

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE MEURER ZARDO

RELATÓRIO FINAL

Sistema embarcado de medição de impedância em rede de sensores sem fio

Relatório apresentado à Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial da conclusão das atividades de Iniciação Científica ou Iniciação em desenvolvimento tecnológico e Inovação - Edital 2025
Orientador(a): Prof.(a). EDUARDO PARENTE RIBEIRO
Título do Projeto: Sistema embarcado de medição de impedância em rede de sensores sem fio

CURITIBA

2025

RESUMO

O monitoramento contínuo da qualidade da água é uma ferramenta essencial para a gestão sustentável de recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas pressionadas por fontes de poluição urbana, industrial e agrícola. Os sistemas tradicionais de monitoramento, baseados em coletas manuais e esporádicas, embora importantes para análises de longo prazo, falham em detectar eventos de contaminação agudos e transitórios. Este trabalho de iniciação científica teve como objetivo o desenvolvimento e a validação dos componentes chave de um sistema embarcado de baixo custo para o monitoramento em tempo real, focado na medição da impedância elétrica da água por meio de sensores interdigitais capacitivos. A metodologia foi integralmente baseada em simulações computacionais em ambiente Python para otimizar o hardware e o software do sistema. Foram avaliados múltiplos algoritmos de demodulação síncrona, onde os métodos baseados na Transformada de Fourier demonstraram superior robustez a ruído. Adicionalmente, uma simulação de Monte Carlo foi conduzida para otimizar o circuito, determinando que a faixa ideal para o resistor de referência, que minimiza a incerteza da medição, está entre 10^5 e 10^6 ohms. Os resultados validam a viabilidade técnica de se obter medições confiáveis com hardware acessível e processamento de sinal avançado, fornecendo uma base metodológica robusta para o desenvolvimento de um protótipo físico e a futura implementação de uma rede de monitoramento contínuo.

Palavras-chave: Monitoramento de Rios; Impedância Elétrica; Processamento de Sinais; Sensores de Baixo Custo.

INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo dos recursos hídricos é uma ferramenta indispensável para a gestão ambiental, especialmente em regiões com intensa atividade urbana, industrial e agrícola, como o estado do Paraná. O sistema de monitoramento da qualidade da água no estado, operado pelo Instituto Água e Terra (IAT), constitui uma ferramenta robusta para a análise de tendências de longo prazo. Contudo, sua metodologia, fundamentada em coletas manuais com frequência mensal ou trimestral, apresenta uma lacuna na resolução temporal, tornando-o limitado para a detecção de eventos de poluição agudos e intermitentes, como descargas clandestinas de efluentes ou o escoamento de poluentes após eventos de precipitação intensa.

Neste contexto, o projeto MONCOR visa suprir essa lacuna metodológica através do desenvolvimento de uma rede de sensores distribuídos, capaz de realizar medições de diversas variáveis físico-químicas da água do rio. A abordagem permite a geração de séries temporais contínuas, essenciais para a detecção de anomalias e a criação de sistemas de alerta rápido. O desafio central reside no desenvolvimento de um módulo de sensoriamento que alie baixo custo, robustez para operação em campo e confiabilidade metrológica. Para isso, este plano de trabalho foca no desenvolvimento de medição de impedância elétrica baseado de sensor capacitivo interdigital, complementado por algoritmos de processamento de sinal para garantir a melhor estimativa dos dados.

Revisão da Literatura

O monitoramento da qualidade da água no Paraná, realizado por órgãos oficiais, baseia-se em coletas manuais e periódicas. Este método, embora robusto para análises de longo prazo, falha em detectar eventos de poluição agudos e transitórios. Em resposta a essa limitação, a literatura aponta para o uso de redes de sensores de baixo custo, capazes de fornecer dados em tempo real, apesar dos desafios de calibração e durabilidade em campo.

Este projeto foca na medição de impedância elétrica em uma frequência específica como base para implementação da espectroscopia de impedância elétrica como um *proxy* de baixo custo para inferir a composição da água *in-situ*. Para garantir a confiabilidade das medições em ambientes ruidosos, são implementadas técnicas avançadas de processamento de sinal, como o amplificador *Lock-in* digital (LIA), em microcontroladores. A revisão da literatura indica uma lacuna na integração dessas tecnologias: há poucos estudos que apresentam um sistema completo e validado que combine um sensor capacitivo de impedância de baixo custo com processamento de sinal avançado em uma rede de monitoramento contínuo. Assim, a pesquisa se justifica por desenvolver e validar essa solução integrada.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa foi fundamentada em simulações computacionais para desenvolver e validar os algoritmos de processamento de sinal e para otimizar o projeto do circuito de medição de impedância. Todas as rotinas foram implementadas na linguagem Python, utilizando Jupyter Notebooks como ambiente de desenvolvimento interativo.

A metodologia desta pesquisa foi fundamentada em simulações computacionais para desenvolver e validar os algoritmos de processamento de sinal e para otimizar o projeto do circuito de medição de impedância. Todas as rotinas foram implementadas na linguagem Python, utilizando Jupyter Notebooks como ambiente de desenvolvimento interativo.

Para comparar a performance dos diferentes algoritmos de *lock-in* digital, foi desenvolvida uma simulação com os seguintes passos:

1. **Geração do Sinal:** Foi gerado um sinal senoidal de entrada (x) com amplitude de 1.0 V, frequência (f) de 1000 Hz e uma frequência de amostragem (F_s) de 50 kHz.
2. **Adição de Ruído:** A cada sinal gerado, foi somado um ruído gaussiano de média zero, cuja amplitude foi variada para criar diferentes níveis de relação sinal-ruído (SNR).

3. **Aplicação dos Algoritmos:** O sinal ruidoso foi processado por cada um dos algoritmos implementados:
- **LIAF:** Baseado na Transformada de Fourier na frequência de interesse sobre o sinal completo.
 - **LIACF:** Variação do LIAF com a aplicação da média coerente para cada ciclo individualmente e depois calculada a Transformada de Fourier na frequência de interesse.
 - **LIAN, LIAN8 e LIAN12:** Algoritmos baseados na amostragem síncrona do sinal em 4, 8 e 12 pontos por ciclo, respectivamente.
4. **Métrica de Avaliação:** O desempenho de cada algoritmo foi quantificado pelo cálculo do erro, definido como a diferença absoluta entre a amplitude do sinal original (1.0 V) e a amplitude extraída pelo algoritmo. O erro foi plotado em função do nível de ruído para avaliar a robustez de cada método.

3. Otimização do Circuito de Medição por Simulação

Para determinar a faixa de operação ótima do resistor de referência (R_{sense}), foi conduzida uma simulação que avaliou a incerteza da medição em um circuito divisor de tensão.

1. **Modelagem do Circuito:** O circuito foi modelado para medir a impedância de um capacitor (C) de 1 nF, com uma tensão de entrada (V_{in}) de 1 V e frequência (f) de 1000 Hz, resultando em uma reatância capacitiva teórica de aproximadamente 159 k Ω . O valor do resistor de referência, R_{sense} , foi variado em uma escala logarítmica de 10 Ω a 100 M Ω .
2. **Simulação da Incerteza:** Para cada valor de R_{sense} , a medição foi repetida 1000 vezes ($T=1000$). Em cada iteração, um ruído gaussiano com desvio padrão de 0.15 foi adicionado às componentes real e imaginária da tensão medida sobre o capacitor (V_{sense}) para simular um ambiente de medição realista. A impedância do capacitor ($Z_{\text{calculado}}$) foi então calculada a partir da V_{sense} ruidosa.
3. **Análise Estatística:** Ao final das 1000 iterações para cada ponto de R_{sense} , foram calculados a média e o desvio padrão de V_{sense} (magnitude, fase, componentes real e imaginária) e de $Z_{\text{calculado}}$. O desvio padrão foi utilizado

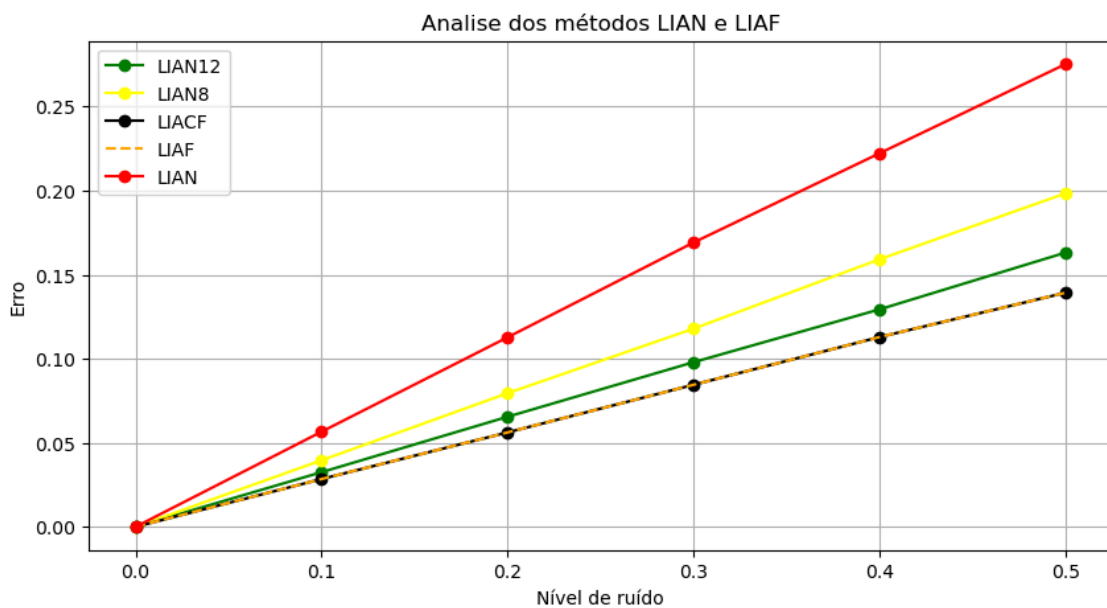
como a métrica de incerteza da medição. Os resultados foram plotados para visualizar a relação entre a escolha de R_{sense} e a incerteza do sistema, permitindo a identificação da faixa de operação que minimiza o erro final.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram realizadas simulações para analisar técnicas para redução de ruído em sinais, para isso foi gerado um uma onda definindo uma amplitude e uma fase, um número de pontos por ciclo, e o numero total de ciclos da onda.



foi realizada a simulação do aumento do erro da amplitude com o aumento do ruído no sinal, foram aplicados 5 métodos no total, o sinal gerado tem amplitude de 1, e o ruído foi de 0 a 0.5, com incremento de 0.1, notamos como em geral o método de fourier é mais robusto para redução do ruído, o método LIACF é mais robusto ao ruído que o método LIAN e equivalente ao LIAF.



O método LIAN (*Lock-in Amplifier based on Nyquist frequency*) é uma técnica de demodulação síncrona que opera a partir da amostragem estratégica do sinal de entrada em pontos específicos de sua fase. O algoritmo primeiramente identifica os instantes de tempo que correspondem a múltiplos de um quarto de ciclo (0° , 90° , 180° , 270° , etc.), requerendo uma frequência de amostragem (F_s) que seja no mínimo quatro vezes a frequência do sinal de interesse (f). Em seguida, o método calcula duas componentes ortogonais: a componente "em fase" (VI) é determinada pela semidiferença entre as amostras coletadas em 0° e 180° de cada ciclo; de forma análoga, a componente em "quadratura" (VQ) é calculada a partir das amostras de 90° e 270° . Este processo é repetido para todos os ciclos contidos no sinal, e os valores de VI e VQ são então submetidos a uma média, o que atua como um filtro passa-baixa, reduzindo significativamente o ruído. O resultado final é um número complexo, onde a parte real é a média da componente em fase e a parte imaginária é a média da componente em quadratura, do qual a amplitude e a fase do sinal original podem ser extraídas com alta precisão.

O método LIAF opera como um amplificador *lock-in* digital que atua no domínio da frequência. O seu funcionamento baseia-se na aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre todo o sinal de entrada x . Ao transformar o sinal do domínio do tempo para o da frequência, o algoritmo calcula o "bin" (índice) exato no espectro de frequência que corresponde à frequência de interesse do sinal, f . O valor contido

nesse bin é um número complexo que representa tanto a amplitude quanto a fase do sinal naquela frequência específica. Ao isolar este valor e aplicar um fator de correção de 2 (para compensar a energia dividida entre frequências positivas e negativas em sinais reais), o método LIAF extrai de forma eficiente as características do sinal, filtrando efetivamente todos os outros componentes de frequência e ruído presentes no espectro.

O método LIACF é uma variação do LIAF que incorpora o princípio da **média coerente** para aprimorar a redução de ruído. Em vez de analisar o sinal completo de uma só vez, o LIACF primeiramente segmenta o sinal de entrada em um número inteiro de ciclos completos, com base na frequência do sinal f e na frequência de amostragem F_s . Em seguida, o algoritmo itera sobre cada ciclo individualmente, aplicando o método LIAF a cada um deles. Para cada ciclo, obtém-se um resultado complexo (contendo uma parte real, ou "em fase", e uma imaginária, ou em "quadratura"). Ao final do processo, as partes reais e imaginárias de todos os ciclos são separadamente somadas e divididas pelo número total de ciclos. Esta média tem o efeito de um filtro poderoso, pois enquanto os componentes do sinal se somam de forma coerente, o ruído aleatório, que não é coerente com o ciclo, tende a se anular. O resultado é um único número complexo, representando a média das componentes em fase e quadratura, que fornece uma estimativa mais precisa e robusta da amplitude e da fase do sinal original.

Para aprimorar a precisão e a robustez do amplificador *lock-in* digital, foram exploradas variações do algoritmo LIAN (*Lock-in Amplifier based on N-Point Algorithm*) que utilizam um número maior de amostras por ciclo do sinal. O método **LIAN8**, por exemplo, opera a partir de oito amostras igualmente espaçadas (a cada 45°) em um único ciclo. Os resultados complexos são combinados em uma média, o que confere ao método maior imunidade a ruídos e a certas distorções harmônicas.

Avançando nesta abordagem, o método **LIAN12** utiliza doze amostras por ciclo (a cada 30°). O resultado final é obtido pela média vetorial complexa desses fasores,

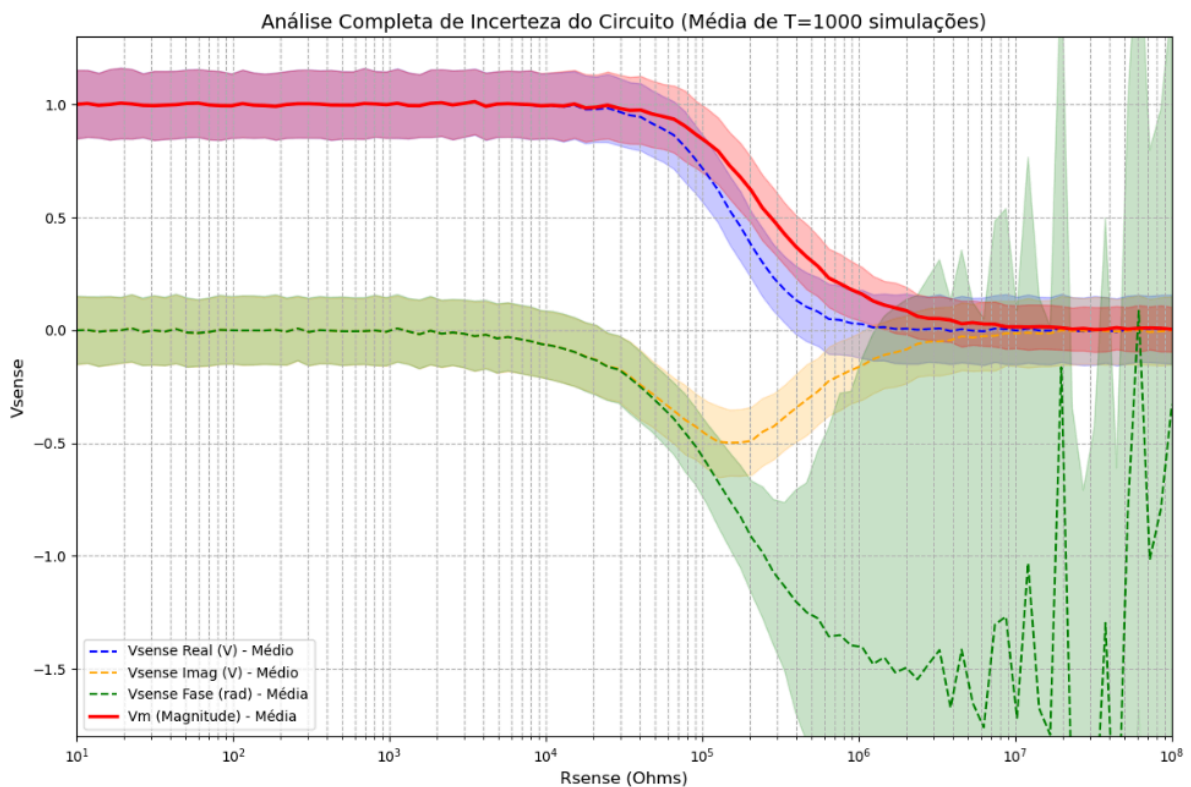
um processo que oferece uma filtragem ainda mais eficaz de ruídos e, notavelmente, de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem. A utilização desses algoritmos de múltiplos pontos visa, portanto, aumentar a confiabilidade da medição em ambientes com baixa relação sinal-ruído.

Os resultados da simulação, conforme apresentados no gráfico, comparam a robustez de diferentes algoritmos de *lock-in* digital (LIAN, LIAF e suas variações) em função do aumento do nível de ruído. Observa-se uma relação linearmente proporcional entre o nível de ruído e o erro para todos os métodos avaliados, onde um aumento no ruído acarreta um aumento correspondente no erro da medição. O método LIAN de 4 pontos (em vermelho) demonstrou ser o mais suscetível ao ruído, apresentando o maior erro em todos os níveis simulados. As variações que utilizam um maior número de amostras por ciclo, LIAN8 (amarelo) e LIAN12 (verde), apresentaram uma melhora significativa e progressiva na performance, com o LIAN12 sendo consistentemente mais preciso que o LIAN8. Notavelmente, os métodos baseados na Transformada de Fourier, LIAF (laranja) e sua variação com média coerente, LIACF (preto), exibiram o melhor desempenho. Seus resultados foram praticamente idênticos e superiores aos demais algoritmos, resultando no menor erro e, portanto, na maior imunidade ao ruído dentre as técnicas analisadas na simulação.

Para a otimização do circuito analógico de condicionamento do sinal, realizou-se uma análise de sensibilidade do circuito de medição de impedância por meio de simulações computacionais. O estudo visou determinar a faixa de valores ótima para o resistor do divisor de tensão ($R_{divisor}$) que minimiza a propagação de erro e maximiza a sensibilidade do sistema. A escolha correta deste componente é crítica, pois influencia diretamente a precisão da tensão medida e, consequentemente, a exatidão no cálculo da impedância e na determinação final da capacitância do dielétrico líquido.

Para otimizar o circuito de medição de impedância, foi realizada uma simulação a fim de avaliar o impacto da escolha do resistor de referência (R_{sense}) na incerteza da tensão medida (V_{sense}) sob condições ruidosas. A simulação modelou um

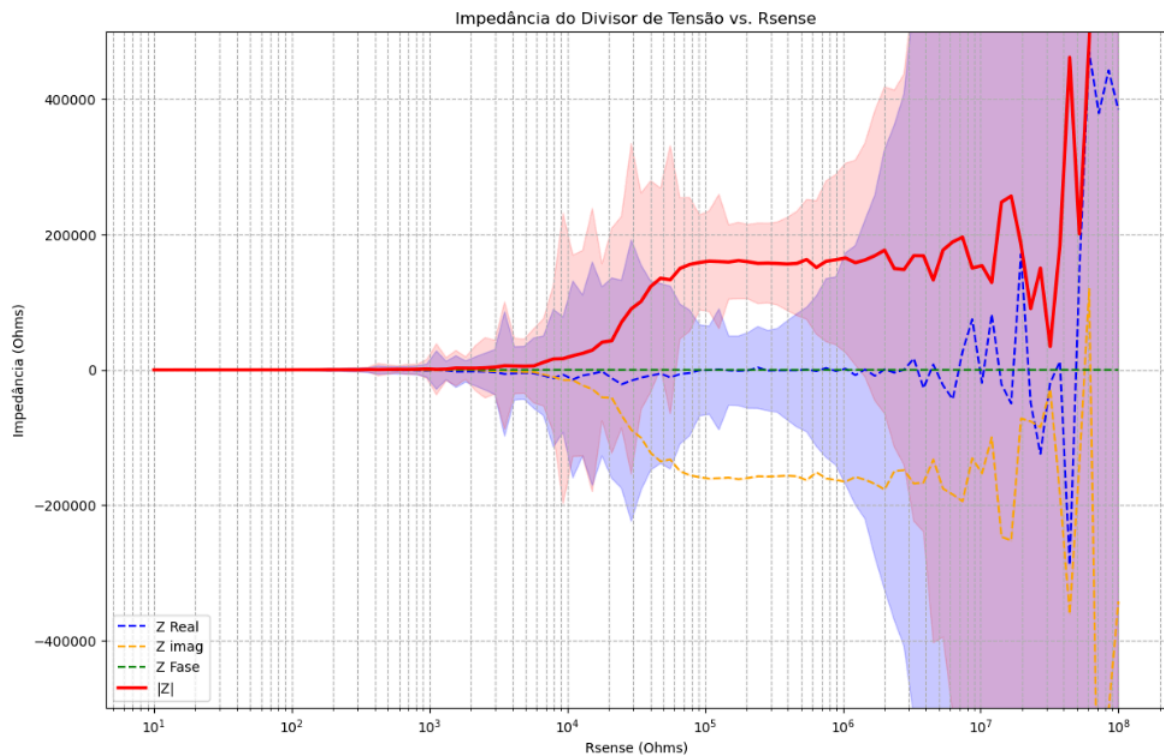
divisor de tensão para medir um capacitor de 1 nF a 1000 Hz, variando-se R_{sense} de $10\ \Omega$ a $100\ \text{M}\Omega$. A análise dos resultados revelou três comportamentos distintos: para valores de R_{sense} abaixo de $10\ \text{k}\Omega$, a incerteza da medição é minimizada; em uma região de transição (entre $10\ \text{k}\Omega$ e $1\ \text{M}\Omega$), onde R_{sense} se aproxima da reatância do capacitor ($\sim 159\ \text{k}\Omega$), o circuito apresenta máxima sensibilidade; e para valores de R_{sense} acima de $1\ \text{M}\Omega$, a incerteza aumenta drasticamente, especialmente na medição da fase, tornando o resultado não confiável.



Portanto, a simulação leva à conclusão fundamental para o projeto de que a escolha ótima para o resistor de referência (R_{sense}) deve ser um valor da mesma ordem de magnitude da impedância a ser medida. Esta condição garante que o sinal de saída tenha amplitude suficiente para se destacar do ruído de fundo e que o circuito opere em sua faixa de máxima sensibilidade, o que, em conjunto, minimiza a incerteza e maximiza a precisão da medição final.

Complementando a análise do circuito, uma segunda simulação avaliou o impacto da escolha de R_{sense} diretamente na impedância calculada ($Z_{\text{calculado}}$) e em sua respectiva incerteza. O gráfico resultante revela que, tanto para valores de R_{sense} muito baixos (menores que $10^4\ \Omega$) quanto muito altos (maiores que $10^6\ \Omega$), a

incerteza da medição se torna proibitivamente grande devido à instabilidade numérica da fórmula de cálculo. Contudo, em uma faixa intermediária, a magnitude da impedância calculada converge para o valor teórico esperado (~159 kΩ) com incerteza mínima, indicando a região de maior confiabilidade para a medição.



Ao correlacionar este resultado com a análise anterior da tensão Vsense, fica evidente que a faixa de operação ideal para o resistor de referência está compreendida entre **10^5 e 10^6 ohms**. Neste intervalo, o sistema opera simultaneamente em sua região de máxima sensibilidade, conforme demonstrado no primeiro gráfico, e apresenta a menor incerteza na impedância final calculada, como visto no segundo gráfico. Portanto, a operação nesta faixa garante a medição mais precisa e confiável que o sistema pode oferecer.

Conclusões e Considerações Finais

O presente trabalho de Iniciação Científica teve como objetivo central o desenvolvimento e a validação, por meio de simulações computacionais, dos

componentes chave de um sistema de baixo custo para o monitoramento da qualidade da água, inserido no contexto do projeto MONCOR. As simulações permitiram avaliar e otimizar tanto o hardware quanto o software do módulo de medição de impedância, fornecendo uma base sólida para o futuro desenvolvimento de protótipos físicos. Os resultados obtidos confirmaram as hipóteses iniciais e forneceram diretrizes claras para o projeto.

Os principais resultados deste estudo podem ser sintetizados em dois pontos cruciais. Primeiro, a avaliação comparativa de diferentes algoritmos de amplificador *lock-in* digital demonstrou a superioridade dos métodos baseados na Transformada de Fourier (LIAF e LIACF) em termos de robustez a ruído, superando as variações do método LIAN. Segundo, a otimização do circuito de medição revelou, através de uma análise de Monte Carlo, que a escolha de um resistor de referência (R_{sense}) de ordem de magnitude similar à da impedância a ser medida é um fator crítico para minimizar a incerteza e garantir a precisão do sistema. Em conjunto, estes achados validam a viabilidade técnica de se obter medições confiáveis a partir de um hardware de baixo custo, desde que acompanhado por um processamento de sinal robusto e um projeto de circuito otimizado.

É importante reconhecer que a presente fase da pesquisa se concentrou majoritariamente em simulações. Embora essenciais para a validação teórica, elas utilizam modelos idealizados. Desta forma, os próximos passos da pesquisa devem focar na transposição deste estudo para o mundo físico. As direções futuras incluem: 1) a implementação dos algoritmos LIAF/LIACF em um microcontrolador embarcado; 2) a construção de um protótipo do circuito de medição e sua validação em laboratório com soluções de condutividade conhecida; e, finalmente, 3) a integração de todos os componentes em um módulo de campo para testes em um ambiente de rio real, onde será possível avaliar a durabilidade, o consumo de energia e a eficácia do sistema em condições não controladas.

REFERÊNCIAS

Fonseca, R. S. D. (2019). Medição de impedância baseada em sensores capacitivos interdigitais [Dissertação]. UFPR.

Machado, M. M. (2022). Detecção síncrona de sinais de sensores interdigitais para medição de impedância em rios [Dissertação]. UFPR.

Machado, M. M., Ribeiro, E. P. (2024). Phase sensitive detection for embedded sensors. *Measurement Science and Technology*, 35(5), 056105.

Romancini, L. G. (2024). Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de impedância elétrica da água de rio [TCC]. UFPR.