

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 fisico-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:
 - o **LIAF:** Baseado na Transformada de Fourier na frequência de interesse sobre o sinal completo.
 - o **LIACF:** Variação do LIAF com a aplicação da média coerente para cada ciclo individualmente e depois calculada a Tranformada de Fourier na frequência de interesse.
 - o **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

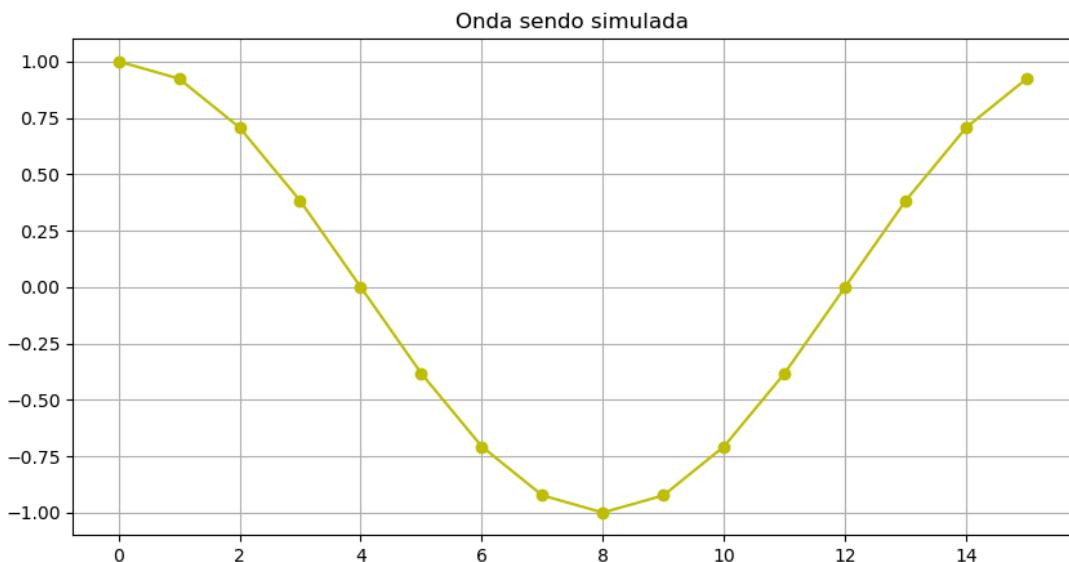
Para determinar a faixa de operação ótima do resistor de referência (Rsense), foi conduzida uma simulação que avaliou a incerteza da medição em um circuito divisor de tensão.

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, Rsense, foi variado em uma escala logarítmica de 10 Ω a 100 M Ω .
2. **Simulação da Incerteza:** Para cada valor de Rsense, 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 ($Z_{calculado}$) foi então calculada a partir da V_{sense} ruidosa.
3. **Análise Estatística:** Ao final das 1000 iterações para cada ponto de Rsense, foram calculados a média e o desvio padrão de V_{sense} (magnitude, fase, componentes real e imaginária) e de $Z_{calculado}$. O desvio padrão foi utilizado

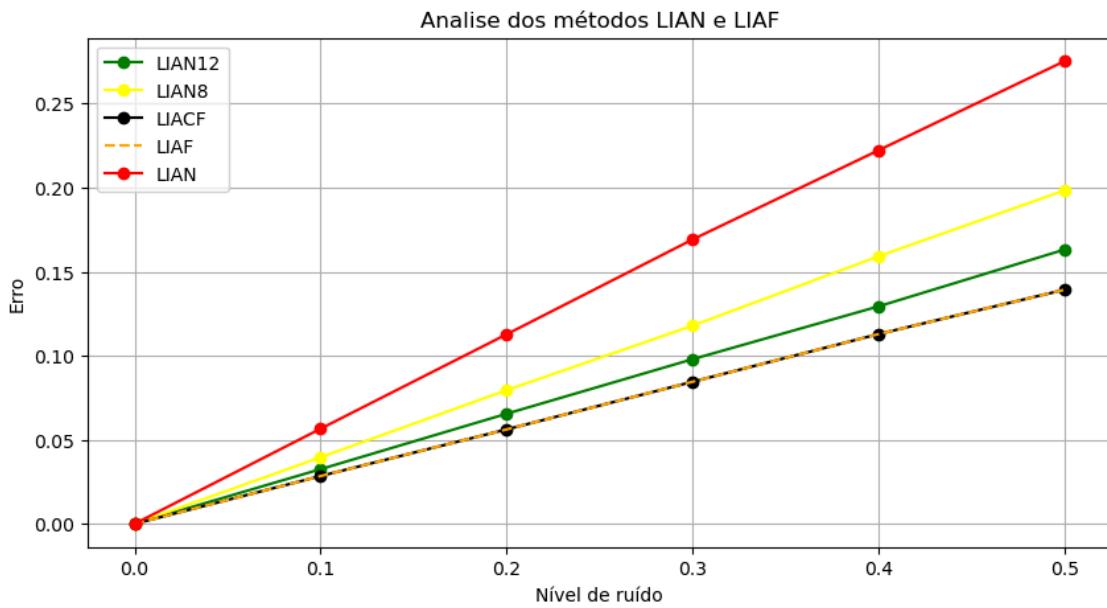
como a métrica de incerteza da medição. Os resultados foram plotados para visualizar a relação entre a escolha de Rsense e a incerteza do sistema, permitindo a identificação da faixa de operação que minimiza o erro final.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram realizadas simulações para analisar técnicas para redução de ruído em sinais, para isso foi gerado um sinal definido 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 **Fs**. 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,

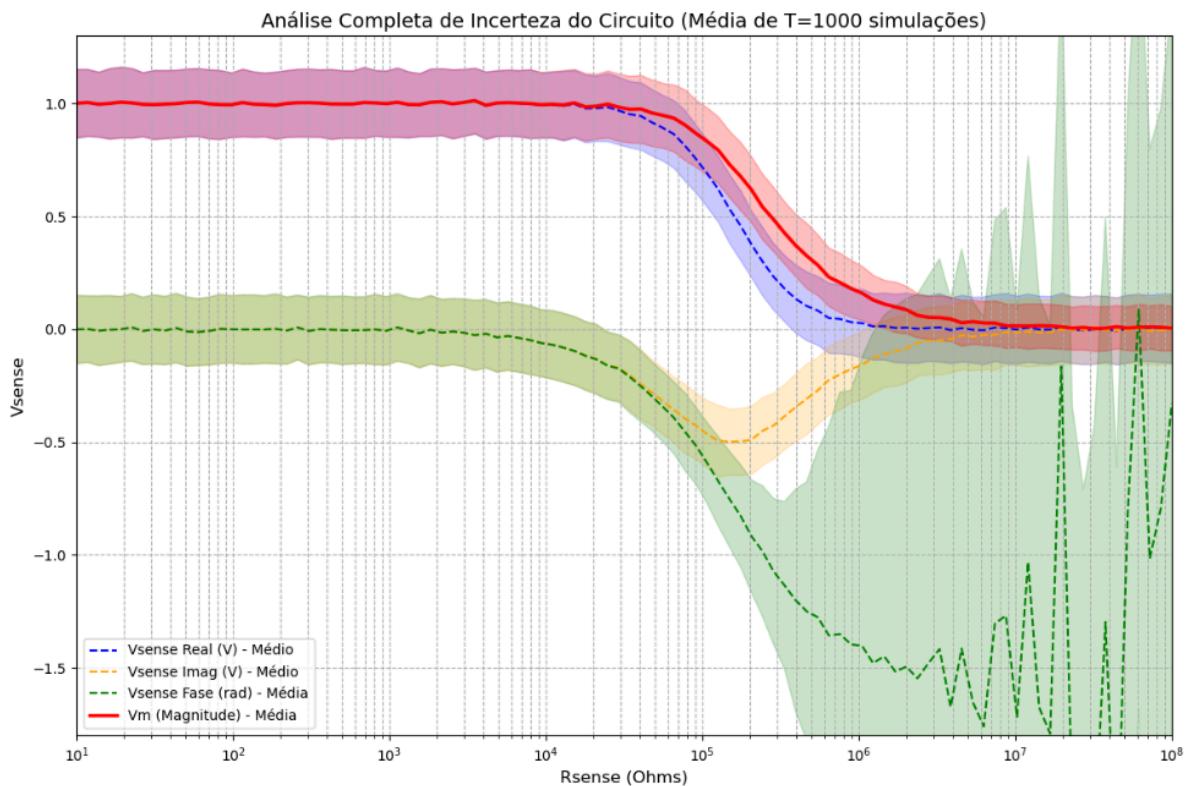
um processo que oferece uma filtragem ainda mais eficaz de ruídos e, notavelmente, de distorções harmônicas de 3^a e 5^a ordem. A utilização desses algoritmos de múltiplos pontos visa, portanto, aumentar a confiabilidade da medição em ambientes com baixa relação sinal-ruído.

Os resultados da simulação, conforme apresentados no gráfico, compararam 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 capacidade 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

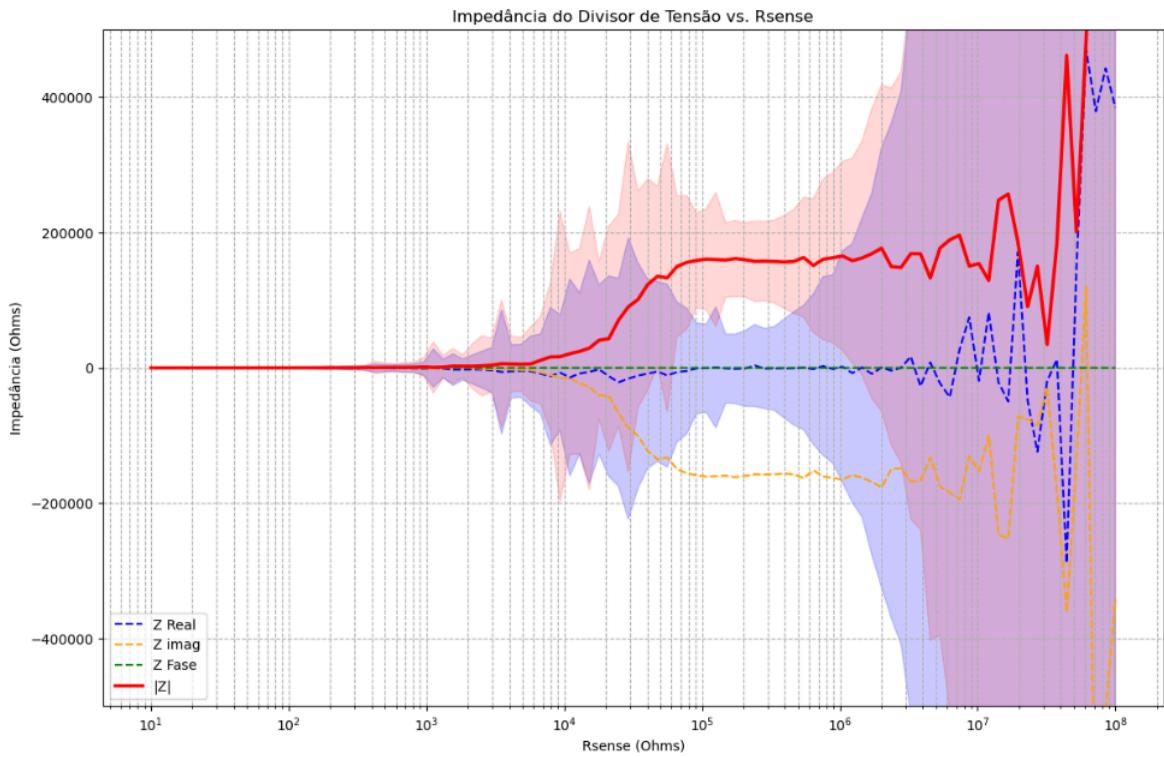
divisor de tensão para medir um capacitor de 1 nF a 1000 Hz, variando-se Rsense de $10\ \Omega$ a $100\ M\Omega$. A análise dos resultados revelou três comportamentos distintos: para valores de Rsense abaixo de $10\ k\Omega$, a incerteza da medição é minimizada; em uma região de transição (entre $10\ k\Omega$ e $1\ M\Omega$), onde Rsense se aproxima da reatância do capacitor ($\sim 159\ k\Omega$), o circuito apresenta máxima sensibilidade; e para valores de Rsense acima de $1\ M\Omega$, 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 (Rsense) 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 Rsense diretamente na impedância calculada ($Z_{calculado}$) e em sua respectiva incerteza. O gráfico resultante revela que, tanto para valores de Rsense 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 k Ω) 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 (Rsense) 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.