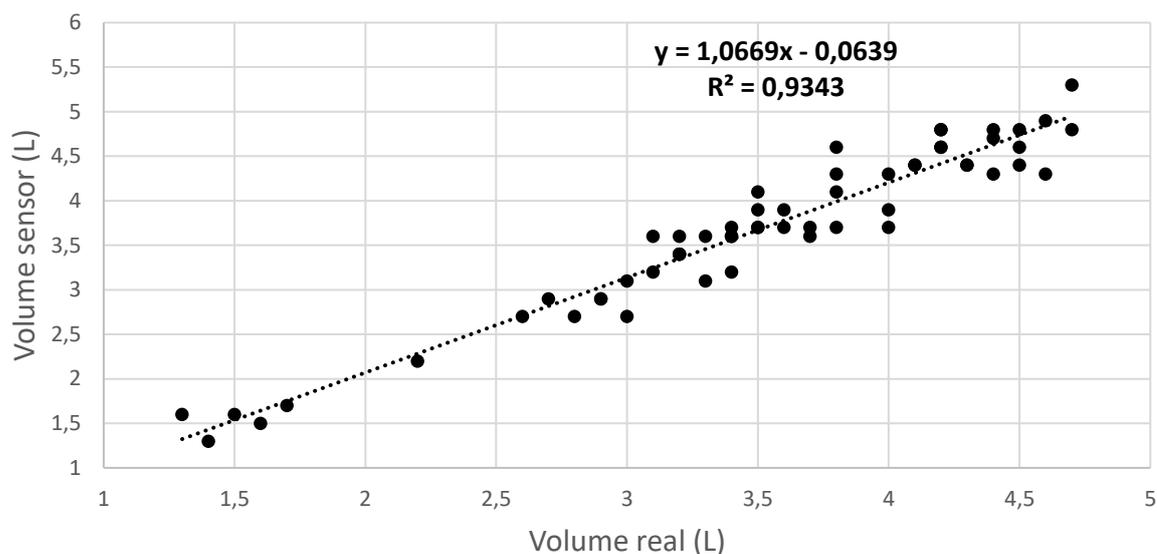


Figura 15 – Comparação: volume real e volume medido pelo sensor.

Fonte: a autora, 2024.

Em termos de viabilidade econômica, a Tabela 1 apresenta o custo total envolvido na construção do protótipo do sistema de controle de nível, que totalizou R\$236,78. Este valor inclui todos os componentes, desde o tanque até os cabos de conexão, sendo fundamental para a avaliação do projeto em sua totalidade.

Já a Tabela 2 discrimina o custo do sistema de controle propriamente dito, excluindo o tanque e seus componentes associados, resultando em um valor de R\$ 135,59. Essa distinção entre os custos é importante, pois permite uma análise focada nos elementos essenciais ao controle automatizado do nível de água, possibilitando uma avaliação mais precisa da viabilidade econômica para implementação desta solução em outros contextos ou em situações semelhantes em maior escala.

O custo médio de R\$236,78 confirma que o protótipo atende ao requisito de ser uma solução de baixo custo, especialmente se considerarmos que sistemas de automação mais complexos e comercialmente disponíveis tendem a apresentar valores significativamente superiores. Ao reduzir o escopo para o sistema de controle em si, com custo total de R\$135,59, conclui-se que a proposta é financeiramente viável para aplicações em sistemas de pequeno porte ou como uma solução acessível para produtores com recursos limitados.

Item	Custo médio	Quantidade utilizada	Custo final
Tanque	R\$ 29,99	1	R\$ 29,99
Mangueira	R\$ 11,45	2	R\$ 22,90
Válvula Solenoide	R\$ 37,01	1	R\$ 37,01
Arduino + cabo USB	R\$ 42,50	1	R\$ 42,50
Sensor ultrassônico	R\$ 8,50	1	R\$ 8,50
Display LCD com I2C	R\$ 23,10	1	R\$ 23,10
Relé	R\$ 11,99	1	R\$ 11,99
Conector	R\$ 20,50	2	R\$ 41,00
Jumper	R\$ 0,73	10	R\$ 7,30
Fonte 12V	R\$ 12,49	1	R\$ 12,49
Total do Projeto			R\$ 236,78

Tabela 1 – Custo do Protótipo de controle de nível.

Fonte: a autora, 2024.

Item	Custo médio	Quantidade utilizada	Custo final
Válvula Solenoide	R\$ 37,01	1	R\$ 37,01
Arduino + cabo USB	R\$ 42,50	1	R\$ 42,50
Sensor ultrassônico	R\$ 8,50	1	R\$ 8,50
Display LCD com I2C	R\$ 23,10	1	R\$ 23,10
Relé	R\$ 11,99	1	R\$ 11,99
Fonte 12V	R\$ 12,49	1	R\$ 12,49
Total			R\$ 135,59

Tabela 2 – Custo do sistema de controle.

Fonte: a autora, 2024.

Hermantoro et al. (2024) publicaram um estudo sobre o desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento de nível de água, utilizando microcontroladores Arduino e sensores ultrassônicos. A pesquisa destaca tanto a eficiência do sensor HC-SR04 quanto o baixo custo do sistema para aplicações em reservatórios de irrigação. Adicionalmente, Galli et al. (2024) apresentam um dispositivo econômico para medição e monitoramento de níveis de água, igualmente baseado no Arduino. Esse estudo demonstra que sistemas modulares e de baixo

custo podem ser aplicados com grande flexibilidade tanto em ambientes controlados quanto ao ar livre.

Além disso, o fato de o sistema ser baseado em componentes amplamente disponíveis, como o Arduino e o sensor ultrassônico, confere ao projeto flexibilidade em termos de escalabilidade. Tal característica sugere que, em casos de implementação em maior escala, os custos unitários poderiam ser ainda mais reduzidos, ampliando a atratividade econômica da solução. A modularidade do sistema permite também que adaptações sejam feitas conforme a necessidade, possibilitando o uso de tanques maiores ou a substituição de componentes de forma simples e econômica.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle de nível de líquidos de baixo custo, utilizando microcontrolador Arduino e sensor ultrassônico, com implementação de sistema de controla Liga-Desliga, mostrou-se uma potencial solução técnica viável e economicamente acessível para aplicações industriais de pequeno porte.

O dispositivo elaborado possibilitou a calibração entre as leituras de distância e volume de líquido no tanque. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema de controle funcionou de forma eficiente, ajustando automaticamente o nível de água conforme os limites estabelecidos pelo usuário. Entretanto, os testes em condições dinâmicas revelaram limitações na precisão das leituras, com um erro médio de $-4,7\% \pm 7,2\%$, causado, principalmente, pela inércia do fluido e pela suscetibilidade do sensor ultrassônico a interferências externas, como respingos e oscilações no nível do líquido. É possível que essas limitações sejam mitigadas em tanques de maior capacidade, onde a variabilidade provocada pelas flutuações de nível e respingos tende a ser proporcionalmente menor.

Assim, o sistema desenvolvido não se adequa para sistemas em que é necessária uma elevada precisão de medida. Porém, devido à modularidade e a simplicidade da proposta, é possível que com ajustes adicionais o sistema pode ser adaptado a uma variedade de cenários agroindustriais. Portanto, o projeto demonstrou-se eficiente dentro da proposta, confirmando a relevância e a viabilidade do sistema de controle de nível baseado em Arduino para aplicações práticas e econômicas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Mariana dos S. M; SANTOS, Rejane Barbosa; NETO, Olímpio Gomes da Silva. Projeto de controle on-off de nível em uma bancada didática usando Arduino. 15ª Jornada Científica e Tecnológica do Ifsuldeminas, 2023, v. 15 n. 2. Disponível em: <https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/1613/1239>. Acesso em: 28 ago. 2024.

BERRIE, P. G. Sensors for automated food process control: an introduction. Woodhead Publishing, 12 mar. 2013. DOI 10.1533/9780857095763.1.36. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845698010500037>. Acesso em: 13 set. 2024.

CARVALHO, Roberta Vieira. O emprego de um sensor ultrassônico para medidas de posição versus tempo de um sistema massa-mola. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário do Araguaia, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Barra do Garças, 2017.

GALLI, Andrea; PERUZZI, Cosimo; GANGI, Fabiola; MASSERONI, Daniele. ArduHydro: a low-cost device for water level measurement and monitoring. *Journal of Agricultural Engineering*, 2024; LV:1554. DOI: 10.4081/jae.2024.1554. Disponível em: <https://www.agroengineering.org/jae/article/view/1554/1155>. Acesso em: 24 out. 2024.

GIMENES, A. H.; PEREIRA P. R. A. Utilização da plataforma arduino como ferramenta de controle para um sistema de nível de líquidos. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Unicamp, Campinas-SP, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/1d71/9affb1daba273996792a830ca085a69943f4.pdf> Acesso em: 20 de out. de 2024.

GUIMARÃES, Fábio. Controle P, I, D, PI, PD e PID. [S. l.], 30 jun. 2021. Disponível em: <https://mundoprojetado.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 13 set. 2024.

HERMANTORO, Wahyu Ifredo Hutagalung et al. Low-cost system of automatic water level recorder tools based on microcontroller arduin. *Commun. Math. Biol. Neurosci.* 2024, 2024:104. DOI: <https://doi.org/10.28919/cmbn/8811>. Acesso em: 24 de out. de 2024.

LEITE, J. C. S. Controle de temperatura em tanque através de arduino baseado no controle on/off. IV Simpósio paranaense de modelagem, simulação e controle de processos, 2019, Curitiba, V. 1, P. 136-141. Disponível em: <https://eventos.ufpr.br/simproc/simproc4/paper/viewFile/1384/742>. Acesso em: 28 ago. 2024.

MAKIYAMA, Márcio. O que é arduino, para que serve, benefícios e projetos. São Carlos, SP, 29 nov. 2022. Disponível em: <https://victorvision.com.br/blog/o-que-e-arduino/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

MAO, Feng et al. Low-cost Environmental Sensor Networks: Recent Advances and Future Directions. *Frontiers in Earth Science*, 7:221, 2019. DOI: 10.3389/feart.2019.00221. Acesso em: 24 de out. de 2024.

MELO, Jonathan Soares de. Sistema de automação e controle de nível em estação de tratamento de efluentes industriais utilizando plataforma arduino. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2022.

NIDEJELSKI, Daniel Machado. Projeto de um sistema de controle de combustíveis em tanques de armazenamento utilizando microcontrolador Arduino. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SILVA, Guilherme Melo da; BUENO, Rafael de Carvalho; BLENINGER, Tobias. Desenvolvimento de um sensor ultrassônico para medição contínua do nível da água de corpos d'água e uma análise da influência da temperatura do ar. II FluHidros e XVI ENES, Curitiba - PR, ago. 2024. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/239/II-FLUHIDROS0088-1-0-20240729-131840.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

STEPHANOPOULOS, George. *Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice*. Englewood Cliffs, New Jersey: P T R Prentice Hall, 1984.

ZAGGOUT, Mahmoud N. et al. Modeling and Design of Liquid Level Control System. *International Science and Technology Journal*, v. 33, 21 out. 2023. Disponível em: <https://stcrs.com.ly/istj/docs/volumes/Liquid%20Level%20Control.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

MATERIAL SUPLEMENTAR: CÓDIGO DO PROGRAMA PARA CONTROLE DE NÍVEL

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Define o endereço do LCD I2C (geralmente 0x27 ou 0x3F)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// Define os pinos para o sensor HC-SR04
const int TRIG_PIN = 9;
const int ECHO_PIN = 10;
// Define o pino para o relé
const int RELE_PIN = 8;
int maxVolume = 5.0;
int minVolume = 3.0;
const int samples = 5;
float distances[samples];
float readDistance() {
    // Limpa o pino TRIG
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    // delay de 2 microssegundos
    delayMicroseconds(2);
    // Emite um pulso ultrassônico
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    // delay de 10 microssegundos
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    // Calcula a duração do pulso de eco
    long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
    // Calcula a distância e o volume
    float distance = duration * 0.034 / 2;
    delayMicroseconds(4);
    return distance;
}
float getMedianDistance() {
```

```

// Ler as distâncias e armazená-las no array
for (int i = 0; i < samples; i++) {
    distances[i] = readDistance();
    delayMicroseconds(20);
}
// Ordenar o array
for (int i = 0; i < samples-1; i++) {
    for (int j = i+1; j < samples; j++) {
        if (distances[i] > distances[j]) {
            float temp = distances[i];
            distances[i] = distances[j];
            distances[j] = temp;
        }
    }
}
// Retornar a mediana
if (samples % 2 == 0) {
    return (distances[samples/2 - 1] + distances[samples/2]) / 2.0;
} else {
    return distances[samples/2];
}
}

void setup() {
    // Inicializa os pinos como saída e entrada
    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
    pinMode(RELE_PIN, OUTPUT);
    // Inicializa o relé desligado
    digitalWrite(RELE_PIN, LOW);
    // Inicia a comunicação serial
    Serial.begin(9600);
    // Inicia o LCD
    lcd.init();
    lcd.backlight();
}

```

```
}  
void loop() {  
  float distance = getMedianDistance();  
  float volume = -0.4956 * distance + 10.456;  
  // Imprime o volume no monitor serial  
  Serial.print("Volume: ");  
  Serial.print(volume, 1);  
  Serial.println(" L");  
  // Exibe o volume no LCD  
  lcd.clear();  
  lcd.setCursor(2, 0);  
  lcd.print("Volume: ");  
  lcd.print(volume, 1);  
  lcd.print(" L");  
  // Controla a válvula  
  if (volume <= minVolume) {  
    digitalWrite(RELE_PIN, LOW); // Liga a válvula  
  } else if (volume >= maxVolume) {  
    digitalWrite(RELE_PIN, HIGH); // Desliga a válvula  
  }  
  // Aguarda um pouco antes de fazer uma nova medição  
  delay(500);  
}
```