

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR DE NÍVEL CAPACITIVO CILÍNDRICO COM UM SISTEMA DE MEDIÇÃO CONTÍNUA

Maicon Lucas Antero¹
Rodrigo Coral, Dr. Eng²

Resumo

Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema de medição contínua de nível, empregando um transdutor de nível capacitivo cilíndrico de baixo custo e fácil construção. O sensor foi implementado com um tubo externo de latão e um eletrodo interno de cobre, cuja capacitância resultante varia em função do nível do fluido entre os eletrodos. Para integrar o sensor a um sistema de medição contínua, projetou-se um circuito oscilador astável baseado no CI NE555, responsável por converter a capacitância do sensor em uma frequência de saída variável. Essa frequência é, então, processada por um microcontrolador ESP32C3 super mini, que executa um algoritmo desenvolvido para converter os valores de frequência em leituras da altura do fluido no reservatório. O sistema implementado inclui uma interface de monitoramento, possibilitando o acompanhamento contínuo e em tempo real dos níveis do líquido. Os resultados deste desenvolvimento validaram a relação teórica entre o nível, a capacitância e a frequência.

Palavras-Chave: Sensor de Nível. Capacitor Cilíndrico. Transdutor de Nível. Sistema de Medição.

DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS MEASUREMENT SYSTEM WITH A CYLINDRICAL CAPACITIVE LEVEL TRANSDUCER

Abstract: This article describes the development of a continuous level measurement system, employing a low-cost and easy-to-build cylindrical capacitive level transducer. The sensor was implemented with an outer brass tube and an inner copper electrode, whose resulting capacitance varies as a function of the fluid level between the electrodes. To integrate the sensor into a continuous measurement system, an astable oscillator circuit based on the NE555 IC was designed to convert the sensor's capacitance into a variable output frequency. This frequency is then processed by an ESP32C3 super mini microcontroller, which runs a developed algorithm to convert the frequency values into readings of the fluid's height in the reservoir. The implemented system includes a monitoring interface, enabling continuous and real-time tracking of the liquid levels. The results of this development validated the theoretical relationship between the level, capacitance, and frequency.

Keywords: Level Sensor. Cylindrical Capacitor. Level Transducer. Measurement system.

¹ Acadêmico do curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. maicon.la@aluno.ifsc.edu.br

² Docente do curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. coral@ifsc.edu.br

INTRODUÇÃO

A medição do nível de líquidos é uma prática fundamental em diversas indústrias, incluindo petroquímica, farmacêutica, alimentícia e de tratamento de água. Manter o controle preciso do nível de líquidos não só garante a eficiência operacional, mas também é crucial para a segurança e a qualidade dos produtos (MEGGA INSTRUMENTOS, 2014). Dentre as diversas tecnologias disponíveis, como ultrassom, radar e pressão, os sensores capacitivos se destacam pela sua simplicidade construtiva, robustez e particular adequação para a medição de nível em líquidos não condutores ou com baixa condutividade (SERVO, 2010).

Sensores de nível capacitivos operam medindo a variação de capacitância provocada pela alteração no nível do fluido. Conforme o nível sobe, a área dos eletrodos imersa no fluido aumenta, eleva proporcionalmente a capacitância total do sistema. A aplicação e a configuração do sensor distinguem-se fundamentalmente entre líquidos condutores e não condutores. Para líquidos condutores, é necessário um eletrodo isolado para evitar curto-circuito, o dielétrico efetivo é o próprio material de isolamento do eletrodo. Já para os líquidos não condutores, o próprio fluido, por possuir uma constante dielétrica superior à do ar, funciona como o principal dielétrico, e a capacitância aumenta à medida que ele substitui o ar entre as placas do sensor (REVERTER et al., 2007). Sistemas de monitoramento e controle de nível que incorporam microcontroladores, como as plataformas Arduino ou ESP32, têm se mostrado eficazes e de baixo custo em diversas aplicações, incluindo projetos didáticos e o monitoramento de parâmetros como a qualidade da água (SILVA et al., 2024).

Este artigo propõe o desenvolvimento de um transdutor de medição de nível contínuo, focado em baixo custo e boa precisão. Para alcançar este objetivo, o projeto aborda a construção de um protótipo físico e a modelagem matemática do sensor capacitivo cilíndrico para estabelecer a relação entre variação da capacitância com o nível do fluido. Adicionalmente, dedica-se ao projeto e prototipagem de um circuito eletrônico oscilador com uso do circuito integrado NE555, visando converter a variação de capacitância do sensor em um sinal de frequência proporcional ao nível. O desenvolvimento do algoritmo no microcontrolador ESP32C3 super mini, que inclui a implementação da modelagem matemática para converter os valores de frequência em leituras de altura do fluido e a criação de uma interface para monitoramento contínuo, é também um ponto central. Por fim, o trabalho inclui a validação e a calibração do sistema por meio de testes de aquisição de amostras, comparando o modelo matemático com as leituras de frequência do sistema em pontos pré-definidos (a cada 10 mm).

2 TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE NÍVEL

A medição de nível é uma operação crítica em inúmeros setores industriais, e a escolha da tecnologia adequada depende de fatores como as propriedades do fluido, as condições do processo e o custo de implementação (NIVETEC, 21 nov. 2024). As tecnologias de sensoriamento de nível podem ser classificadas em duas categorias principais: métodos sem contato e métodos de contato direto com o fluido.

2.1 SENSORES DE NÍVEL SEM CONTATO

Os sensores de nível sem contato realizam a medição à distância, sem imersão direta no fluido. Entre eles, os sensores ultrassônicos emitem ondas sonoras de alta frequência e medem o tempo de retorno do eco refletido pela superfície do líquido para determinar a distância e, conseqüentemente, o nível (PROCESS SENSING, 25 jan. 2023). Embora adequados para líquidos viscosos e materiais a granel, sendo não invasivos e relativamente confiáveis, fatores como turbulência, espuma e vapor podem afetar a precisão (ELPROCUS, 2021).

Também se destacam os sensores ópticos, que utilizam a refração da luz para detectar a presença ou ausência de líquido em um determinado ponto (KWOCO, 2009). Esses sensores oferecem um design compacto, insensibilidade a pressão e temperatura elevadas e baixa manutenção, embora a sujeira na lente possa afetar a leitura (KWOCO, 2009).

Outro tipo importante são os sensores de radar (micro-ondas), que utilizam ondas de radar para medir a distância até a superfície do líquido, oferecendo alta precisão e desempenho em diversas condições ambientais (PROCESS SENSING, 25 jan. 2023). Esta é uma solução robusta com múltiplas opções de saída, mas geralmente com um custo mais elevado (ELPROCUS, 2021).

2.2 SENSORES DE NÍVEL DE CONTATO

Os sensores de nível de contato requerem imersão direta no fluido para realizar a medição. Alguns tipos comuns incluem os sensores de condutividade (resistivos), que são adequados para líquidos condutores. Estes empregam eletrodos para detectar a presença do líquido através da mudança na condutividade elétrica entre eles (KWOCO, 2009), sendo frequentemente utilizados em monitoramento de nível em caldeiras e tanques de produtos químicos. Suas vantagens incluem simplicidade e baixo custo, mas são limitados pela necessidade de um líquido condutor e pela possibilidade de corrosão dos eletrodos (ELPROCUS, 2021).

Os sensores capacitivos medem a variação da capacitância entre dois eletrodos imersos no fluido, onde o líquido atua como um dielétrico (PROCESS SENSING, 25 jan. 2023). Eles apresentam a vantagem de serem de estado sólido e adequados para medição contínua em líquidos não condutores, com versatilidade em tanques de armazenamento e monitoramento de processos, porém exigem calibração e são sensíveis a variações de temperatura e umidade (ELPROCUS, 2021).

3 SENSORES CAPACITIVOS CILÍNDRICOS

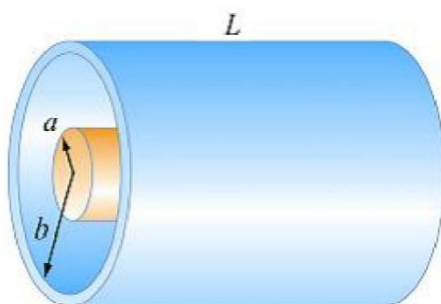
Os sensores capacitivos operam com base na variação da capacitância entre eletrodos devido à alteração do material dielétrico presente entre eles. No caso de sensores de nível, o fluido cuja altura se deseja medir atua como esse dielétrico variável. Uma configuração geométrica comum para sensores capacitivos de nível é a cilíndrica, que oferece simplicidade de construção e uma relação bem definida entre o nível do líquido e a capacitância resultante. A teoria fundamental dos capacitores estabelece que a capacitância (C) é diretamente proporcional as constantes da permissividade absoluta do vácuo (ϵ_0), da permissividade relativa do material (ϵ_r) entre os eletrodos e à área de sobreposição dos eletrodos (A), sendo inversamente

proporcional à distância (d) entre eles (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2014, p. 263), conforme a equação (1).

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

No entanto, para um capacitor cilíndrico, a formulação é ligeiramente diferente devido à sua geometria coaxial. Considerando um condutor cilíndrico sólido de raio a circundado por um invólucro cilíndrico coaxial com um raio interno b, como ilustrado na Figura 1, e desprezando os efeitos de borda e assumindo que o comprimento L é muito maior que os raios (b) e (a) (TOGHYANI RIZI; SHAHROKH ABADI, 2017), a capacitância (C) é dada pela equação (2):

Figura 1 – Capacitor Cilíndrico



Fonte: RIZI, M. T., & ABADI, M. H. S., 2017.

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_o\varepsilon_r L}{\ln(b/a)} \quad (2)$$

Onde:

- C, é a capacitância total.
- L, é o comprimento dos cilindros.
- ε_o , é a permissividade absoluta do vácuo.
- ε_r , é a permissividade relativa do meio entre os cilindros.
- a, é o raio do condutor cilíndrico interno.
- b, é o raio interno do invólucro cilíndrico externo.

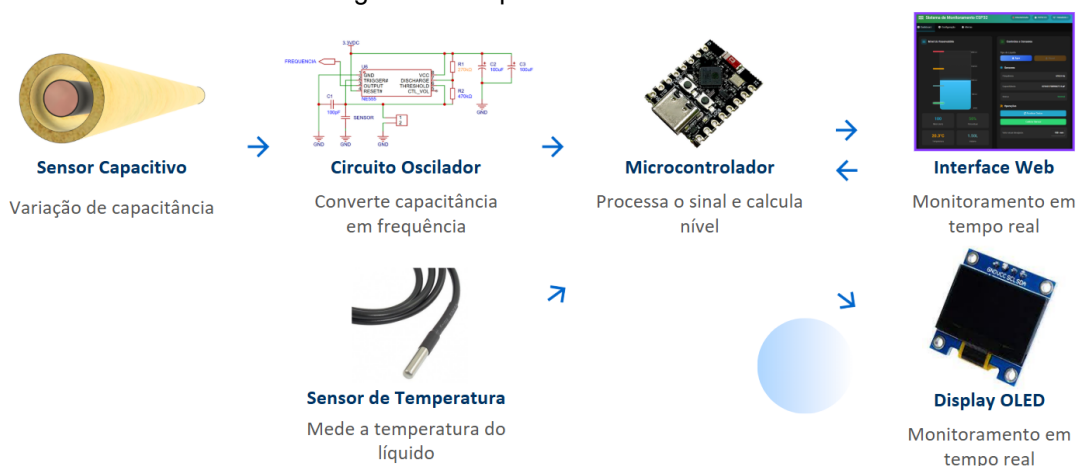
No contexto da medição de nível, quando um sensor capacitivo cilíndrico é imerso em um líquido, o material dielétrico entre os cilindros passa a ser uma combinação do ar e do próprio líquido. Como a permissividade dielétrica do líquido é geralmente diferente da permissividade dielétrica do ar, a capacitância total do sensor varia proporcionalmente à altura do líquido que preenche o espaço entre os cilindros.

4 ANÁLISE DO PROTÓTIPO

Para alcançar uma solução funcional e com potencial para aplicações práticas, o protótipo integra um sensor capacitivo cilíndrico, um circuito oscilador para conversão da capacitância em frequência, um microcontrolador ESP32C3 super mini para processamento do sinal, duas interfaces para monitoramento em tempo real dos

valores medidos e um sensor de temperatura. As etapas de funcionamento do protótipo são ilustradas no diagrama apresentado na Figura 2. As subseções a seguir descrevem em detalhes a construção do sensor, o projeto do circuito oscilador, a função do microcontrolador e o algoritmo de conversão, bem como a interface de monitoramento.

Figura 2 – Etapas de funcionamento

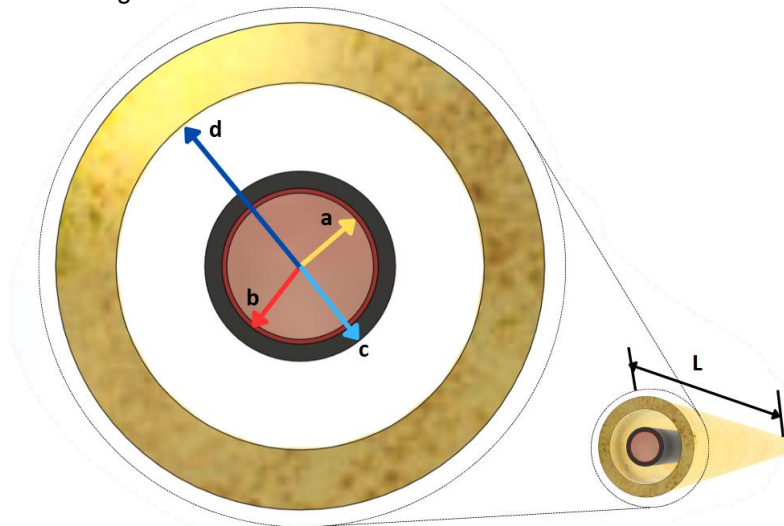


Fonte: Autor.

4.1 CONSTRUÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO CILINDRICO

O capacitor cilíndrico desenvolvido para o protótipo, ilustrado na Figura 3, foi construído utilizando um tubo externo de latão com um raio interno (d) de 3,765 mm e uma haste interna de cobre com um raio (a) de 1,5 mm. O comprimento total de ambas é $L = 250$ mm. Para garantir o isolamento elétrico entre a haste interna e o tubo externo, a haste interna foi revestida com um tubo de termorretrátil, adicionando ao raio externo da haste uma camada de termo retrátil $b \approx 1,6$ mm. Posteriormente foi adicionado uma camada de fita isolante de 0,3 mm de espessura com raio (c), que foi utilizada para impermeabilizar a camada de termo retrátil.

Figura 3 – Haste interna com isolante e tubo externo



Fonte: Autor.

Para assegurar o alinhamento coaxial entre o tubo externo e a haste interna, e para fornecer uma estrutura de suporte para o circuito eletrônico, foram projetadas e impressas peças em ABS como uma impressora 3D. Essas peças também foram concebidas para acomodar o sensor de temperatura DS18B20. A estrutura impressa em 3D garante que a distância radial entre os eletrodos (o tubo de latão e a haste de cobre isolada) seja constante ao longo do comprimento do sensor, um fator crucial para a previsibilidade e a calibração da capacitância em relação ao nível do líquido. A Figura 4 mostra o modelo 3D e o protótipo final montado após a impressão das peças.

Figura 4 – Sensor de nível



Fonte: Autor.

A capacitância de um capacitor cilíndrico com três camadas dielétricas em série pode ser descrita pela equação (3).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{isol1}L} + \frac{\ln(c/b)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{isol2}L} + \frac{\ln(d/c)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{meio}L} \quad (3)$$

Onde C é a capacitância equivalente, L o comprimento, C₁ é a capacitância da camada com termo retrátil, C₂ é a capacitância da camada de fita isolante e C₃ da camada variável que será preenchida pelo líquido. Rearranjando a equação, e obtida a capacitância equivalente do sensor cilíndrico com três camadas dielétricas conforme equação (4).

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o L}{\frac{\ln(b/a)}{\epsilon_{isol1}} + \frac{\ln(c/b)}{\epsilon_{isol2}} + \frac{\ln(d/c)}{\epsilon_{meio}}} \quad (4)$$

Considerando o sensor parcialmente imerso, são também consideradas duas capacitâncias em paralelo. Replicando a equação (4) para a parte imersa de altura h e para a parte não imersa de altura $L - h$. Como mostra a equação (6), a capacitância total do sensor varia com a altura do líquido, considerando a geometria do sensor e as propriedades dielétricas dos materiais envolvidos.

$$C_{\text{sensor}} = C_{\text{imersa}} + C_{\text{não_imersa}} \quad (5)$$

$$C_{\text{sensor}} = \frac{h \cdot 2\pi\epsilon_0}{\frac{\ln(b/a)}{\epsilon_{\text{isol1}}} + \frac{\ln(c/b)}{\epsilon_{\text{isol2}}} + \frac{\ln(d/c)}{\epsilon_{r,\text{liq}}}} + \frac{(L-h) \cdot 2\pi\epsilon_0}{\frac{\ln(b/a)}{\epsilon_{\text{isol1}}} + \frac{\ln(c/b)}{\epsilon_{\text{isol2}}} + \frac{\ln(d/c)}{\epsilon_{r,\text{ar}}}} \quad (6)$$

Para os cálculos, foram utilizados os seguintes parâmetros: a altura do líquido (h) é a variável a ser determinada, o comprimento total das hastes (L) é de 250 mm, o raio do condutor interno de cobre (a) é de 1,5 mm, o raio externo da camada de termo retrátil (b) é de aproximadamente 1,6 mm, o raio externo da camada de fita isolante (c) é de aproximadamente 1,9 mm e o raio interno do tubo externo de latão (d) é de 3,765 mm.

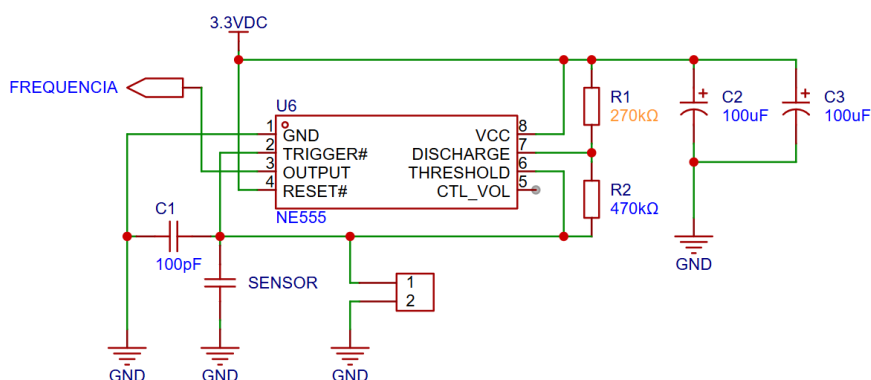
As constantes físicas e dielétricas consideradas são: a permissividade do vácuo (ϵ_0), com valor de 8,854 pF/m; a permissividade relativa do termo retrátil (ϵ_{isol1}), assumida como 2,3; a permissividade relativa da fita isolante (ϵ_{isol2}), assumida como 8; a permissividade relativa do ar ($\epsilon_{r,\text{ar}}$), com valor de 1.

A permissividade relativa do líquido de teste ($\epsilon_{r,\text{liq}}$) varia conforme tipo de fluido. Neste projeto posto utilizou-se água com uma função de ajuste de permissividade por temperatura, e álcool etílico 99,7% com permissividade relativa de 24,3.

4.2 CIRCUITO OSCILADOR

Para converter a variação da capacitância do sensor de nível em um sinal elétrico mensurável, foi projetado um circuito oscilador utilizando o circuito integrado NE555 configurado como um multivibrador astável. Nesta configuração, o NE555 opera como um oscilador, gerando um sinal de onda quadrada contínua em sua saída, cuja frequência é determinada pelos componentes externos conectados aos seus pinos, especificamente dois resistores e um capacitor (BRAGA, 2009).

Figura 5 - Circuito oscilador.



Fonte: Autor.

No circuito projetado, a frequência de oscilação f é definida por dois resistores, $R_1 = 270 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$, ambos com uma tolerância de 1%, e um capacitor fixo $C_1 = 100 \text{ pF}$ com uma tolerância de 10%. A fórmula geral para a frequência de um oscilador astável com NE555 é dada por (BRAGA, 2009):

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2R_2) \cdot C_{total}} \quad (7)$$

O sensor capacitivo cilíndrico C_{sensor} , cuja capacitância varia em função do nível do líquido, é conectado em paralelo com o capacitor fixo C_1 . Portanto, a capacitância total C_{total} no circuito oscilador é a soma da capacitância fixa e da capacitância do sensor:

$$C_{total} = C_1 + C_{sensor} \quad (8)$$

Dessa forma, a frequência de saída do oscilador NE555 torna-se dependente da capacitância do sensor de nível. Como a capacitância total no denominador da fórmula da frequência inclui C_{sensor} , qualquer variação no nível do líquido, que altera C_{sensor} , resultará em uma variação na frequência de saída, confirmando a relação inversa mencionada anteriormente.

4.3 MICROCONTROLADOR ESP32C3 E AQUISIÇÃO DE DADOS

A escolha do microcontrolador ESP32C3 super mini para este projeto foi devido ao seu tamanho compacto, velocidade de processamento superior ao ESP8266 (arquitetura RISC-V de 32 bits com clock de até 160 MHz - Espressif Systems, 14 abril 2025), e a conectividade Wi-Fi integrada.

A leitura da frequência do sinal do oscilador NE555 é realizada utilizando a função *pulseIn()* do ESP32C3 (Arduino Documentation, 29 abril 2025), que mede a duração dos pulsos ON e OFF. O período (T) é a soma dessas durações, e a frequência é calculada como $f = 1/T$. A taxa de amostragem é limitada pela duração do pulso e pelo tempo de execução da função *pulseIn()* (Arduino Documentation, 29 abril 2025), e não diretamente pelo clock do processador, ou seja, à medida que o período aumenta a taxa de aquisição diminui.

4.4 ALGORITMO DE CONVERSÃO

O algoritmo de conversão da frequência para a altura do líquido é realizado em três etapas principais, envolvendo equacionamentos que relacionam o período lido com a frequência, a frequência do oscilador à capacitância do sensor e, posteriormente, a capacitância à altura do líquido.

4.4.1 Conversão da Período para Frequência

O período T é a soma tempo ON com o tempo OFF lida pelo microcontrolador, para diminuir erros por ruídos nessa etapa foi adicionado um algoritmo de média móvel com 100 amostras de período, onde a amostra atual substitui a amostra mais antiga. Na sequência a frequência é calculada com a fórmula $f = 1/T$.

4.4.2 Conversão da Frequência para a Capacitância do Sensor

Para cálculo da capacitância do sensor, é utilizado um algoritmo de média móvel para as últimas 2000 amostras de frequência. Com o valor da frequência média, é possível prosseguir substituindo a equação (8) na equação (7), isolando a capacitância do capacitor cilíndrico construído, conforme a equação (9).

$$C_{sensor}(f) = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2R_2) \cdot f} - C_1 \quad (9)$$

4.4.3 Conversão da Capacitância do Sensor para a Altura do Líquido

Para isolar altura do líquido (h) se fez necessário simplificar o termos relacionados as dimensões e permissividade relativa da equação (6) em dois termos, A e B, representados respectivamente nas equações (10) e (11).

$$A = \frac{\ln(b/a)}{\epsilon_{isol1}} + \frac{\ln(c/b)}{\epsilon_{isol2}} + \frac{\ln(d/c)}{\epsilon_{r,liq}} \quad (10)$$

$$B = \frac{\ln(b/a)}{\epsilon_{isol1}} + \frac{\ln(c/b)}{\epsilon_{isol2}} + \frac{\ln(d/c)}{\epsilon_{r,ar}} \quad (11)$$

Assim, a altura do líquido, equação (12), será dependente do valor da capacitância da haste capacitava, equação (9), que por sua vez depende da frequência calculada a partir do tempo ou período medido.

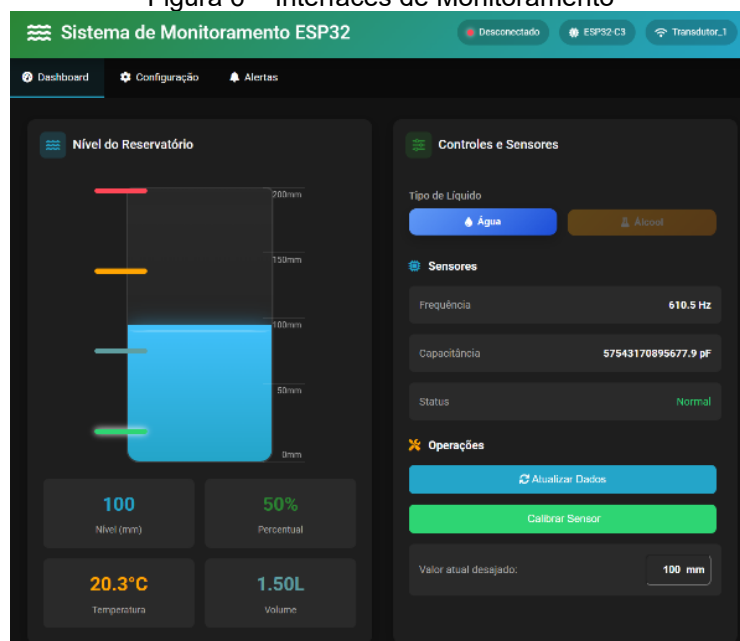
$$h(C_{sensor}(f)) = \left[\frac{C_{sensor}}{2\pi\epsilon_0} - \frac{L}{B} \right] \cdot \frac{B \cdot A}{B - A} \quad (12)$$

4.4.4 Altura do Líquido para as interfaces de monitoramento

Os valores de nível, capacitância e frequência calculados são enviados a cada 100 milissegundos para uma interface principal e para um o display Oled, que foi instalado na estrutura do sensor, com a função de exibir os valores calculados.

A interface principal é uma *WebPage*, Figura 6, que fica armazenada dentro do *Esp32C3*, que foi configurado como servidor e roteador, permitindo que o usuário se conecte via *wireless* e monitore em tempo real os valores medidos. Na interface também é possível configurar os valores geométricos do reservatório assim como refazer a calibração do sensor.

Figura 6 – Interfaces de Monitoramento



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A validação do transdutor de nível e do sistema de medição contínua desenvolvido foi realizada por meio de uma série de testes experimentais. A configuração física utilizada para os experimentos é detalhada na Figura 2. Os testes foram conduzidos utilizando o sensor capacitivo cilíndrico construído, o qual foi posicionado em um reservatório de acrílico transparente, permitindo a observação visual do nível líquido à medida que era gradualmente preenchido.

Com a variação do nível, a capacitância do sensor varia proporcionalmente, conforme os princípios teóricos apresentados. Como a haste capacitiva está conectada ao circuito oscilador do NE555, essa variação na sua capacitância provoca uma alteração correspondente na frequência do sinal de saída do oscilador. Essa frequência é então lida e processada continuamente pelo microcontrolador ESP32C3.

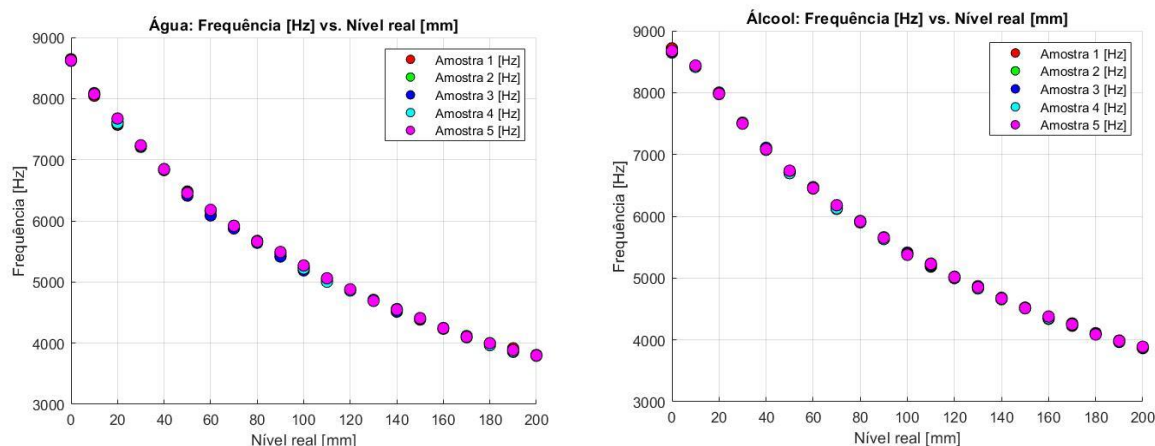
Para a coleta de dados, utilizou-se uma fita métrica fixada junto à haste capacitiva, com uma escala de 0 a 20 centímetros. Os valores de amostra foram coletados a cada 1 centímetro de elevação do nível. O nível foi elevado adicionando o líquido manualmente no reservatório, utilizando primeiramente água potável e posteriormente álcool 99.7%. O experimento foi replicado 5 vezes para cada ponto de medição, a uma temperatura medida de 21 graus Celsius, gerando um total de 5 amostras por ponto, o que permitiu uma análise estatística da dispersão dos dados.

A temperatura da água interfere diretamente na permissividade, o que leva ao uso de um polinômio para ajustar a permissividade da água a partir da medição da temperatura. Este método baseia-se na correlação apresentada por Malmberg e Maryott (1956, p. 1), onde a equação (13) apresentada é utilizada para calcular a constante dielétrica em função da temperatura.

$$\varepsilon_{ag} = 87,740 - 0,40008T + 9,398(10 - 4)T^2 - 1,410(10 - 6)T^3 \quad (13)$$

O comportamento da frequência do oscilador em função do nível da água e álcool é ilustrado no gráfico apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Frequência do oscilador versos o nível real do líquido.

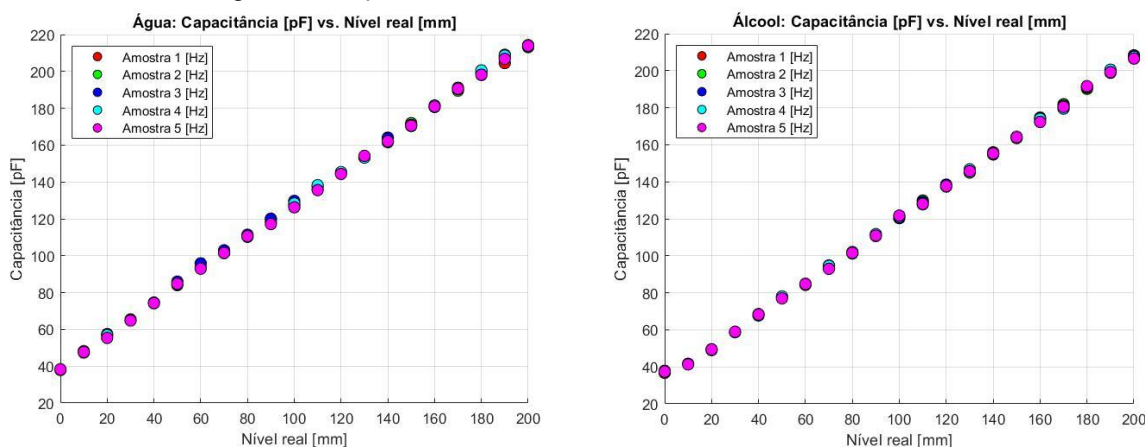


Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 6, observa-se que a frequência de saída do oscilador diminui de forma consistente à medida que o reservatório é preenchido e o nível do líquido se eleva. Essa relação é esperada e consistente com o princípio de funcionamento do oscilador, onde o aumento da capacitância do sensor, devido ao preenchimento com um dielétrico de maior permissividade, resulta em uma diminuição da frequência, conforme a Equação (7).

Utilizando os dados de frequência amostrados, os valores correspondentes para a capacitância do sensor foram calculados aplicando a Equação (9). Os resultados dessa conversão de frequência para capacitância em função do nível, apresentados na Figura 8, demonstraram uma correlação linear e como esperado, o aumento da capacitância proporcional a elevação do nível.

Figura 8 - Capacitância do sensor versos o nível real do líquido.

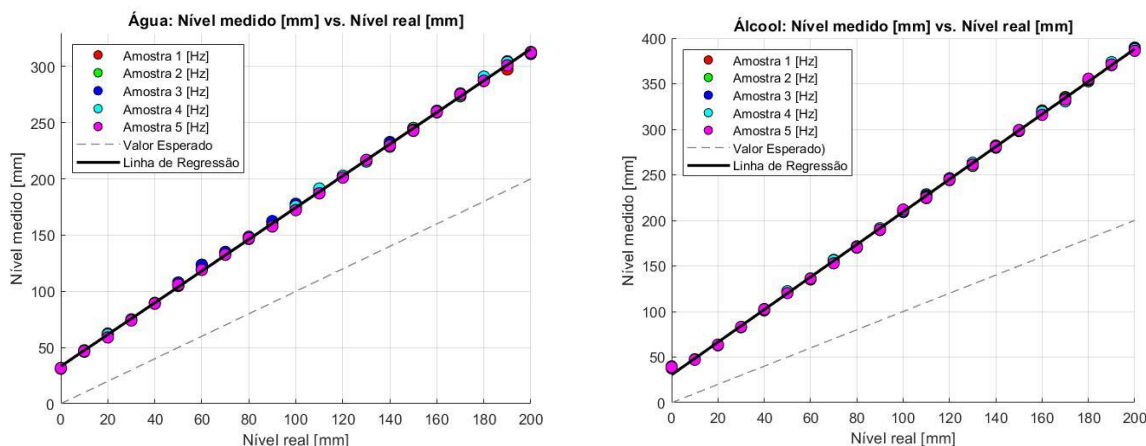


Fonte: Autor.

Os dados de capacitância calculada são então utilizados para correlacionar a resposta de nível dada pela Equação (12) com o nível real medido. A Figura 9 ilustra

a relação entre o nível calculado pelo sistema e o nível real do líquido no reservatório, demonstrando o desempenho geral do transdutor de nível.

Figura 9 – Nível medido pelo sistema versus nível real do líquido.



Fonte: Autor.

Conforme a Figura 9, o modelo teórico (Equação 12) apresentou um erro sistemático expressivo em relação aos dados experimentais (pontos azuis). Para o ajustar e, conseqüentemente, melhorar a precisão do sistema, foi implementada uma calibração baseada em regressão linear, representada pela linha preta na Figura 8. Primeiramente, um algoritmo desenvolvido no MATLAB (MATHWORKS, 14 jun. 2025) utilizou os dados de medição (pontos azuis) para modelar a relação entre o nível medido teoricamente e o nível real, calculando os coeficientes angular e linear dessa tendência. As funções resultantes, que modelam o erro do sistema, são apresentadas na Equação (14) para a água e na Equação (16) para o álcool.

Na sequência, para formular a função de correção final, essas equações de regressão foram matematicamente invertidas, deixando o valor real da altura do líquido como a variável dependente. As equações de correção resultantes, demonstradas na Equação (15) para água e na Equação (17) para o álcool, são implementadas no microcontrolador para corrigir os erros sistemáticos e converter a leitura do sensor no valor de nível real ajustado.

$$h_{\text{Água_medida}}(C_{\text{sensor}}((f))) = 1,4117 \cdot h_{\text{Água_real}} + 33,2125 \quad (14)$$

$$h_{\text{Água_real}} = \frac{h_{\text{Água_medida}}(C_{\text{sensor}}((f))) - 33,3125}{1,4117} \quad (15)$$

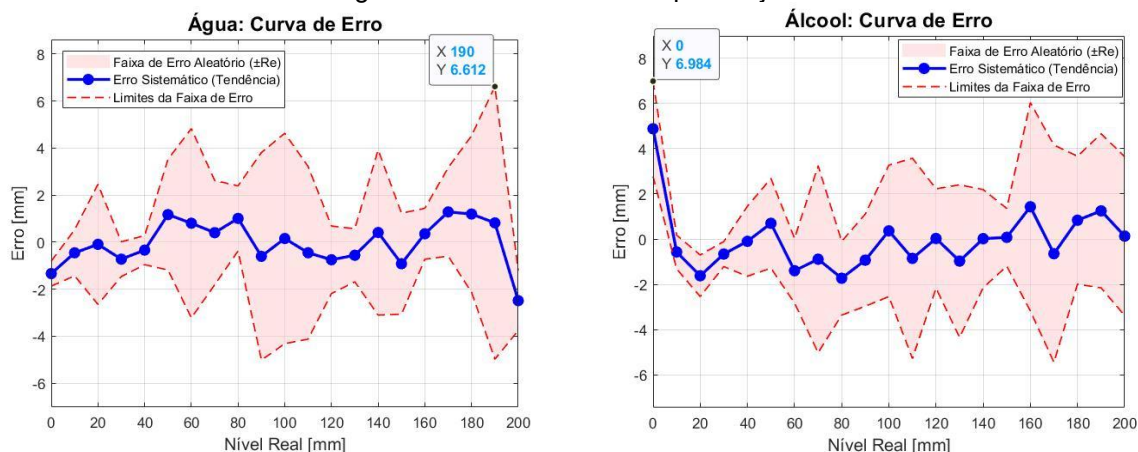
$$h_{\text{Álcool_medido}}(C_{\text{sensor}}((f))) = 1,7883 \cdot h_{\text{Álcool_real}} - 30,5012 \quad (16)$$

$$h_{\text{Álcool_real}} = \frac{h_{\text{Álcool_medido}}(C_{\text{sensor}}((f))) - 30,5012}{1,7883} \quad (17)$$

Com a função corrigida, o desempenho do sistema foi analisado a partir do estudo dos erros de medição. Conforme Albertazzi e Sousa (2007), o erro de medição pode ser decomposto em duas parcelas: sistemática e aleatória. A parcela sistemática

corresponde à tendência média do erro, enquanto a aleatória está ligada à dispersão e repetitividade dos resultados. A análise subsequente, detalhada na Figura 10, quantifica ambas as parcelas para validar o desempenho do transdutor após o ajuste.

Figura 10 – Curvas de erro após o ajuste.

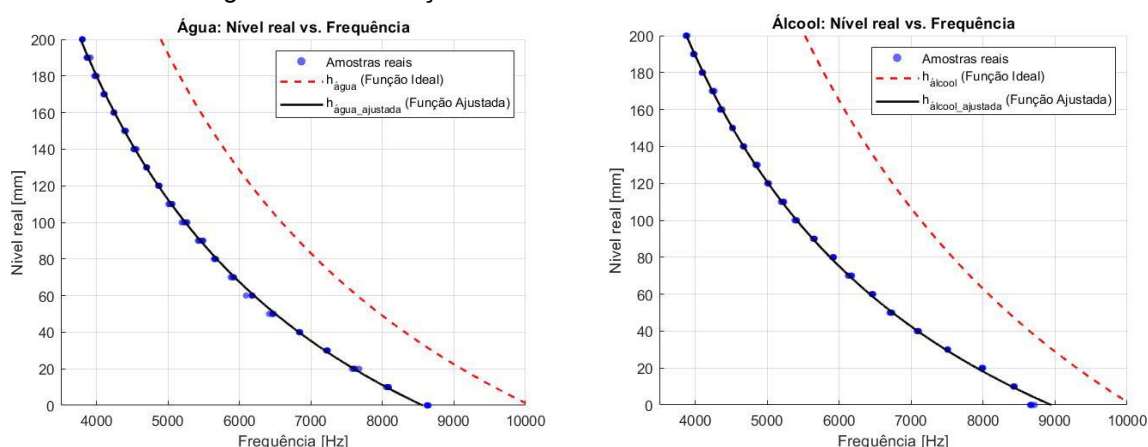


Fonte: Autor.

A Figura 10 detalha a curva de erros do transdutor. Este gráfico ilustra a distribuição dos erros de medição, já com a função de ajuste aplicada, ao longo de todo o intervalo de nível do líquido medido.

A Figura 11 ilustra o efeito da função de ajuste, comparando o modelo teórico ideal com o modelo corrigido. Neste gráfico, a linha tracejada vermelha representa a função ideal Equação (12), que não possui nenhum ajuste. Os pontos azuis são os dados reais coletados no experimento. A linha preta contínua, por sua vez, representa a função ajustada Equação (15) para água e Equação (17) para álcool.

Figura 11 – Mudança do valor de nível medido versor o nível real.



Fonte: Autor.

O erro sistemático é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível, o erro aleatório, por sua vez, é componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. (INMETRO, 2012). Na Figura 10, a Tendência é apresentada pela linha azul contínua e representa o erro sistemático, que foi calculado a partir da

diferença entre o valor esperado e o valor médio das amostras no ponto medido. A intensidade do erro aleatório é quantificada pela Repetitividade (Re), que define a faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório é esperado com uma dada probabilidade (Albertazzi e Sousa, 2007).

Para estabelecer uma faixa de confiança estatística para o erro aleatório a partir de um número finito de amostras, a repetitividade é calculada pelo produto do desvio-padrão, das medições pelo coeficiente t-Student (Albertazzi e Sousa, 2007). Para esta análise, foram consideradas 5 amostras por ponto, resultando em 4 graus de liberdade. Para garantir uma probabilidade de 95,45% do erro estar dentro da faixa demonstrada e considerando os 4 graus de liberdade, utilizou-se um coeficiente t de Student tabelado de 2,869.

A análise da curva de erros para a água revela um bom desempenho do transdutor, com a tendência, erro sistemático, oscilando próximo de 0 milímetros e atingindo um valor máximo de aproximadamente 1,7 milímetros e mínimo de -2,3 mm, enquanto a repetitividade, erro aleatório, se mantém controlada numa faixa máxima de $\pm 6,612$ milímetros. Para o álcool, o sistema também apresenta um erro sistemático em torno de zero com um valor de erro máximo 5 milímetros e um erro mínimo de -1,9 mm, e uma repetitividade máxima de $\pm 6,984$ milímetros.

Dessa forma, a análise dos erros, considerando os desvios máximos, pode ser resumida em $\pm 6,612$ milímetros para a medição de água e $\pm 6,984$ milímetros para a medição do álcool.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu com sucesso o desenvolvimento, a construção e a validação de um sistema de medição contínua de nível, baseado em um transdutor capacitivo cilíndrico. O protótipo integrou um sensor construído com materiais acessíveis, um circuito oscilador com o CI NE555 para a conversão de capacitância em frequência e um microcontrolador ESP32C3 para o processamento de dados e monitoramento em tempo real.

Os resultados experimentais confirmaram a viabilidade do sistema, demonstrando a relação teórica entre o aumento do nível do líquido, o aumento da capacitância e a correspondente diminuição da frequência de saída do oscilador. A análise dos dados revelou que o modelo matemático teórico apresentou desvios significativos em relação ao comportamento prático, tornando necessária a implementação de uma função de ajuste por regressão linear para aprimorar a acurácia das medições.

A análise metrológica, baseada na construção da curva de erros, revelou um bom desempenho do transdutor para a medição de nível de água e álcool. A tendência, erro sistemático, residual se mostrou próxima de zero e a repetitividade (erro aleatório) se manteve em níveis relativamente baixos, indicando boa precisão.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de diferentes materiais isolantes para o eletrodo interno, a fim de otimizar a sensibilidade e a linearidade do sensor. Adicionalmente, a implementação de um modelo de compensação de temperatura mais sofisticado poderia aprimorar significativamente a precisão do sistema para uma gama mais ampla de fluidos e condições operacionais.

REFERÊNCIAS

MEGGA INSTRUMENTOS. **Por que medir o nível de líquidos e como isso impacta os processos industriais?**. [S. l.]: Megga Instrumentos, 2014. Disponível em: <https://meggainstrumentos.com.br/por-que-medir-o-nivel-de-liquidos-e-como-isso-impacta-os-processos-industriais/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

NIVETEC. **Desafios e soluções em medição de nível para indústrias químicas**. [S. l.]: Nivetec, 21 nov. 2024. Disponível em: <https://nivetec.com.br/industrias-quimicas/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SERVO. **Sensor de nível capacitivo**. [S. l.]: Servo, 2010. Disponível em: <https://servo.ind.br/sensor-nivel-capacitivo>. Acesso em: 14 jun. 2025.

REVERTER, Ferran; LI, Xiujun; MEIJER, Gerard C. M. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 138, n. 1, p. 1-8, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.027>. Acesso em: 5 out. 2025.

SILVA, Joeliton de Sousa; SOUSA, Renato Santos; EVANGELISTA, Thamyris da Silva. Protótipo de baixo custo utilizando a plataforma Arduino para monitoramento da qualidade da água. In: COBENGGE, 2024. Anais... [S.l.]: ABENGGE, 2024. Disponível em: https://abenge.org.br/sis_artigo_com_capa.php/?cod_trab=5204. Acesso em: 4 jun. 2025.

PROCESS SENSING. What Are The Most Common Types Of Level Sensing Methods And How Do They Differ?. [S. l.]: Process Sensing, 25 jan. 2023. Disponível em: <https://www.processsensing.com/en-us/blog/Most-common-types-of-level-sensing-methods-and-how-they-differ.htm>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ELPROCUS. Different Types of Level Sensors and Their Applications. Elprocus, 2021. Disponível em: <https://www.elprocus.com/different-types-level-sensors-applications/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

KWOCO. Level Sensors Overview: Types, Applications & Selection Guide. [S. l.], 2009. Disponível em: <https://kwoco-plc.com/level-sensors-overview/>.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v. 3: Eletromagnetismo.

TOGHYANI RIZI, Majid; SHAHROKH ABADI, Mohammad Hadi. Analytical modeling of a coaxial cylindrical probe capacitive sensor based on MATLAB/Simulink for conductive liquids level measurements. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 3024-3036, jul. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318795002_Analytical_modeling_of_a_coaxial_cylindrical_probe_capacitive_sensor_based_on_MATLABSimulink_for_conductive_liquids_level_measurements#fullTextFileContent. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRAGA, Newton C. O circuito integrado 555 (ART011). Instituto Newton C. Braga, 2009. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/592-o-circuito-integrado-555-art011>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32-C3 Series Datasheet. [S. l.], 14 abril 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.

Arduino Documentation. (29 abril 2025). pulseIn(). Recuperado de: <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/advanced-io/pulseIn/>.

MALMBERG, C. G.; MARYOTT, A. A. Dielectric Constant of Water from 0° to 100° C. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Washington, v. 56, n. 1, p. 1-8, jan. 1956. Disponível em: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/56/jresv56n1p1_a1b.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

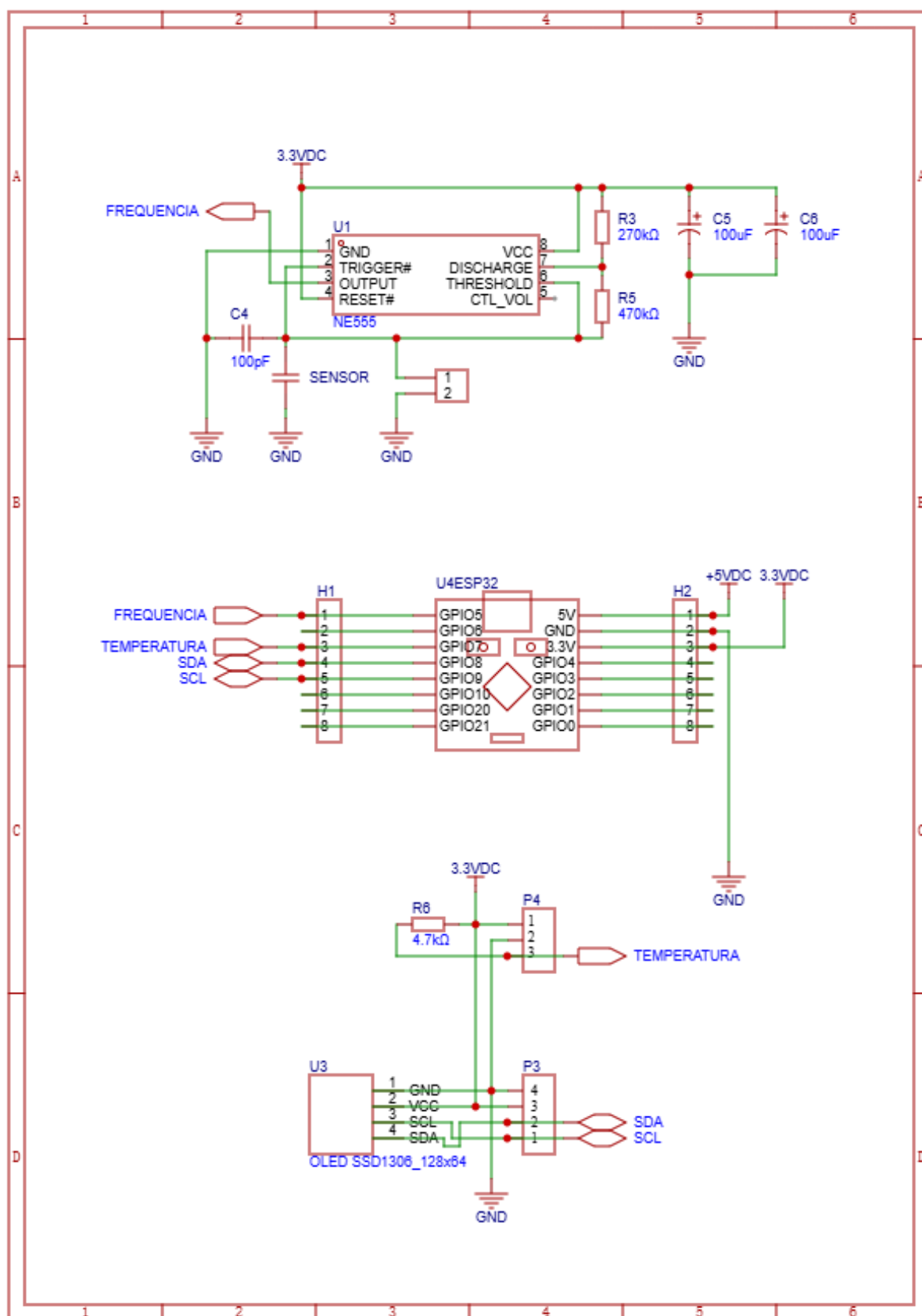
MATHWORKS. polyfit - Polynomial curve fitting. MATLAB. [S. l.]: MathWorks, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>. Acesso em: 14 jun. 2025.

ALBERTazzi, Armando; SOUSA, André Roberto de. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. Barueri, SP: Manole, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). 1. ed. Luso-Brasileira. Duque de Caxias, RJ : INMETRO , 2012. Disponível em: https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim_2012.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.



APÊNDICE A – Circuito Oscilador





MAICON LUCAS ANTERO

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR DE NÍVEL CAPACITIVO CILÍNDRICO
COM UM SISTEMA DE MEDIÇÃO CONTÍNUA**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville de 10 de dezembro de 2025.

Prof. Rodrigo Coral, Dr. Eng.
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Prof. José Flávio Dums, Dr. Eng
Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Prof. Michael Klug, Dr. Eng
Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville