

Calibração e Validação de Sensores de Baixo Custo para Monitoramento Hídrico Embarcado em ROV

Geovanna Fernandes Freitas¹, Danielly Dantas Nunes², Leibiane Silva Barbosa³, Maria Eduarda Teixeira⁴, Pedro Augusto Souza Cunha⁵, Sueli Moura Bertolino⁶

¹²³⁴⁵⁶ Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – Uberlândia, MG – Brasil

¹geovanna.fernandes727@gmail.com; ²danielly.nunes@ufu.br;

³leibiane7@ufu.br; ⁴mariaetc@ufu.br; ⁵pedro.cunha@ufu.br;

⁶suelibertolino@ufu.br

Abstract. *Water quality monitoring is essential for water resources management, although the high cost of multiparameter equipment limits its application in continuous monitoring programs. This study performed the calibration and validation of low-cost sensors for measuring electrical conductivity, pH, temperature and turbidity, integrated with the ESP32 microcontroller, with the aim of incorporating them into a ROV (Remotely Operated Vehicle) prototype for aquatic environmental monitoring. The sensors were individually validated under laboratory conditions (TRL 4). The results demonstrated satisfactory linear behavior and good agreement with reference equipment, highlighting the potential of low-cost sensor-based systems as a viable and scalable alternative for environmental monitoring of physicochemical water parameters.*

Resumo. *O monitoramento da qualidade da água é essencial para a gestão de recursos hídricos, embora o elevado custo de equipamentos multiparâmetro limite sua aplicação em programas contínuos. Este estudo realizou a calibração e validação de sensores de baixo custo para medição de condutividade elétrica, pH, temperatura e turbidez, integrados ao microcontrolador ESP32, com vistas à sua incorporação em um protótipo de ROV (Veículo Operado Remotamente) para monitoramento ambiental aquático. Os sensores foram validados individualmente em condições laboratoriais (TRL 4). Os resultados evidenciaram comportamento linear satisfatório e boa concordância com equipamento de referência, demonstrando o potencial de sistemas baseados em sensores de baixo custo como alternativa viável e escalável para o monitoramento ambiental de parâmetros físico-químicos da água.*

1. Introdução

A qualidade da água é fundamental para a integridade ambiental de bacias hidrográficas e para usos como abastecimento, irrigação e preservação de ecossistemas. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357 estabelece limites para parâmetros físico-químicos, reforçando a necessidade de monitoramento sistemático.

O modelo convencional, baseado em coletas pontuais e análises laboratoriais, apresenta limitações de custo, cobertura e resolução temporal, especialmente em ambientes lênticos (Zainurin et al., 2022). Como alternativa, sistemas embarcados com sensores de baixo custo integrados a microcontroladores e à IoT têm ampliado a viabilidade do monitoramento contínuo in situ (Manoharan et al., 2025).

Nesse cenário, ROVs (Veículos Operados Remotamente, do inglês Remotely Operated Vehicles) com sensores multiparâmetro possibilitam medições em diferentes profundidades e aquisição simultânea de dados em tempo real (Chang et al., 2021). Diante disso, este estudo apresenta a calibração e validação laboratorial de sensores de baixo custo para os parâmetros condutividade elétrica, pH, temperatura e turbidez, integrados ao microcontrolador ESP32, como etapa inicial do desenvolvimento de um protótipo de ROV para monitoramento in situ da qualidade da água, situando-se no nível TRL 4.

2. Materiais e Métodos

A metodologia foi estruturada em três eixos: seleção e calibração dos sensores, arquitetura eletrônica embarcada no ESP32 e avaliação metrológica frente a equipamentos comerciais de referência. Essa etapa corresponde à validação laboratorial dos componentes individuais do sistema, situando o trabalho no nível TRL 4, como fase preparatória à futura integração embarcada ao protótipo de ROV.

Foram selecionados os parâmetros condutividade elétrica, temperatura, pH e turbidez, com base na literatura e na Resolução CONAMA nº 357, utilizando o ESP32 como unidade de controle. A confiabilidade das medições considerou fontes de erro e procedimentos de calibração multiponto para sensores eletroquímicos e ópticos. Como parte do desenvolvimento do ROV foram considerados estudos relacionados à hidrodinâmica e materiais de impressão 3D.

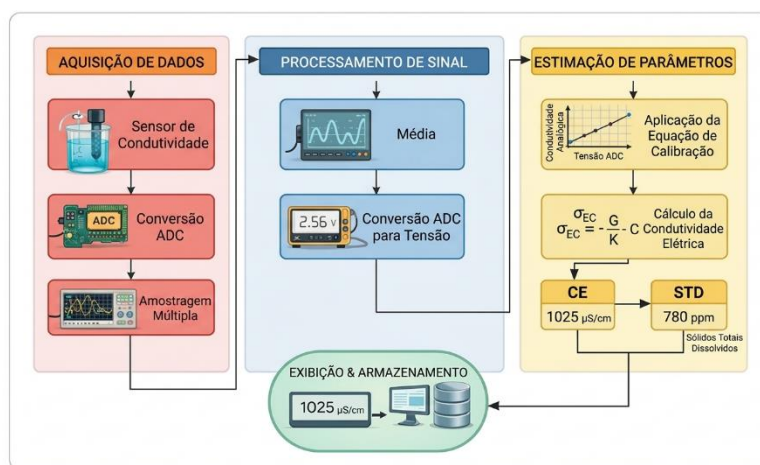


Figura 1. Fluxograma do algoritmo de aquisição e processamento das leituras do sensor de condutividade. Fonte: Autores, 2026 (adaptado com a utilização de IA).

2.1. Sensor de Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (EC) permite estimar a concentração de íons dissolvidos e, indiretamente, os sólidos totais dissolvidos (TDS) por fator de conversão empírico (Von Sperling, 1996). A calibração utilizou cinco soluções padrão de 200, 400, 600, 800 e 1000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, representativas de águas naturais superficiais. A solução de 1000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ foi adotada como estoque, e as demais foram obtidas por diluição sucessiva.

O procedimento consistiu na imersão do sensor em cada solução, registrando múltiplas leituras de tensão para cálculo da média. A curva de calibração foi obtida por regressão linear entre as tensões médias e as condutividades conhecidas (Fraden, 2010). O algoritmo embarcado realiza aquisição do sinal analógico, média de múltiplas amostras

para redução de ruído, conversão em tensão, aplicação da equação de calibração e estimativa do TDS por fator empírico entre 0,50 e 0,70 (APHA, 2023).

2.2. Sensor de pH

O pH é um parâmetro adimensional que expressa a concentração de íons H^+ em solução, influenciando a solubilização de sais, a disponibilidade de nutrientes e a toxicidade de compostos (Fraden, 2010). O sensor opera por princípio potenciométrico, no qual a diferença de potencial entre um eletrodo sensível ao H^+ e um eletrodo de referência é descrita pela equação de Nernst, gerando saída analógica proporcional ao pH (Zainurin et al., 2022).

O sinal foi condicionado por divisor de tensão ($R1 = 10\text{ k}\Omega$; $R2 = 20\text{ k}\Omega$) conectado ao GPIO34 do ESP32. A calibração utilizou o método de dois pontos com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, permitindo ajuste linear dos coeficientes de inclinação (*slope*) e intercepto, incorporados à programação para conversão direta da tensão em pH.

2.3. Sensor de Temperatura

A temperatura influencia diretamente processos como a solubilidade de gases, a cinética de reações e a dinâmica dos ecossistemas aquáticos (Fraden, 2010). Optou-se por sensor digital, em razão de sua maior robustez, menor suscetibilidade a interferências elétricas e facilidade de integração com o ESP32, eliminando a necessidade de circuitos de condicionamento de sinal exigidos por sensores analógicos do tipo NTC (Fraden, 2010). Um resistor de pull-up de $10\text{ k}\Omega$ foi utilizado para estabilizar o nível lógico no barramento de comunicação.

2.4. Sensor de Turbidez

A turbidez é uma medida da clareza da água, associada à presença de partículas em suspensão, e constitui parâmetro relevante para a avaliação da qualidade hídrica conforme a Resolução CONAMA nº 357 (Anderson, 2005). O sensor de turbidez opera por princípio óptico, medindo a intensidade da luz dispersa por partículas em ângulo de 90° em relação ao feixe incidente (princípio nefelométrico). O sinal analógico de saída foi conectado a uma entrada ADC do ESP32 para leitura e conversão dos valores. A calibração foi realizada com amostras de água com turbidez conhecida, determinada por equipamento de referência.

2.5. Concepção do ROV

A concepção do Veículo Operado Remotamente (ROV) foi baseada em princípios de biomimética inspirados na morfologia de raias e mantas, organismos que apresentam elevada eficiência hidrodinâmica e baixo consumo energético durante a locomoção aquática (Wang et al., 2024). Além disso, esse formato oferece maior volume interno para acomodação de componentes eletrônicos e sensores.

Para a fabricação da estrutura do protótipo será utilizado o filamento de polietileno tereftalato glicol-modificado (PETG), amplamente empregado em manufatura aditiva por impressão 3D. A escolha desse material deve-se à sua elevada resistência mecânica, baixa absorção de umidade e boa estabilidade dimensional, características que proporcionam melhor desempenho em ambientes aquáticos quando comparado a materiais como o PLA (Santana et al., 2018).

3. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados dos procedimentos de calibração laboratorial dos sensores de condutividade elétrica, pH, temperatura e turbidez, seguidos da comparação entre as medições do sistema desenvolvido e as de uma sonda multiparâmetro comercial de referência e por fim, mostra a etapa atual de concepção do ROV. Todos os ensaios foram conduzidos em ambiente controlado de laboratório, correspondendo ao nível TRL 4.

3.1. Sensor de Condutividade Elétrica

A regressão linear dos dados experimentais resultou na equação de calibração $V = 0,0013C - 0,0572$, com $R^2 = 0,9977$, indicando que 99,77% da variabilidade da tensão é explicada pela condutividade elétrica. Essa forte linearidade é compatível com sensores eletroquímicos de condutividade (Fraden, 2010) e sugere estabilidade do circuito de medição.

A comparação com a sonda de referência mostrou que ambos os instrumentos superestimaram os valores reais, com maior desvio na sonda comercial, que registrou $1037 \mu S \cdot cm^{-1}$ para a solução de $1000 \mu S \cdot cm^{-1}$, enquanto o sensor calibrado apresentou $956 \mu S \cdot cm^{-1}$, com menor dispersão.

Diferenças entre a temperatura da amostra, das soluções padrão e dos sistemas de compensação térmica podem gerar desvios (APHA, 2023). Além disso, falhas de calibração, variações na constante de célula e incrustações nos eletrodos podem comprometer a precisão.

3.2. Sensor de pH

A calibração em dois pontos (pH 4,0 e 7,0) resultou em slope = $-9,0909$ e intercepto = $21,86$, confirmando o comportamento esperado para sensores potenciométricos baseado na equação de Nernst (Skoog et al., 2014).

Em pH 7,0, o sensor apresentou média de 6,97 e erro absoluto de 0,03, indicando elevada acurácia. Em pH 4,0, a média foi 4,16, com erro de 0,16, refletindo limitações do modelo linear de dois pontos e menor sensibilidade em meio ácido. Recomenda-se calibração multiponto e compensação térmica para aprimoramento do sistema.

3.3. Sensor de Temperatura

A avaliação do desempenho do sensor de temperatura foi conduzida verificando estabilidade operacional, precisão das medições e contribuição para a qualidade dos dados. O sensor apresentou comportamento estável e consistente, com baixa variabilidade entre medições sucessivas. A integração com o sistema permitiu a compensação térmica das leituras de condutividade elétrica, contribuindo para o aumento da confiabilidade dos dados obtidos.

3.4. Sensor de Turbidez

O sensor de turbidez TS-300B não apresentou desempenho satisfatório para medições quantitativas de turbidez, uma vez que os valores de tensão não mantiveram relação consistente com os níveis de NTU aplicados. As inconsistências observadas indicam limitações relacionadas à linearidade do sensor, interferência da luz ambiente e à

resolução do ADC interno do ESP32. Como melhorias, recomenda-se a utilização de um conversor ADS1115 (16 bits), o isolamento óptico do sensor e a adoção de médias de múltiplas leituras para redução de ruídos. Apesar das limitações, o sistema demonstra potencial para aplicações qualitativas e comparativas em monitoramento ambiental de baixo custo.

3.5. Concepção do ROV

Até o momento, foi desenvolvida por impressão 3D a região central do corpo do ROV biomimético, correspondente à porção principal da estrutura inspirada em mantas, ainda sem a implementação das nadadeiras laterais (Figura 2). Essa etapa inicial teve como objetivo priorizar a validação do espaço interno destinado à acomodação dos componentes eletrônicos. Adicionalmente, a região frontal da estrutura foi projetada para permitir o posicionamento dos sensores em contato direto com a água.

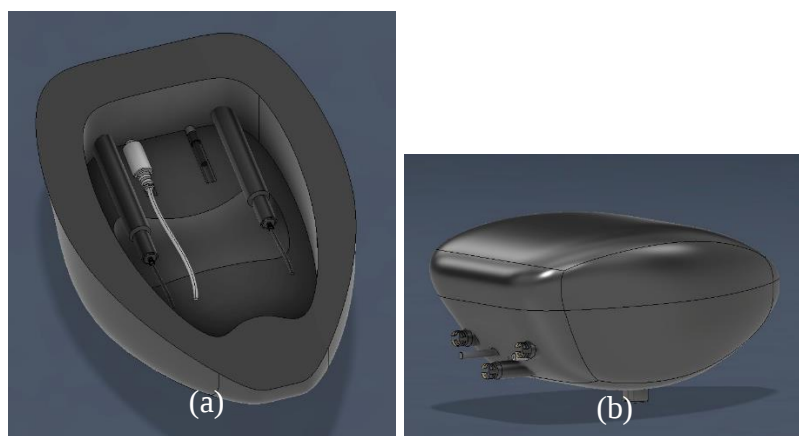


Figura 2. A) Vista superior do modelo 3D, observando-se o interior com sensores alocados. B) Vista em perspectiva do modelo 3D, verificando o posicionamento externo dos sensores. Fonte: Autores, 2026.

4. Considerações Finais

O estudo apresentou a calibração e validação laboratorial de sensores de baixo custo integrados ao ESP32 para os parâmetros condutividade elétrica, pH, temperatura e turbidez, como etapa inicial do desenvolvimento de um protótipo de ROV, voltado ao monitoramento *in situ* da qualidade da água. Os ensaios foram realizados em ambiente controlado de laboratório (TRL 4), sem integração embarcada completa ao veículo, que constitui etapa futura do projeto. Os resultados indicam viabilidade técnica para os parâmetros analisados, com desempenho satisfatório de três sensores avaliados. Adicionalmente, a etapa inicial de concepção do ROV biomimético permitiu validar a viabilidade construtiva da estrutura central desenvolvida por impressão 3D em PETG, bem como o espaço destinado à futura integração dos sensores e demais componentes eletrônicos embarcados.

A convergência entre os parâmetros monitorados e os critérios da Resolução CONAMA nº 357 confirma a adequação do sistema às demandas regulatórias. Apesar do desempenho insatisfatório do sensor de turbidez, os resultados obtidos permitiram identificar oportunidades de melhoria, incluindo a utilização de conversores analógico-digitais de maior resolução, como o ADS1115.

Como perspectivas futuras, destacam-se a otimização e revalidação do sensor de turbidez, a adoção de calibração multiponto e compensação térmica para o sensor de pH, a finalização da estrutura biomimética inspirada em mantas com a incorporação das nadadeiras laterais e a integração simultânea de todos os sensores validados em uma única plataforma embarcada. A consolidação dessas etapas permitirá a realização de ensaios em ambiente relevante, elevando a maturidade tecnológica do sistema do nível TRL 4 para TRL 5 e aproximando o protótipo de uma ferramenta operacional para monitoramento ambiental aquático em tempo real.

Referências

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, D.C.: APHA, 2023.

ANDERSON, C. (2005). Chapter A6, Section 6.7 – Turbidity (Version 2.1). **U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations** 09-A6.7. <https://doi.org/10.3133/twri09A6.7>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CHANG, H. C.; CHEN, Y. C.; LIN, Y. C.; LIN, Y. T.; HUANG, Y. T. (2021). **Autonomous water quality monitoring and water surface cleaning for unmanned surface vehicles**. *Sensors*, v. 21, n. 4, p. 1102. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041102>.

FRADEN, Jacob. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 3. ed. New York: Springer, 2004.

MANOHARAN, Dinesh et al. (2021). **Design and development of autonomous amphibious unmanned aerial vehicle for in situ water quality assessment**. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, v. 9, p. 182–204. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0036>.

NASA. **Technology Readiness Levels**. Disponível em: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>.

SKOOG, Douglas A. et al. **Fundamentos de química analítica**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

WANG, Sen et al. **Hydrodynamic characterization of manta rays in bowed gliding state**. *Ocean Engineering*, S.1 v. 294, art. 116799, p. 1-8, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116799>.

ZAINURIN, Siti Nadhirah et al. (2022). **Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 21, p. 14080. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>.