

Desenvolvimento e comparação de sensores de condutividade de baixo custo para monitoramento contínuo da água

Nicole Simas de Souza¹, Rafael de Carvalho Bueno² & Tobias Bernward Bleninger³

Resumo:

O monitoramento contínuo da condutividade elétrica é uma ferramenta importante para avaliar a qualidade de águas superficiais, permitindo identificar possíveis fontes de contaminação. No entanto, o alto custo de condutivímetros comerciais limita sua aplicação em redes de monitoramento de maior escala. Neste estudo, foram desenvolvidos dois sensores de condutividade, construídos com variações de área, espessura e espaçamento entre eletrodos, e comparados a um sensor comercial de baixo custo, considerando também o uso de corrente contínua e de uma placa transmissora com excitação em corrente alternada. Adicionalmente, foi investigado o efeito da resolução do conversor analógico-digital (ADC) no desempenho das medições. Os resultados indicaram que o sensor desenvolvido e a excitação em corrente alternada apresentaram melhor desempenho, com maior estabilidade e menor erro em relação às demais configurações. Ensaaios em campo demonstraram a capacidade do sistema em identificar uma pluma salina. Por outro lado, o aumento da resolução do ADC não resultou em ganhos significativos. De forma geral, os resultados demonstram que sensores de baixo custo pode ser aplicados efetivamente no monitoramento contínuo da condutividade elétrica.

Palavras-Chave: Condutividade; Desenvolvimento de sensores; Monitoramento ambiental

Abstract:

Continuous monitoring of electrical conductivity is an important tool for assessing the quality of surface waters, allowing the identification of potential sources of contamination. However, the high cost of commercial conductivity meters limits their application in larger-scale monitoring networks. In this study, two conductivity sensors were developed, constructed with variations in area, thickness, and electrode spacing, and compared to a low-cost commercial sensor, also considering the use of direct current and a transmitter plate with alternating current excitation. Additionally, the effect of the analog-to-digital converter (ADC) resolution on measurement performance was investigated. The results indicated that the developed conductivity cell alternating current excitation showed better performance, with greater stability and lower error compared to the other configurations. Field tests demonstrated the system's ability to identify a saline plume. On the other hand, increasing the ADC resolution did not result in significant gains. Overall, the results demonstrate that low-cost sensors can be effectively applied to continuous monitoring of electrical conductivity.

Key-words: Conductivity; Sensor development; Environmental monitoring

1) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: nicolesimas@ufpr.br

2) Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: rafael.bueno@ufpr.br

3) Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: bleninger@ufpr.br

INTRODUÇÃO

O monitoramento ambiental contínuo de águas superficiais, como rios, lagos e reservatórios, permite o acompanhamento de alterações em propriedades físicas, químicas e biológicas, contribuindo para a preservação da biodiversidade desses ecossistemas. Tais alterações podem indicar possíveis contaminações, auxiliando na identificação de suas fontes.

Um dos parâmetros que pode auxiliar na detecção da contaminação de sistemas hídricos é a condutividade elétrica da água, parâmetro que descreve a capacidade do meio de conduzir corrente elétrica. O aumento da condutividade em águas doces pode indicar contaminação por íons, como sais minerais (de Matos et al., 2023). Estudos demonstram que o lançamento de poluentes, como efluentes domésticos, pode acarretar elevação da condutividade da água (CETESB, 2009). Além disso, a condutividade elétrica da água pode ser utilizada no cálculo de índices de toxicidade e na identificação de características corrosivas. A salinidade, por exemplo, pode explicar impactos observados em organismos aquáticos. Estudos demonstram que a salinidade pode aumentar a toxicidade de poluentes, especialmente compostos orgânicos, além de interferir em processos fisiológicos como a osmorregulação e a atividade enzimática (Xing et al., 2022).

Apesar de úteis no monitoramento hídrico, condutivímetros comerciais capazes de operar em alta frequência apresentam elevado custo de implementação (~R\$ 12000), além de estarem sujeitos a perdas, uma vez que são instalados em áreas desprotegidas. Esses fatores dificultam a realização de um monitoramento contínuo e em larga escala espacial. Neste contexto, sensores de baixo custo tem sido cada vez mais desenvolvidos e empregados no monitoramento contínuo de corpos d'água.

Diversos estudos têm desenvolvido e avaliado diferentes tipos de sensores de baixo custo para o monitoramento da condutividade da água (Carminati & Luzzatto-Fegiz, 2017; Parra et al., 2015; Serrano-Finetti et al., 2019; Visco et al., 2023). Adhikary et al. (2019) desenvolveram um sensor impedimétrico para medição da condutividade da água, com aplicação no monitoramento da poluição associada ao uso de fertilizantes. O protótipo foi desenvolvido para operar em uma faixa de medição de 100 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O erro máximo em escala completa foi de 3,75% na faixa de 0,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Zhang et al. (2013) desenvolveram um sensor de condutividade de quatro eletrodos voltado para aplicações em aquicultura. A utilização de múltiplos eletrodos reduz efeitos de polarização e incrustação, aumentando a precisão das medições. O protótipo apresentou erro absoluto de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, erros relativos de até 1,5% e uma faixa de medição de 0 a 50.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Padmavathi et al. (2024) utilizaram um sensor comercial de baixo custo (TDS Meter V1.0) para monitorar a condutividade elétrica da água. O sistema integrou outros sensores e foi controlado por um microcontrolador ESP32.

Apesar da existência de diversos estudos sobre o desenvolvimento de sensores de condutividade elétrica de baixo custo para o monitoramento ambiental, observa-se uma lacuna na literatura no que se refere à análise comparativa dos efeitos de parâmetros físicos dos eletrodos de baixo custo (e.g., distância, tamanho, espessura e geometria) bem como do tipo de excitação elétrica (corrente alternada ou contínua). Essa lacuna para sensores de baixo custo é particularmente relevante no contexto da preservação de processos de corrosão e da melhoria da precisão das medições a longo prazo. Diante da relevância do monitoramento da condutividade elétrica, e da limitada integração desses fatores em soluções acessíveis com transmissão de dados, este estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar diferentes configurações de eletrodos e tipos de excitação quanto à sua aplicabilidade no monitoramento contínuo da condutividade elétrica de rios, lagos e reservatórios.

Os testes foram conduzidos com base na avaliação de dois sensores desenvolvidos com diferentes espessuras de material, área e distâncias entre eletrodos, bem como de um sensor comercial de baixo custo (TDS Meter V1.0). Adicionalmente, foi realizada a combinação cruzada desses sensores com excitação em corrente contínua e com uma placa de excitação em corrente alternada. Os sensores também foram avaliados quanto à resolução do ADC do microcontrolador. A melhor combinação foi acoplada a um protótipo simples para aplicação em um córrego.

MÉTODOS

Confecção da célula de condutividade

Foram desenvolvidas duas células de condutividade elétrica com características distintas, visando à avaliação de desempenho. A primeira célula (S1) é constituída por dois eletrodos de titânio, de geometria quadrada, com área de 100 mm² cada, espessura de 0,1 mm e espaçamento entre eletrodos de 2 mm (Figura 1a). A segunda célula (S2) apresenta eletrodos também de titânio e de geometria quadrada, porém com área reduzida de 25 mm², espessura de 0,5 mm e distância entre eletrodos de 4 mm (Figura 1b). Adicionalmente, outras células com configurações distintas foram testadas. No entanto, foram observadas dificuldades na fixação dessas células aos componentes eletrônicos.

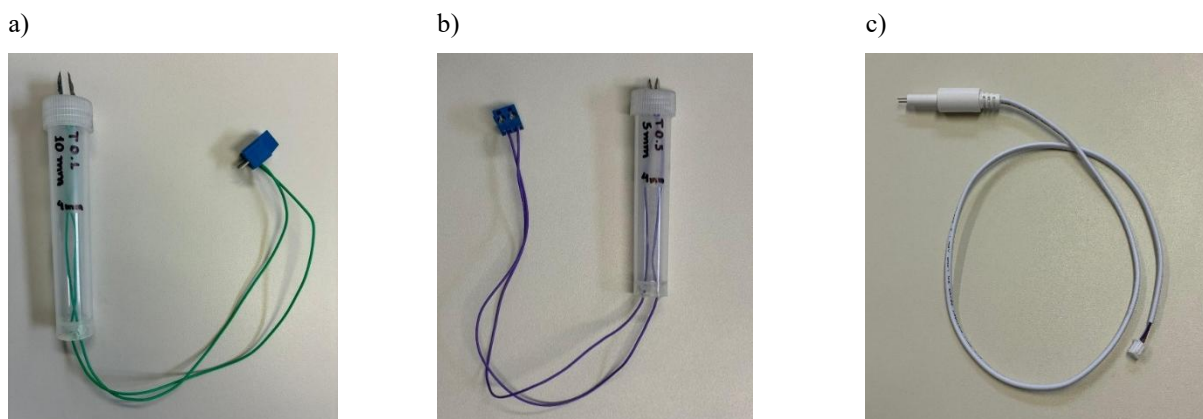


Figura 1. Células de condutividade elétrica avaliadas. a) Célula S1 com eletrodos de titânio (100 mm², 0,1 mm de espessura, espaçamento de 2 mm). b) Célula S2 com eletrodos de titânio de menor área (25 mm², 0,5 mm de espessura, espaçamento de 4 mm). c) Sonda comercial de baixo custo TDS Meter V1.0 (S3).

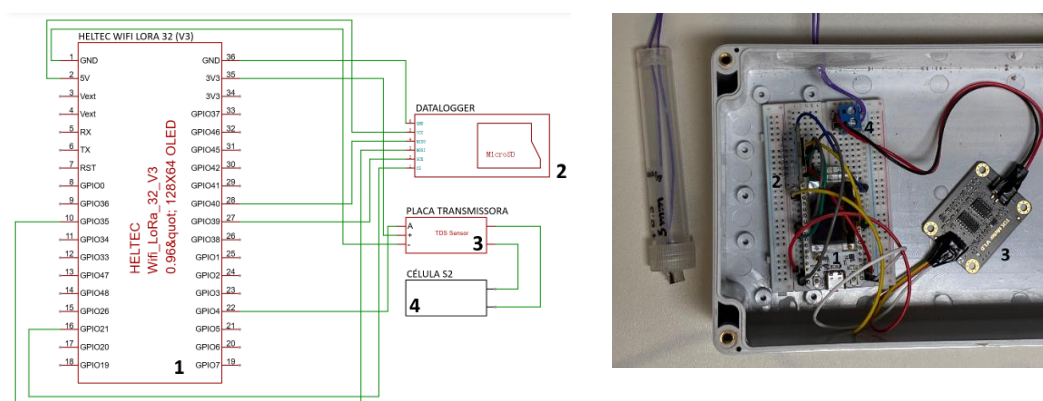
Nesse sistema, um dos eletrodos atua como ânodo e o outro como cátodo. Em solução eletrolítica, a aplicação de uma diferença de potencial estabelece um campo elétrico no meio. Íons de carga negativa deslocam-se em direção ao ânodo, enquanto íons de carga positiva migram em direção ao cátodo, configurando o fluxo iônico responsável pela corrente elétrica no eletrólito. Dessa maneira, quanto maior a salinidade do meio, maior a quantidade de elétrons entre os eletrodos, definindo a condutividade elétrica (Jaffrezic-Renault & Dzyadevych, 2008).

O sistema foi configurado como um divisor de tensão. Para a excitação, um dos eletrodos foi conectado a um pino do microcontrolador configurado como saída digital, fornecendo uma tensão de 3,3 V, enquanto o segundo eletrodo foi conectado ao terra (GND) por meio de um resistor de 1000 Ω. A solução entre os eletrodos atua como uma resistência variável dependente da concentração de íons presentes na água. O resistor limita a corrente elétrica no circuito e possibilita a conversão da variação de resistência da solução em uma variação de tensão mensurável. A tensão no ponto de junção entre o eletrodo e o resistor foi monitorada pelo conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador, permitindo relacionar a variação de tensão com a condutividade elétrica da água.

Uma terceira célula (S3), composta pela sonda comercial TDS Meter V1.0 (Figura 1c), foi analisada para fins de comparação, uma vez que esse tipo de sensor tem sido utilizado em protótipos de baixo custo (Padmavathi et al., 2024). Embora este condutivímetro comercial seja vendido como sensor para medição de sólidos totais dissolvidos (TDS), o dispositivo é, na prática, uma sonda de condutividade elétrica, sendo o TDS estimado a partir de uma conversão empírica da condutividade, o que constitui uma aproximação. A célula comercial de condutividade TDS Meter V1.0 (Figura 1c) possui uma placa transmissora de sinal, na qual a fonte de excitação do sistema é um sinal em corrente alternada (AC). Esse tipo de excitação contribui para minimizar os efeitos de polarização dos

eletrodos, prolongando a vida útil da sonda e aumentando a estabilidade do sinal de saída. Segundo o fabricante, o conjunto completo apresenta precisão de 10% de fundo de escala e faixa de medição aproximada de 0 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para alguns testes, a placa transmissora de sinal foi utilizada em conjunto com os sensores S1 e S2. No caso da célula S2 (Figura 2), os eletrodos foram conectados aos terminais de entrada da placa transmissora, responsável por fornecer a excitação elétrica. A saída da placa foi ligada a uma entrada analógica do microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 (V3), enquanto sua alimentação foi fornecida pelos terminais de 3,3 V e GND do próprio microcontrolador. De forma complementar, a sonda S3 também foi avaliada sem a utilização da respectiva placa transmissora de sinal, sendo esses testes descritos na seção seguinte.

Figura 2. Sistema desenvolvido. (1) microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 (V3); (2) datalogger; (3) placa transmissora de sinal; e (4) célula de condutividade S2.



Calibração e Validação

A calibração foi realizada para quatro configurações diferentes, com o objetivo de avaliar a influência da placa transmissora de sinal na resposta dos diferentes eletrodos (Tabela 1). O procedimento experimental consistiu na análise da condutividade de 12 soluções, variando a condutividade de 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ até 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O aumento foi obtido por meio de adições sucessivas de cloreto de sódio. Os dados obtidos da célula foram registrados em termos de tensão elétrica. Para cada amostra, o sistema foi programado para realizar aquisições com frequência de 1 Hz durante 200 segundos. O valor médio e o desvio padrão das medições foram utilizados como métricas estatísticas para a calibração e validação dos sensores.

Sem o uso da placa transmissora, a excitação foi ativada por apenas 5,5 ms, período durante o qual foram realizadas 100 medições consecutivas. Esse regime tende a intensificar a polarização, pois a excitação é mantida em corrente contínua. Por outro lado, nos casos com o uso da placa, a excitação é fornecida pelo circuito na forma de corrente alternada (AC). Nessa configuração, a excitação é gerada internamente pelo módulo GravityTDS, que fornece diretamente um sinal analógico de saída já condicionado para leitura pelo ADC, sem controle direto do regime de excitação.

Todos os resultados foram comparados com medições realizada em um condutivímetro LUCA-150 MC, equipado com uma célula condutimétrica DJS-1 ($K = 0,998$), com faixa de operação de 0 a 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e acurácia de 2% do fundo de escala. Após este procedimento, a melhor curva para cada uma das cinco configurações foi adotada como curva de calibração. Para a avaliação da qualidade dos ajustes, foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2).

Para a validação dos dados, foram utilizadas quatro amostras independentes (52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 205 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1017 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2970 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Para cada uma das cinco configurações de célula, foram

realizadas medições nas amostras durante 200 segundos, com os resultados convertidos para $\mu\text{S}/\text{cm}$ por meio das curvas de calibração previamente ajustadas. Esses valores foram então comparados com os respectivos valores de referência, permitindo o cálculo do RMSE e do erro relativo como métrica de avaliação do desempenho.

Análise da resposta e resolução do sensor

Os dois eletrodos foram conectados a pinos distintos da placa LoRa ESP32 V3 (Figura 2), que integra um *ADC* com resolução de 12 bits e tensão de referência de 3,3 V. Esse *ADC* é capaz de converter o sinal analógico em até 4095 níveis discretos, permitindo a transformação da tensão medida na célula em um valor digital proporcional. Sensores baseados em medições elétricas podem ter seu desempenho limitado pela resolução do *ADC* (Zheng et al., 2021).

Com o objetivo de avaliar a influência da resolução efetiva do *ADC* na resposta da célula S2, foram realizados ensaios para 4 amostras (10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e variando a atenuação do *ADC* de 11 dB (faixa de 3,3 V com resolução de 0,806 mV) para 2,5 dB (faixa de 1,5 V com resolução de 0,366 mV), por meio das funções de configuração do conversor implementadas na programação do microcontrolador. O processo experimental consistiu na aquisição de dados a cada 1 segundo, durante 60 segundos para cada amostra.

Análise da reprodutibilidade

Embora o titânio apresente elevada resistência à corrosão, a polarização dos eletrodos e os efeitos eletroquímicos associados à passagem de corrente elétrica entre eles podem comprometer a reprodutibilidade do sensor, levando a uma perda mais rápida da calibração ao longo do tempo. Para avaliar a estabilidade de medição das células, os sensores S1, S2 e S3 foram submetidos a ensaios de aproximadamente 18 horas, sendo que os sensores S1 e S2 operaram sem o uso da placa transmissora, enquanto o sensor S3 foi avaliado com a utilização da placa. Eles permaneceram submerso em substância de condutividade média de 1284 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com aquisição de dados a cada 10 minutos, mais condizentes com o monitoramento contínuo de ambientes aquáticos. Para o sensor S1, foi utilizada a atenuação de 2,5 dB, enquanto para os sensores S2 e S3 foi empregada atenuação de 11 dB.

Teste de campo

Para avaliação da célula S2 com a placa transmissora, realizou-se um ensaio de campo no Córrego do Aviário (Curitiba-PR, Brasil). Foi utilizado o sistema proposto (Figura 2) com aquisição de dados a cada 5 segundos. No início do monitoramento, cloreto de sódio foi adicionado a montante do ponto de medição, permitindo observar a resposta do sensor ao aumento da condutividade em água natural. Antes do teste em campo, foi necessária a reformulação de um dos eletrodos, uma vez que a cola utilizada (Poxipol) apresentou degradação por oxidação em contato com a água, levando ao desprendimento do fio. A calibração da célula foi baseada em uma regressão linear para conversão dos dados experimentais.

RESULTADOS

Calibração e Validação

A relação entre a tensão de saída (V) e a condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) indica, de modo geral, um aumento proporcional, ainda que com diferentes formas de ajuste (Figura 3). Na calibração da célula S2, foi observado um comportamento exponencial na ausência da placa transmissora (Figura 3a) e linear quando ela está presente (Figura 3b), mas em ambos os casos o coeficiente de determinação permaneceu alto, $R^2 = 0.9884$ para S2 sem a placa e $R^2 = 0.9854$ para o S2 com a placa (Tabela 1), indicando uma boa relação de calibração. No caso da célula S3, o comportamento exponencial é mantido em ambas as configurações; entretanto, na ausência da placa transmissora (Figura 3d), é observado uma maior dispersão dos pontos experimentais, com redução do coeficiente

de determinação de $R^2 = 0.9885$ para $R^2 = 0.8829$ (Tabela 1), o que sugere maior influência de ruídos ou instabilidades no sistema de medição.

O processo de validação foi realizado pela comparação entre a condutividade medida pelas células S2 sem e com a placa transmissora. A inclusão da placa causou uma redução de aproximadamente 62,2% do RMSE, de 1177,18 para 444,81 $\mu\text{S/cm}$, e a diminuição do erro relativo médio de 60,84% para 26,49% (Tabela 1).

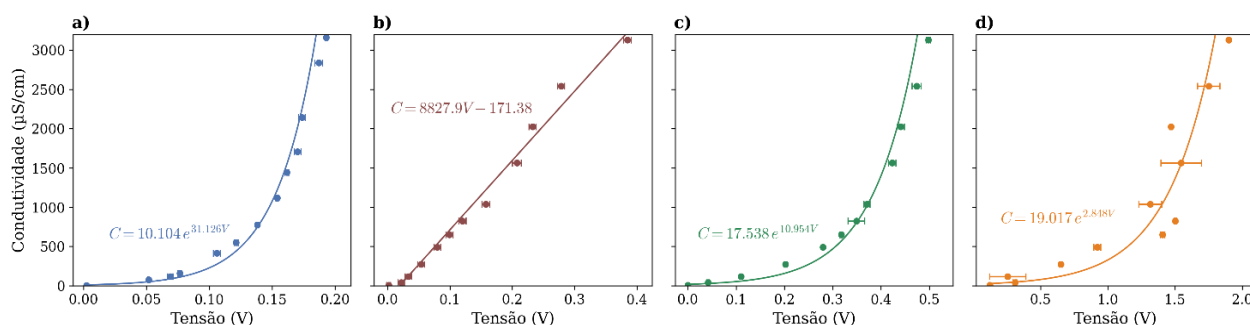


Figura 3. Relação entre o sinal de tensão de saída e a condutividade elétrica, medida pelo condutivímetro de referência, para as células a) S2 sem placa, b) S2 com placa, c) S3 sem placa e d) S3 com placa. Os pontos representam os dados experimentais, com barras de erro correspondentes ao desvio padrão, enquanto as linhas indicam as curvas de calibração ajustadas.

Já na célula S3, os valores de RMSE permaneceram próximos sem o uso da placa e com o uso da placa transmissora, de 786,61 para 776,02 $\mu\text{S/cm}$. No entanto, o erro relativo aumentou significativamente (de 46,81% para 308,52%), evidenciando maior discrepância relativa em relação aos valores de referência, especialmente em faixas de menor condutividade.

Tabela 1. Calibração e validação dos conjuntos testados. AC e DC indica a corrente de excitação devido à presença ou não da placa de transmissão. R^2 é o coeficiente de determinação da validação, enquanto o erro quadrático médio (RMSE) e o erro relativo são métricas da validação.

Calibração	Célula	Corrente de excitação	R^2	RMSE ($\mu\text{S/cm}$)	Erro relativo médio (%)
a)	S2 sem placa	DC	0,9884	1177,18	60,84
b)	S2 com placa	AC	0,9854	444,81	26,49
c)	S3 sem placa	DC	0,9885	786,61	46,81
d)	S3 com placa	AC	0,8829	776,02	308,52

Análise da resposta e resolução do sensor

Foi analisado a resposta da célula S2 sem a placa transmissora para diferentes valores de condutividade, comparando duas configurações de atenuação do ADC (Figura 4). A redução da atenuação do ADC de 11 dB para 2,5 dB resultou em um aumento de aproximadamente 26% no desvio padrão das medições, não representando um ganho na resolução do sensor.

Análise da continuidade

O comportamento temporal das medições evidencia diferenças significativas entre os sensores avaliados (Figura 5). O sensor S1 apresenta elevada variabilidade, com oscilações acentuadas, quedas abruptas e mudança de regime após aproximadamente 800 min, indicando instabilidade do sinal. Em contraste, os sensores S2 e S3 exibem alta estabilidade ao longo de todo o período, com variações reduzidas e comportamento consistente. Os desvios padrão foram de 457,0 mV (S1), 4,1 mV (S2) e 30,5 mV (S3).

Figura 4. Resposta da célula S2 sem o uso de placa transmissora para diferentes valores de condutividade, considerando as atenuações de 11 dB e 2,5 dB do ADC. Análise da a) estabilidade temporal das medições ao longo de 60 s e b) dos os valores médios com seus respectivos desvios padrão.

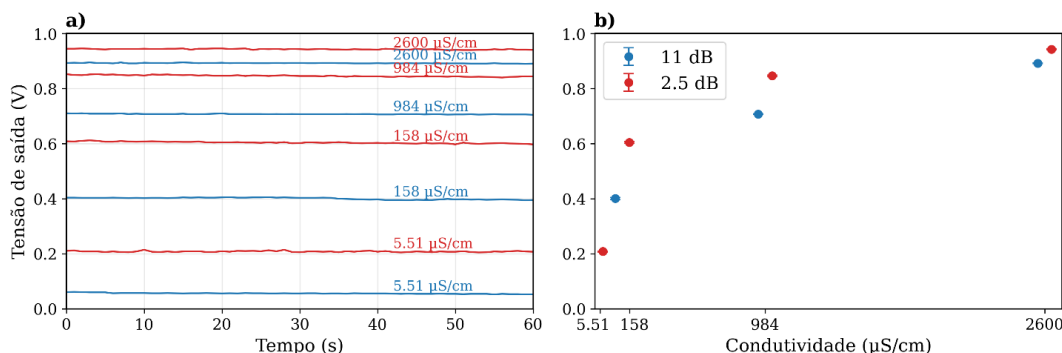
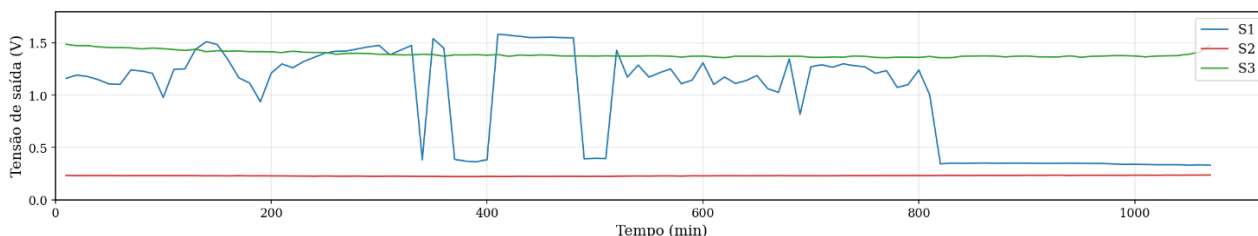


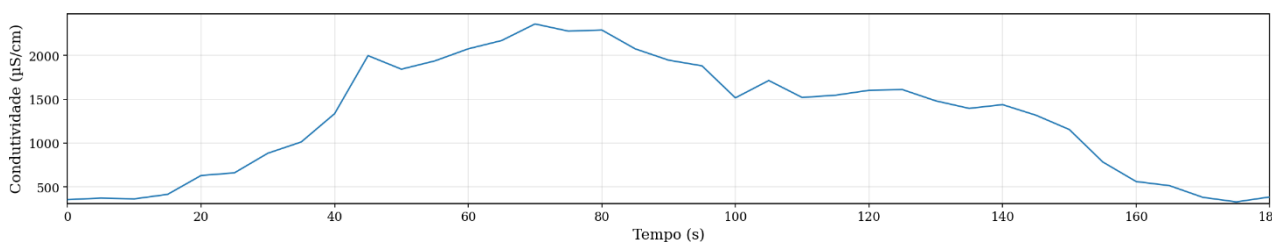
Figura 5. Análise de estabilidade da tensão de saída dos sensores S1, S2 e S3 ao longo do período experimental. Os sensores S1 e S2 operaram sem a placa transmissora de sinal, enquanto o sensor S3 foi avaliado com a utilização da placa.



Teste de campo

Como esperado, foi observado o aumento da condutividade após a adição de cloreto de sódio a montante, indicando a passagem da pluma salina ao ponto de medição. Pequenas oscilações ao longo da curva podem ser atribuídas à turbulência e à heterogeneidade do escoamento.

Figura 6. Variação da condutividade elétrica ao longo do tempo durante ensaio em campo.



DISCUSSÃO

A célula S2 associada à placa transmissora apresentou melhor desempenho que o sensor comercial, com menor erro (Tabela 1) e maior estabilidade (Figura 5), além de detectar a passagem da pluma salina no ensaio em campo (Figura 6), evidenciando sua aplicabilidade em monitoramento ambiental. Diferenças nos erros observados podem estar relacionadas a ruídos, faixa de medição e limitações dos sensores de baixo custo. A variação da resolução do ADC não resultou em melhorias (Figura 4), sendo observado aumento do desvio padrão, indicando influência de ruído e possíveis efeitos de polarização. Nos testes de continuidade, apesar da estabilidade do sinal em alguns sensores, foram observadas variações na tensão de saída (V) da solução, sugerindo reações eletroquímicas nos eletrodos.

Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura. Adhikary et al. (2019) demonstraram a viabilidade de sensores de baixo custo para monitoramento ambiental. Carminati & Luzzatto-Fegiz (2017) evidenciam que a geometria dos eletrodos influencia diretamente o desempenho, o que também foi observado neste estudo, no qual a célula S1 apresentou maior variabilidade em comparação à S2. Além disso, Parra et al. (2015) propuseram sensores indutivos que reduzem problemas de corrosão, embora com maior complexidade construtiva. Em comparação, os sensores resistivos avaliados apresentam maior simplicidade e menor custo.

A análise conjunta dos ensaios de calibração, estabilidade e campo indica que, mesmo com limitações inerentes a dispositivos de baixo custo, é possível obter medições confiáveis para aplicações ambientais, especialmente quando o foco está na identificação de variações e tendências ao longo do tempo. Por outro lado, aspectos como interferência de ruído, efeitos eletroquímicos e limitações construtivas ainda representam desafios para a consolidação desses sistemas. Nesse sentido, avanços na qualidade dos materiais, no isolamento elétrico e no condicionamento de sinal são fundamentais para ampliar a robustez e a repetibilidade das medições.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Nicole Simas de Souza agradece a CAPES pela bolsa de pesquisa – código de financiamento 001. Rafael de Carvalho Bueno agradece a bolsa PDJ do CNPq, processo número 152147/2025-0, chamada número 49/2024. Tobias Bernward Bleninger agradece a bolsa de produtividade do CNPq, processo número 313491/2023-2, chamada número 09/2023.

REFERÊNCIAS

- Adhikary, A., Roy, J., Kumar, A. G., Banerjee, S., & Biswas, K. (2019). An Impedimetric Cu-Polymer Sensor-Based Conductivity Meter for Precision Agriculture and Aquaculture Applications. *IEEE Sensors Journal*, 19(24), 12087–12095.
- Carminati, M., & Luzzatto-Fegiz, P. (2017). Conduino: Affordable and high-resolution multichannel water conductivity sensor using micro-USB connectors. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 251, 1034–1041.
- Relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo: 2009. São Paulo: CETESB, 2009.
- de Matos, D. T., de Carvalho, F. S., & dos Santos, F. M. (2023). Electrical conductivity and total organic carbon analysis of water in Brazilian industrial pharmaceutical formulations. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 13(1), 187–192. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2023.130118>
- Jaffrezic-Renault, N., & Dzyadevych, S. v. (2008). Conductometric Microbiosensors for Environmental Monitoring. *Sensors*, 8, 2569–2588. www.mdpi.org/sensors
- Padmavathi, B., Sathya, L., Narayanan, G. K. S., Sanjana, B., & Rasool, A. (2024). LoRa-Powered Water Management System for Real Time Monitoring and Control in Gated Communities. *3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, ICACRS 2024 - Proceedings*, 114–122.
- Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Bosch, I. (2015). Development of a conductivity sensor for monitoring groundwater resources to optimize water management in smart city environments. *Sensors (Switzerland)*, 15(9), 20990–21015.
- Serrano-Finetti, E., Aliau-Bonet, C., López-Lapeña, O., & Pallàs-Areny, R. (2019). Cost-effective autonomous sensor for the long-term monitoring of water electrical conductivity of crop fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104940>
- Visco, G., Dell’Aglia, E., Tomassetti, M., Fontanella, L. U., & Sammartino, M. P. (2023). An Open-Source, Low-Cost Apparatus for Conductivity Measurements Based on Arduino and Coupled to a Handmade Cell. *Analytica*, 4(2), 217–230. <https://doi.org/10.3390/analytica4020017>

Xing, S. Y., Li, Z. H., Li, P., & You, H. (2022). A Mini-review of the Toxicity of Pollutants to Fish Under Different Salinities. In *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 108, Issue 6, pp. 1001–1005). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03528-0>

Zhang, J., Li, D., Wang, C., & Ding, Q. (2013). *IFIP AICT 392 - An Intelligent Four-Electrode Conductivity Sensor for Aquaculture* (Vol. 392).

Zheng, Y., Zhao, Y., Zhou, N., Wang, H., & Jiang, D. (2021). A short review of some analog-to-digital converters resolution enhancement methods. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109554>.