



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estratégia não invasiva para estimação da temperatura de amostras em células de medição ultrassônicas usando o filtro de Kalman Estendido

Enzo Lopes de Freitas

João Monlevade, MG
2025

Enzo Lopes de Freitas

**Estratégia não invasiva para estimação da
temperatura de amostras em células de
medição ultrassônicas usando o filtro de
Kalman Estendido**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Wendy Yadira Eras Herrera

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F866e Freitas, Enzo Lopes de.

Estratégia não invasiva para estimação da temperatura de amostras em células de medição ultrassônicas usando o filtro de Kalman estendido. [manuscrito] / Enzo Lopes de Freitas. - 2025.
74 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Coorientadora: Profa. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Controle de temperatura. 2. Líquidos - Medição. 3. Instrumentos de medição - Indústria. 4. kalman, Filtragem de. 5. Processamento de sinais - Técnicas digitais. 6. Transdutores ultrassônicos. 7. Ultrassom. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Herrera, Wendy Yadira Eras. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.2

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Enzo Lopes de Freitas

**Estratégia não invasiva para estimação da temperatura de amostras em células de medição
ultrassônicas usando o filtro de Kalman Estendido**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de novembro de 2025.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago — Orientador — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr.^a Wendy Yadira Eras Herrera — Coorientadora — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Renan Fernandes Bastos — Coordenador do COEE — Universidade Federal de Ouro Preto

Conforme previsto no Art. 38 da Resolução COEE n.º 28/2022, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/11/2025, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1005543** e o código CRC **5C55BB3C**.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Vanilza, pelo amor, incentivo e por ter investido incansavelmente na minha educação e no meu futuro.

Agradeço também à Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte oferecido ao longo da graduação, e a todos os professores que contribuíram de forma significativa para minha formação pessoal e acadêmica.

Por fim, expresso minha profunda gratidão aos meus orientadores, Marcelo e Wendy, pela paciência, dedicação e orientação constante durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para a realização deste projeto.

“Você pergunta que caminho leva à liberdade? Eu respondo: qualquer via em seu corpo.”
Sêneca

Resumo

O uso de métodos ultrassônicos na caracterização de líquidos é amplamente adotado em diversos setores industriais devido à sua natureza não invasiva e não destrutiva. No entanto, um dos principais desafios enfrentados nesse campo é a influência da temperatura do líquido nas medições, uma vez que variações térmicas afetam significativamente os resultados. Embora existam técnicas para controlar a temperatura, ainda há uma lacuna na implementação de sistemas de controle térmico eficientes que não interfiram nas propriedades físico-químicas do líquido em análise. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de medição de temperatura não invasivo para uma célula de medição ultrassônica, capaz de estimar a temperatura da amostra líquida com base apenas em medições externas. A metodologia proposta é composta por duas etapas principais: (i) a construção da célula de medição e (ii) a estimação de estados por meio do Filtro de Kalman Estendido (EKF). Inicialmente, foram estudadas e comparadas diferentes técnicas de cálculo do tempo de voo, como detecção de picos, cruzamento por zero, correlação cruzada e fase espectral. Em seguida, foi construída a célula de medição acústica de baixa frequência para caracterização de líquidos e implementado um modelo acústico em camadas para apoiar o seu projeto. Testes preliminares foram realizados para validar as implementações e avaliar seu desempenho. A estimação não invasiva da temperatura foi realizada com base no EKF, eliminando a necessidade de sensores internos e minimizando interferências. Dois ensaios experimentais foram conduzidos, modulando a corrente aplicada por meio de sinais *chirp*, nos seguintes cenários: (i) apenas aquecimento e (ii) aquecimento e resfriamento. O EKF apresentou erros quadráticos médios (RMSE) de 1,13% e 2,51% para os cenários 1 e 2, respectivamente. Os resultados obtidos indicam que o EKF é uma abordagem promissora para a estimação de sinais térmicos, configurando-se como uma ferramenta útil para aprimorar métodos de caracterização ultrassônica de líquidos em aplicações industriais e laboratoriais.

Palavras-chave: Ultrassom, Velocidade de propagação do som, Sistema de medição de temperatura, Filtro de Kalman Estendido.

Abstract

The use of ultrasonic methods for liquid characterization is widely adopted across various industrial sectors due to its non-invasive and non-destructive nature. However, one of the main challenges in this field is the influence of the liquid temperature on measurements, as thermal variations significantly affect the results. Although temperature control techniques exist, there remains a gap in the implementation of efficient thermal control systems that do not interfere with the physicochemical properties of the liquid under analysis. In this context, this work aims to develop a non-invasive temperature measurement system for an ultrasonic measurement cell, capable of estimating the liquid sample temperature based solely on external measurements. The proposed methodology consists of two main stages: (i) the construction of the measurement cell and (ii) state estimation using the Extended Kalman Filter (EKF). Initially, different time-of-flight calculation techniques were studied and compared, including peak detection, zero-crossing, cross-correlation, and spectral phase. Subsequently, a low-frequency acoustic measurement cell was built for liquid characterization, and a layered acoustic model was implemented to support its design. Preliminary tests were conducted to validate the implementations and evaluate their performance. The non-invasive temperature estimation was carried out using the EKF, eliminating the need for internal sensors and minimizing interference. Two experimental tests were performed, modulating the applied current with chirp signals under the following scenarios: (i) heating only and (ii) heating and cooling. The EKF achieved root-mean-square errors (RMSE) of 1.13% and 2.51% for scenarios 1 and 2, respectively. The results indicate that the EKF is a promising approach for thermal signal estimation, establishing itself as a useful tool for enhancing ultrasonic liquid characterization methods in industrial and laboratory applications.

Keywords: Ultrasound, Speed of sound, Temperature measurement system, Extended Kalman Filter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ondas sonoras geradas em um tubo pelo movimento de um êmbolo. . .	20
Figura 2 – Exemplo de um sinal pulsado.	22
Figura 3 – Métodos pulsados.	23
Figura 4 – Medição do tempo de voo Δt	24
Figura 5 – Métodos de cruzamento com zero.	25
Figura 6 – Esquema da camada de material acústico caracterizada por uma matriz de transferência $\mathbf{T}$	28
Figura 7 – Esquema de uma estrutura composta por várias camadas com diferentes propriedades.	30
Figura 8 – Representação tridimensional do sistema de alta frequência.	36
Figura 9 – Sinais adquiridos no sistema de alta frequência que foram utilizados para realizar os testes da medição do tempo de voo.	37
Figura 10 – Técnica de detecção de picos. São mostrados os sinais original (preto), interpolado (azul), e a envoltória (vermelho), junto com os picos do sinal original (x preto), do sinal interpolado (círculo azul), e da envoltória (círculo vermelho).	38
Figura 11 – Cruzamento com zero. É mostrado o sinal interpolado (azul), assim como os pontos de cruzamento com zero do sinal original (círculo preto) e do sinal interpolado (círculo azul).	39
Figura 12 – Técnica de correlação cruzada. São mostrados os sinais resultantes da correlação cruzada entre S_{ref} e S_{eco} utilizando (a) os sinais originais e (b) sinais interpolados.	41
Figura 13 – Representação dos sinais S_{ref} e S_{eco} no domínio da frequência, com suas respectivas fases para ilustrar a técnica de fase espectral.	42
Figura 14 – Tempo de voo (tempo de voo (Δt)) da água em função da frequência obtido utilizando a técnica de fase espectral.	43
Figura 15 – Representação do arranjo experimental do sistema de baixa frequência.	46
Figura 16 – Fotos do arranjo experimental do sistema de baixa frequência.	47
Figura 17 – Vista em corte da célula de medição com uma camada de água.	49
Figura 18 – Sinal de entrada utilizado para testar o modelo acústico.	50
Figura 19 – Sinais S_{ref} e S_{eco} gerados pelo modelo acústico para uma camada de água.	51
Figura 20 – Supervisor criado para monitoramento dos sinais adquiridos no osciloscópio em tempo real.	54

Figura 21 – Comparação entre os sinais simulados pelo modelo de camadas e os sinais experimentais. (a) S_{ref} gerado pelo modelo teórico. (b) S_{ref} obtido experimentalmente. (c) S_{eco} gerado pelo modelo teórico. (d) S_{eco} obtido experimentalmente.	55
Figura 22 – Diagramas dos sistemas utilizados no experimento.	57
Figura 23 – Configuração experimental dos sistemas de medição acústico e térmico.	58
Figura 24 – Sinais de corrente utilizados nos testes das células Peltier: (a) aquecimento (Cenário 1) e (b) aquecimento e resfriamento (Cenário 2).	63
Figura 25 – Evolução da (a) velocidade do som e (b) temperatura da água durante o teste de aquecimento.	64
Figura 26 – <i>Cenário 1</i> : Sinais das temperaturas das duas células Peltier durante o ensaio de aquecimento, posicionados no: a) bloco de alumínio, T_c , e medido pelo sensor 1 (azul) e sensor 3 (laranja), e b) dissipador de calor, T_h , e medido pelo sensor 2 (azul) e sensor 4 (laranja).	65
Figura 27 – <i>Cenário 1</i> : Estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, dentro da célula de medição utilizando os modelos (4.4)-(4.6) e (5.1) no EKF: a) sem correção e b) com correção do ganho. O traçado em linha contínua preta indica o sinal de temperatura da água, $T_{água}$ enquanto que o traçado em linha tracejada azul indica o sinal estimado.	66
Figura 28 – Evolução da (a) velocidade do som e (b) temperatura da água durante o ensaio de aquecimento e resfriamento.	67
Figura 29 – <i>Cenário 2</i> : Estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, dentro da célula de medição utilizando os modelos (4.4)-(4.6) e (5.1) no EKF: (a) sem correção e (b) com correção do ganho. A linha contínua preta representa a temperatura real da água, $T_{água}$, enquanto a linha tracejada azul indica o sinal estimado.	68

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Coeficientes da equação da velocidade do som na água em função da temperatura na escala t_{90}	21
Tabela 2	–	Comparação dos tempos de voo obtidos por diferentes métodos.	43
Tabela 3	–	Parâmetros utilizados no modelo da célula Peltier.	63
Tabela 4	–	Índice RMSE (4.20) da temperatura da água dentro da célula de medição para o <i>Cenário 1</i> e <i>Cenário 2</i> utilizando o EKF.	66

Lista de siglas e abreviaturas

EKF	filtro de Kalman Estendido (EKF, do inglês <i>extended Kalman filter</i>)
FEM	Método de Elementos Finitos (FEM, do inglês <i>Finite Element Method</i>)
FFT	Transformadas Rápidas de Fourier (FFT, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (PWM, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
TMM	Matriz de Transferência Total (TMM, do inglês <i>Transfer Matrix Method</i>)
ToF	Tempo de Voo (ToF, do inglês <i>Time-of-Flight</i>)

Lista de símbolos

α	coeficiente de atenuação
Δp	variação de pressão
Δt	tempo de voo
ΔV	variação de volume
ρ	densidade do líquido
B	módulo de compressibilidade
c	velocidade de propagação do sinal sonoro no líquido
k	número de onda
L	distância percorrida pelo sinal acústico
t	tempo de propagação do sinal acústico
Z	impedância acústica característica do meio

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO TEÓRICA	19
2.1	Transdutores	19
2.1.1	Ondas acústicas	19
2.1.2	Velocidade de propagação de ondas acústicas	19
2.1.2.1	Velocidade de propagação do som na água	20
2.1.3	Métodos de medição	21
2.2	Técnicas para cálculo do tempo de voo (Δt)	23
2.2.1	Detecção de Pico	24
2.2.2	Cruzamento com Zero	25
2.2.3	Correlação Cruzada	25
2.2.4	Fase Espectral	26
2.3	Modelo acústico de camadas	27
2.3.1	Método da Matriz de Transferência	27
2.3.2	Matriz de Transferência Total	29
2.3.3	Matriz de Dispersão	30
2.3.4	Problema de Transmissão	31
2.3.5	Sistemas não recíprocos	32
2.3.6	Sistemas recíprocos	32
2.4	Controle de Instrumentos de Bancada	33
2.4.1	Protocolo SCPI	33
2.5	Considerações parciais	34
3	SISTEMA DE ALTA FREQUÊNCIA	35
3.1	Visão geral do sistema de alta frequência	35
3.2	Avaliação dos métodos para cálculo de tempo de voo	36
3.2.1	Detecção de Picos	37
3.2.2	Cruzamento com Zero	39
3.2.3	Correlação Cruzada	40
3.2.4	Fase Espectral	41
3.2.5	Comparação dos Métodos de Cálculo do Tempo de Voo	43
4	SISTEMA DE BAIXA FREQUÊNCIA	45

4.1	Visão geral do sistema de baixa frequência	45
4.2	Modelo acústico	46
4.2.0.1	Descrição do Modelo Implementado	48
4.2.1	Testes iniciais com o modelo	48
4.3	Controle dos instrumentos de bancada	50
4.3.1	Configurações Iniciais do Osciloscópio	51
4.3.2	Aquisição Contínua e Armazenamento de Sinais	52
4.3.3	Ajuste Automático de Visualização no Osciloscópio	52
4.4	Supervisório	53
4.5	Comparação entre modelo e sinais reais	53
4.6	Integração dos sistemas acústico e térmico para estimação de temperatura	56
4.6.1	Sistemas acústico e térmico	56
4.6.2	Modelo não linear da célula Peltier	57
4.6.3	Estimação de estados	58
4.6.3.1	Filtro de Kalman Estendido	59
4.6.3.2	Índice de desempenho	60
4.7	Considerações Parciais	60
5	RESULTADOS	62
5.1	Descrição dos Cenários de Teste	62
5.1.1	Cenário 1	62
5.1.1.1	Cálculo da temperatura da água	62
5.1.1.2	Estimação da temperatura da água	63
5.1.2	Cenário 2	67
5.1.2.1	Cálculo da temperatura da água	67
5.1.2.2	Estimação da temperatura da água	67
5.2	Considerações Parciais	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
6.1	Propostas para trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS	72

1 Introdução

Os métodos de caracterização de líquidos possuem vasto potencial de aplicação em diversos setores industriais. Dependendo da aplicação, é necessário medir diferentes propriedades do líquido, como densidade, viscosidade, e características químicas, termodinâmicas, acústicas, ópticas e elétricas, as quais podem ser utilizadas, direta ou indiretamente, para a caracterização do líquido. As técnicas acústicas se destacam por serem não destrutivas e por possibilitarem aplicações não invasivas (ADAMOWSKI et al., 2001).

Métodos ultrassônicos são amplamente empregados para caracterizar misturas de óleos vegetais com composições químicas semelhantes, como óleo de argan, gergelim e amendoim (ETTAHIRI et al., 2024), identificar adulterações em gasolina através de atenuação ultrassônica e velocidade de propagação do som (FIGUEIREDO; ALVARENGA; COSTA-FÉLIX, 2017), além de monitorar a transesterificação — um processo químico que converte triglicerídeos em ésteres (biodiesel) e glicerol (BAÊSSO et al., 2017).

Aplicações de técnicas acústicas também são utilizadas para o controle de qualidade do azeite de oliva (ALOUACHE et al., 2015), caracterização de leite bovino com diferentes teores de gordura (DORABIATO, 2017) e para a melhoria da eficiência de processamento de alimentos utilizando ultrassom de alta intensidade (CHAVAN et al., 2022).

Uma das grandes dificuldades ao utilizar sinais ultrassônicos para caracterização dos líquidos é manter estável a temperatura do meio onde se encontra o líquido de interesse. Isso ocorre porque a temperatura está diretamente relacionada à variação da velocidade de propagação do sinal acústico no líquido, um parâmetro fundamental para sua caracterização. Por exemplo, para a água, uma variação de apenas $0,1^{\circ}\text{C}$ em torno de 25°C pode provocar uma alteração de aproximadamente 26 cm/s na velocidade de propagação do som (BILANIUK; WONG, 1993).

Técnicas convencionais de controle térmico, como sensores em contato direto com o líquido ou banhos térmicos, podem introduzir contaminações e interferências indesejadas, comprometendo a precisão dos resultados.

Diversos estudos têm sido realizados visando aprimorar o controle térmico em diferentes sistemas. No trabalho apresentado por Tiago (2018), foi desenvolvida uma célula de medição com controle de temperatura baseado em células Peltier, cujo monitoramento térmico foi realizado por meio de sensores de temperatura posicionados junto ao bloco de medição. No estudo desenvolvido por Mironova et al. (2020), os autores propõem um observador baseado em filtro de Kalman Estendido para estimar as temperaturas das faces quente e fria de células Peltier em um sistema de fixação industrial. Essa abordagem viabiliza um controle térmico sem a necessidade de sensores físicos na face fria, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade em aplicações industriais.

Uma alternativa ao controle térmico convencional é a estimativa da temperatura por meio de sinais acústicos, aproveitando a relação entre a velocidade do som e a temperatura do meio. No entanto, essa abordagem requer uma equação precisa para cada líquido, o que pode ser inviável em amostras complexas. Mesmo para a água, fatores como pureza e escala de medição adotada afetam os resultados (MARCZAK, 1997). Nesse contexto, técnicas de estimação de estados tornam-se vantajosas, pois permitem estimar a temperatura sem depender de propriedades termoacústicas específicas, ampliando a aplicabilidade do sistema.

Métodos Bayesianos podem ser empregados como uma solução para problemas de estimação de estados, sendo os mais importantes os algoritmos baseados em filtragem de Kalman. O filtro de Kalman é utilizado na literatura para a estimação de estados de sistemas lineares (KALMAN, 1960), enquanto, para sistemas não-lineares, geralmente utilizam-se métodos de aproximação gaussiana baseados no filtro de Kalman, como o filtro de Kalman Estendido (MAYBECK, 1979) e o filtro de Kalman *Unscented* (JULIER; UHLMANN; DURRANT-WHYTE, 2000).

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura não invasivo para uma célula de medição ultrassônica em baixa frequência, com foco na estimação indireta da temperatura da água dentro da célula. O objetivo principal é viabilizar um método de medição que dispense sensores no interior do bloco de medição, realizando toda a estimativa da temperatura da amostra líquida com base em medições externas. A metodologia proposta consiste em duas etapas: a etapa de construção da célula de medição e a etapa de estimação de estados por meio do filtro de Kalman Estendido (EKF, do inglês *extended Kalman filter*).

Na primeira etapa, a célula permite a medição dos sinais de transmissão e múltiplas reflexões, com os quais, por meio de pós-processamento, pode-se obter indiretamente a temperatura do líquido com base em propriedades acústicas, como a velocidade de propagação do som. Na segunda etapa, a temperatura desse líquido pode ser estimada utilizando o algoritmo do EKF.

O desenvolvimento da célula de medição baseou-se no projeto descrito em (TIAGO, 2018), incorporando modificações físicas e funcionais relevantes. As principais diferenças incluem: (i) eliminação das cubetas removíveis, com o líquido sendo depositado diretamente no bloco de alumínio; (ii) substituição dos transdutores de alta frequência (75 MHz) por modelos de baixa frequência (10 MHz); e (iii) adoção de um método não invasivo de medição de temperatura, baseado na análise de sinais ultrassônicos. Nessa configuração, os transdutores são posicionados de modo a permitir a propagação do sinal acústico através do líquido, e a temperatura é estimada com base no tempo de voo (*Time of Flight*), obtido pela técnica de fase espectral, que se destaca pela robustez frente a ruídos e atenuações (JACKSON et al., 2013). A velocidade do som medida é então convertida em temperatura utilizando a equação apresentada em (BILANIUK; WONG, 1993).

Alternativamente, abordagens de filtragem Bayesiana como o EKF podem ser utilizadas para estimar a temperatura da amostra de água na célula de medição a partir do modelo matemático que descreve o comportamento das células Peltier e um conjunto de medições provenientes dos sensores de temperatura alocados no bloco de medição e no dissipador de calor, e a corrente consumida pelas células Peltier. Com essa abordagem, torna-se possível estimar a temperatura da amostra sem a necessidade de conhecer previamente suas propriedades termoacústicas, como a velocidade de propagação do som, por exemplo.

Diferentemente de trabalhos anteriores, como o apresentado em (MIRONOVA et al., 2020), que utilizaram sinais contínuos com frequência fixa e aplicaram apenas aquecimento nas células Peltier, o presente estudo introduz testes com excitação modulada por sinais *chirp*, permitindo a avaliação da resposta térmica do sistema frente a diferentes frequências de excitação. Além disso, os testes realizados incluem tanto o aquecimento quanto o resfriamento da amostra, representando condições térmicas mais dinâmicas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de medição de temperatura não invasivo para a caracterização de líquidos utilizando sinais ultrassônicos. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um sistema eletrônico para medir a temperatura do líquido de interesse utilizando sensores digitais;
- Projetar um sistema para controlar a temperatura da célula de caracterização utilizando células Peltier, através de sinais de controle enviados por um microcontrolador;
- Projetar um sistema de medição de temperatura utilizando sinais ultrassônicos enviados e recebidos pelos transdutores, de forma a explorar a correlação entre esses sinais e a temperatura do líquido;
- Desenvolver um estimador baseado no EKF para estimar a temperatura interna da célula a partir de um modelo térmico não linear e medições externas;
- Realizar testes experimentais com excitação por sinais *chirp*, avaliando a resposta térmica da célula e a acurácia da estimativa de temperatura comparada à medição por sensores digitais.

1.2 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 é apresentada a introdução ao tema, destacando a importância dos métodos ultrassônicos na caracterização de líquidos e os objetivos do projeto.

O Capítulo 2 oferece uma revisão teórica abrangente sobre os conceitos fundamentais, incluindo as propriedades das ondas acústicas e os métodos de medição utilizados.

O Capítulo 3 descreve o sistema de alta frequência, cujos ensaios experimentais foram utilizados para testar diferentes técnicas de cálculo do tempo de voo, um parâmetro essencial para a caracterização de líquidos.

No Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do sistema de baixa frequência, incluindo a metodologia de estimação da temperatura utilizando o EKF. São descritos os modelos matemáticos que permitem estimar a temperatura da amostra de forma não invasiva.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados experimentais, avaliando o desempenho do sistema de estimação térmica com o EKF em dois cenários, contemplando aquecimento e resfriamento. Os resultados são comparados com a técnica de medição acústica, validando a eficácia da metodologia proposta.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, que destacam a viabilidade do método proposto para estimação não invasiva da temperatura. Também são sugeridos aprimoramentos para trabalhos futuros, como ajustes adaptativos do modelo e a implementação do controle de temperatura.

2 Revisão Teórica

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais conceitos utilizados ao longo deste trabalho para desenvolver o método de medição de temperatura de líquidos. Primeiramente, serão discutidos os transdutores, dispositivos elétricos responsáveis pela transmissão e recepção dos sinais acústicos. Em seguida, serão apresentados os conceitos sobre tipos de ondas, com um foco especial em ondas acústicas e velocidade de propagação, elementos cruciais para a compreensão do comportamento dos sinais ultrassônicos. Na sequência são explorados os métodos de medição utilizados. A revisão inclui, por fim, o desenvolvimento teórico do modelo utilizado neste trabalho, que permite prever o comportamento dos sinais recebidos pelo transdutor ao se propagarem pelo líquido analisado.

2.1 Transdutores

Transdutores são dispositivos capazes de converter um tipo de grandeza física em outra. Em sistemas de medição ultrassônicos, por exemplo, os transdutores são dispositivos responsáveis por transmitir e receber sinais acústicos, que se propagam pelo meio de interesse, seja ele sólido, líquido ou gasoso.

2.1.1 Ondas acústicas

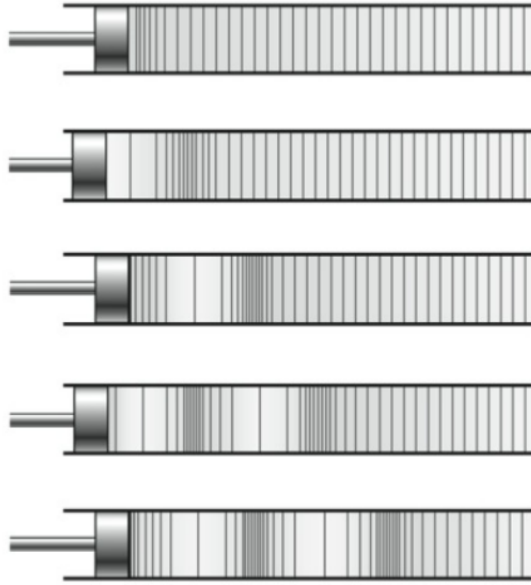
Os sinais transmitidos e recebidos por transdutores podem ser classificados de diferentes formas, dependendo da maneira como se propagam no meio. Por exemplo, as ondas transversais têm oscilações perpendiculares à direção de propagação do sinal, enquanto as ondas longitudinais oscilam paralelamente à direção de propagação do sinal Halliday, Resnick e Walker (2013).

As ondas acústicas podem ser longitudinais ou transversais, a depender do meio pelo qual se propagam. Em meios fluídos, por exemplo, as ondas acústicas se propagam como ondas longitudinais. Elas também são consideradas ondas mecânicas, pois precisam de um meio para se propagarem através da compressão e expansão de pequenos elementos de volume do meio Halliday, Resnick e Walker (2013). A Figura 1 ilustra uma onda sonora sendo gerada pelo movimento de um êmbolo em um tubo.

2.1.2 Velocidade de propagação de ondas acústicas

Segundo Halliday, Resnick e Krane (2017), a velocidade de propagação de uma onda acústica em um fluído é dada pela equação

Figura 1 – Ondas sonoras geradas em um tubo pelo movimento de um êmbolo.



Fonte: Retirado de Halliday, D., Resnick, R. e Krane, K. (2017).

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}, \quad (2.1)$$

em que c é a velocidade de propagação da onda acústica, B é o módulo de compressibilidade e ρ_0 é a massa específica do material. B descreve a mudança relativa no volume de um elemento de fluido devido a uma mudança de pressão conforme a equação

$$B = -\Delta p \left(\frac{\Delta V}{V} \right), \quad (2.2)$$

em que Δp corresponde à variação de pressão e ΔV à variação de volume. Assim, a velocidade de propagação da onda acústica em um fluido depende apenas de propriedades do meio, e não da frequência ou comprimento de onda. Além disso, a velocidade de propagação pode ser dada pela equação

$$c = \frac{L}{t}, \quad (2.3)$$

em que L corresponde à distância percorrida pelo sinal e t corresponde ao tempo de propagação.

2.1.2.1 Velocidade de propagação do som na água

A velocidade do som na água é uma propriedade essencial para diversas aplicações em física e engenharia, como a caracterização de líquidos. Neste trabalho, o conhecimento

preciso dessa velocidade é indispensável, pois é utilizado tanto para a calibração da distância de uma das camadas através das quais o sinal acústico se propaga quanto para a medição da temperatura do meio. Isso se deve ao fato de que a relação entre a velocidade do som na água e a temperatura ambiente é amplamente estabelecida e documentada na literatura.

De acordo com Bilaniuk e Wong (1993), a relação entre a velocidade do som na água e a temperatura pode ser descrita pela equação polinomial

$$c = \sum_{i=0}^5 q_i \cdot T^i. \quad (2.4)$$

em que c representa a velocidade do som na água em m/s, T é a temperatura em °C, e q_i são os coeficientes do polinômio.

A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes q_i utilizados na equação (2.4), os quais são baseados na escala de temperatura t_{90} . A escala t_{90} apresenta temperaturas específicas em °C, e foi definida com a adoção da Escala Internacional de Medidas de 1990 (ITS-90).

Tabela 1 – Coeficientes da equação da velocidade do som na água em função da temperatura na escala t_{90} .

Coeficiente	Valor
q_0	$1,40238744 \times 10^3$
q_1	$5,03835027$
q_2	$-5,81142290 \times 10^{-2}$
q_3	$3,34558776 \times 10^{-4}$
q_4	$-1,48150040 \times 10^{-6}$
q_5	$3,16081885 \times 10^{-9}$

Fonte: Do autor.

Para estimar a temperatura da água a partir da velocidade do som, é necessário isolar o termo T em (2.4). Para isso, reescreve-se a equação na forma de um polinômio de quinto grau

$$q_5 T^5 + q_4 T^4 + q_3 T^3 + q_2 T^2 + q_1 T + (q_0 - c) = 0, \quad (2.5)$$

cujas raízes são obtidas numericamente. Dentre elas, a raiz real que, ao ser inserida na equação original, apresentar o menor erro em relação à velocidade do som medida é selecionada como a estimativa da temperatura da amostra.

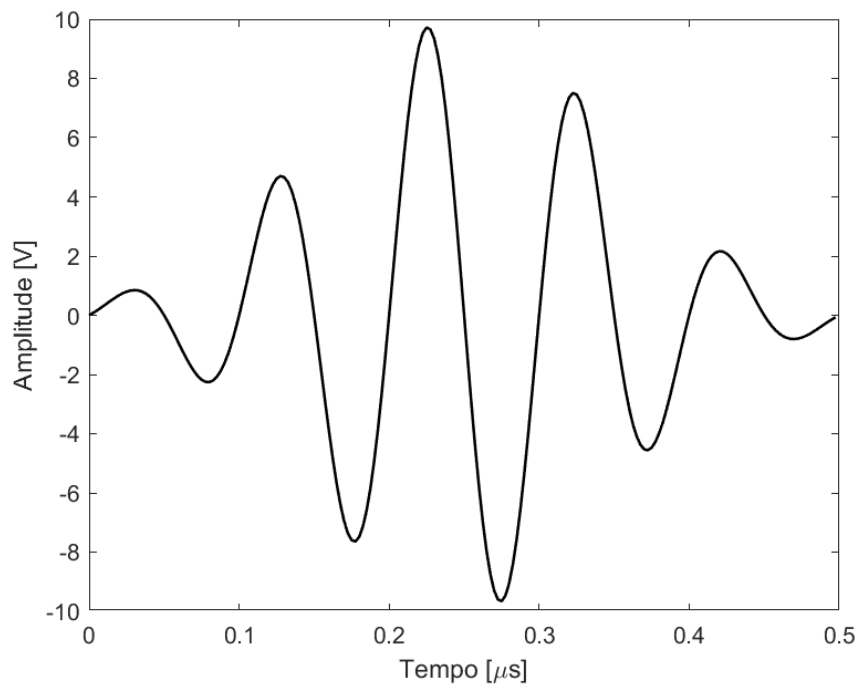
2.1.3 Métodos de medição

Os equipamentos ultrassônicos podem operar emitindo sinais por meio de ondas contínuas ou ondas pulsadas. Neste trabalho, optou-se pelo uso de ondas pulsadas, uma

vez que este método atualmente é o mais utilizado na área de ensaios não destrutivos por ultrassom devido à sua simplicidade e rapidez Adamowski et al. (2001).

As ondas pulsadas consistem em sinais emitidos em curtos intervalos, em contraste com as ondas contínuas. Esse sinal pode ser gerado, por exemplo, multiplicando-se um sinal senoidal de 5 ciclos, com um sinal gaussiano, resultando em uma onda pulsada conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de um sinal pulsado.



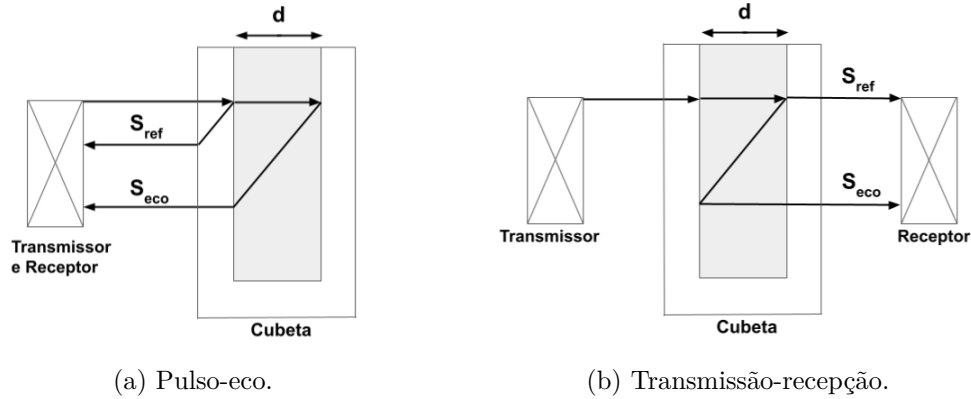
Fonte: Do autor.

Para uma faixa de frequências entre 1 MHz e 10 GHz, utiliza-se comumente os métodos pulsados Adamowski et al. (2001). Este método consiste na emissão de um sinal acústico pulsado de um transdutor, que se propaga através do líquido de interesse até ser captado pelo receptor. A análise do sinal recebido permite a medição de importantes características do líquido em questão.

O sistema acústico utilizado para os métodos pulsados pode assumir duas configurações de transdutores diferentes. Na configuração chamada de pulso-eco, apenas um transdutor é utilizado para emitir e receber os sinais acústicos que se propagam pelo líquido de interesse. A outra configuração possível, denominada transmissão-recepção, utiliza dois transdutores, um dedicado para a transmissão e outro para recepção. A Figura 3 ilustra as duas configurações possíveis de transdutores no sistema acústico.

Uma informação importante sobre o líquido analisado que pode ser extraída do sinal recebido pelo transdutor é a velocidade de propagação do som, pois ela se relaciona diretamente com a densidade do líquido através da equação

Figura 3 – Métodos pulsados.



Fonte: Do autor.

$$Z = \rho c, \quad (2.6)$$

em que ρ é a densidade do líquido e Z é a impedância acústica característica do líquido.

Para calcular a velocidade de propagação do som no líquido utilizando a configuração transmissão-recepção, deve-se medir a diferença de tempo entre a detecção do primeiro sinal recebido no transdutor e do sinal refletido dentro da cubeta onde está o líquido de interesse, conforme ilustra a Figura Subfigure 3(b). O primeiro sinal recebido no transdutor é chamado neste trabalho de S_{ref} , pois trata-se de um sinal de referência para os sinais recebidos na sequência. O sinal gerado após se propagar pelo meio de interesse três vezes é chamado de S_{eco} , sendo este o eco de maior interesse captado pelo transdutor receptor. O atraso de tempo entre S_{ref} e S_{eco} é chamado de Tempo de Voo (ToF, do inglês *Time-of-Flight*). A Figura 4 ilustra o tempo de voo entre dois sinais subsequentes recebidos em um transdutor.

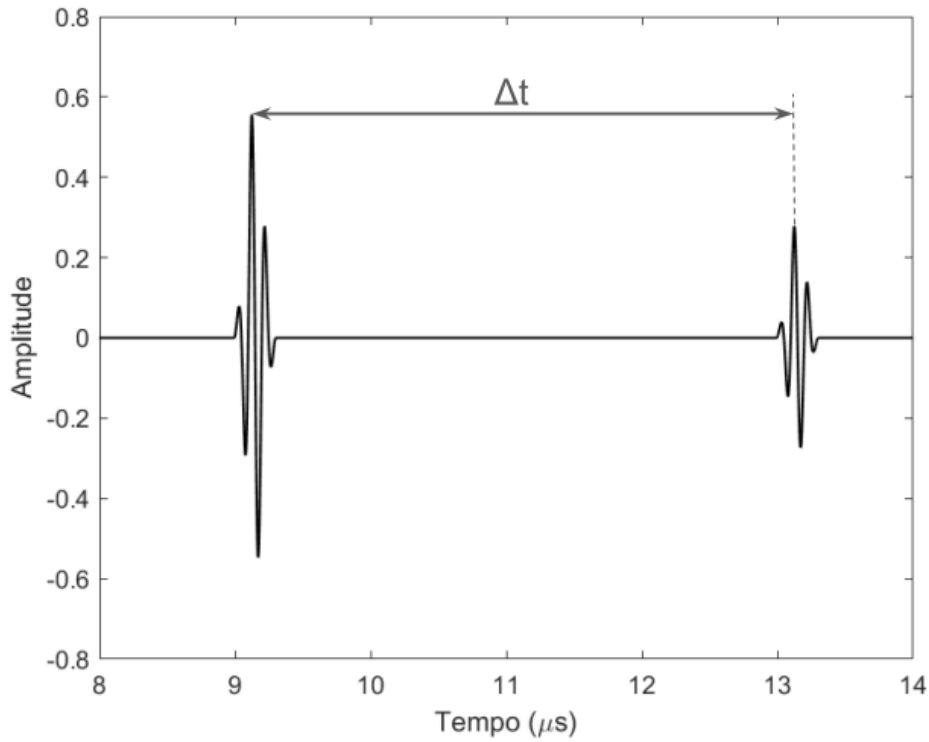
A relação entre o tempo de voo (Δt) e a velocidade de propagação do som no líquido é dada por

$$d = c\Delta t/2, \quad (2.7)$$

em que Δt é o tempo de voo entre S_{ref} e S_{eco} e d é a espessura da cubeta onde estará o líquido de interesse.

2.2 Técnicas para cálculo do tempo de voo (Δt)

Diferentes técnicas podem ser usadas para calcular o tempo de voo. Os métodos mais utilizados para medir o tempo de voo entre dois ecos subsequentes são os métodos de detecção de pico, o método de cruzamento com zero (conhecidos como métodos convencionais), correlação cruzada e o método em que utiliza-se os espectros de fase dos sinais (ADAMOWSKI et al., 2001). É importante salientar que podem-se obter pequenas

Figura 4 – Medição do tempo de voo Δt .

Fonte: Do autor.

diferenças para o resultado de cada método devido à frequência de amostragem e robustez contra a presença de ruídos e atenuação.

2.2.1 Detecção de Pico

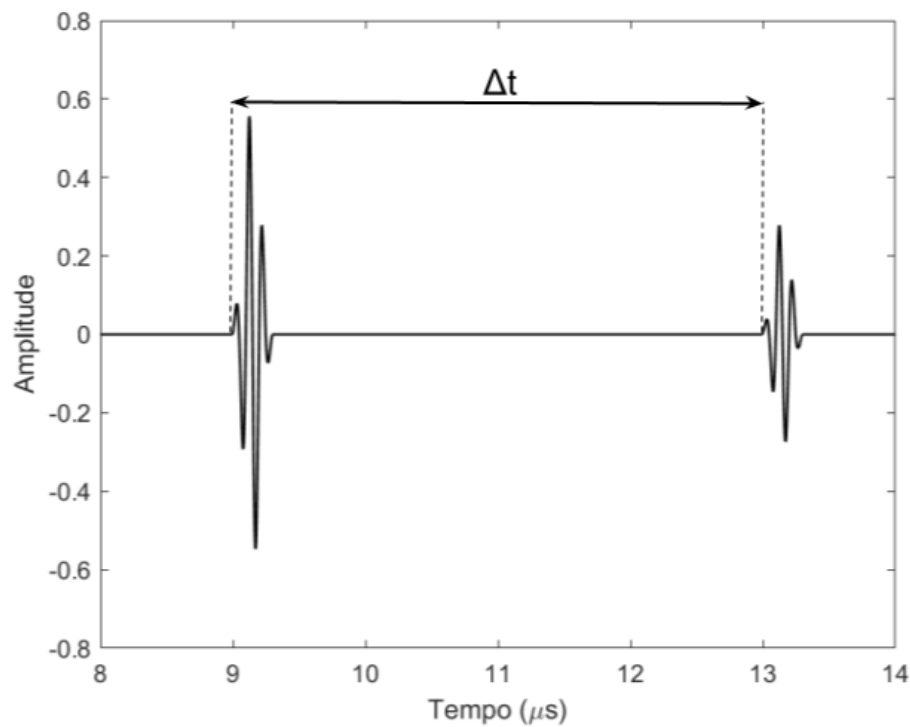
Neste método, o Δt é medido calculando o atraso entre o pico do sinal de referência e o pico do sinal do eco principal, conforme foi ilustrado na Figura 4. A maior vantagem deste método é sua facilidade de implementação. Contudo, possui algumas desvantagens significativas para tornar este método propenso a erros. A primeira delas é que uma baixa frequência de amostragem, devido a limitação de hardware, pode reduzir a precisão para a localização do pico do sinal. Outra desvantagem é que é um método sensível à presença de ruídos ou da atenuação do sinal que podem distorcer o sinal e a localização do ponto de máximo.

Uma maneira de contornar estes problemas é utilizar a transformada de Hilbert para detectar os picos das envoltórias dos sinais. Outra maneira é utilizar a interpolação para aumentar o número de pontos do sinal, aumentando assim, a sua resolução e a precisão do método.

2.2.2 Cruzamento com Zero

Outra forma de medir o tempo de voo entre os sinais é calculando o atraso entre os cruzamentos com o zero dos sinais. A vantagem deste método é que também é fácil de implementar, apesar de ser complicado identificar o ponto de cruzamento com zero correto. Por outro lado, assim como para o método de detecção de picos, o cruzamento com zero é sensível à atenuação e ruídos que podem distorcer o sinal e deslocar o ponto correto de cruzamento com zero. Além disso, uma baixa frequência de amostragem reduz a resolução do sinal e aumenta a possibilidade de erro do método. Logo, a interpolação também pode ser utilizada neste caso para aumentar a resolução dos sinais e a precisão do método. O método de cruzamento com zero é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Métodos de cruzamento com zero.



Fonte: Do autor.

2.2.3 Correlação Cruzada

Segundo Aguirre (2004), a função de correlação entre dois sinais é uma medida da dependência temporal entre eles. Sejam dois sinais deslocados no tempo, $x[m]$ e $y[m]$, a função de correlação cruzada entre eles será estatisticamente pequena para todos os valores de atraso n se tais sinais forem independentes no tempo, e grande se forem correlacionados. Logo, a correlação cruzada é uma técnica útil para detectar um sinal conhecido mesmo com a presença de ruídos. De acordo com Oppenheim, Schafer e Buck (2010), a correlação

cruzada entre $x[m]$ e $y[m]$ é definida como

$$c_{xy}[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[n+m] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[-m]x[n-m] = y[-n] * x[n], \quad (2.8)$$

em que $c_{xy}[n]$ corresponde ao vetor que guarda os valores da correlação cruzada entre os sinais. A correlação cruzada é útil em diversas aplicações, como em detecção de sinais, análise de séries temporais e processamento de imagens.

A medição de Δt por meio do técnica de correlação cruzada baseia-se na identificação do ponto de máxima correlação entre o sinal de referência e o sinal de eco. Este ponto representa a maior similaridade entre os dois sinais e é determinado pelo valor máximo absoluto da correlação cruzada. O índice correspondente a este valor máximo é então utilizado para calcular o deslocamento temporal entre os sinais, permitindo assim a estimativa precisa do tempo de voo.

Uma das vantagens deste método é que, em líquidos cujo coeficiente de atenuação varia com f^n , onde f representa a frequência e n é uma constante, a atenuação não exerce influência sobre o resultado Adamowski et al. (2001). Além disso, a correlação cruzada é bastante robusta contra o efeito de ruídos, pois ela mede a similaridade entre os dois sinais, logo os sinais não correlacionados com os sinais de interesse tendem a causar um impacto reduzido Jackson et al. (2013). Por outro lado, segundo Adamowski et al. (2001), para sinais digitalizados este método tem a resolução limitada pelo intervalo de amostragem, pois não se garante que o ponto de máximo esteja representado numa amostra do sinal. Por isso, torna-se necessário melhorar a resolução do sinal do método por meio da interpolação ou da transformada de Hilbert.

2.2.4 Fase Espectral

Este método permite medir o tempo de voo no líquido em função da frequência, utilizando os espectros de fase dos sinais calculados pela transformada de Fourier de pulsos de banda larga. A relação entre dois ecos subsequentes pode ser descrito como

$$p_1(t) = p_0(t - \Delta t), \quad (2.9)$$

em que p_1 corresponde ao sinal de eco, p_0 corresponde ao sinal de referência e Δt é o tempo de voo entre eles. Calculando a transformada de Fourier em ambos os lados da equação (2.9), tem-se

$$P_1(f) = P_0(f)e^{-j\pi f\Delta t}, \quad (2.10)$$

em que P_1 e P_0 correspondem às transformadas de Fourier dos sinais. Por fim, o tempo de voo é obtido por

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f}[\angle P_0(f) - \angle P_1(f)]. \quad (2.11)$$

O método de fase espectral pode fornecer medições de tempo de voo mais precisas e robustas do que métodos no domínio do tempo pois opera bem em condições de baixa

relação sinal-ruído (SNR). Ao utilizar múltiplas frequências e transformar os sinais para o domínio da frequência, ele consegue atenuar os efeitos do ruído (JACKSON et al., 2013). As desvantagens em relação aos métodos anteriores é que é mais complexo e exigente computacionalmente. Além disso, uma baixa frequência de amostragem pode reduzir a precisão do método.

2.3 Modelo acústico de camadas

O desenvolvimento de um modelo que descreva com eficiência os sinais recebidos pelo transdutor após a propagação pelo líquido de interesse, bem como pelas camadas que compõem a célula, é fundamental para o desenvolvimento do projeto. O modelo de camadas, chamado de Matriz de Transferência Total (TMM, do inglês *Transfer Matrix Method*) foi escolhido para este trabalho, pois ele torna possível modelar o sistema visando estimar um coeficiente de transmissão equivalente às várias camadas posicionadas entre os transdutores na célula de medição, sem a necessidade de se conhecer os aspectos construtivos do transdutor. Além disso, o modelo TMM tende a ser mais simples e menos exigente em termos computacionais em relação a outros métodos, como por exemplo o Método de Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*), que é mais complexo para implementar devido à necessidade de discretizar o domínio de forma precisa.

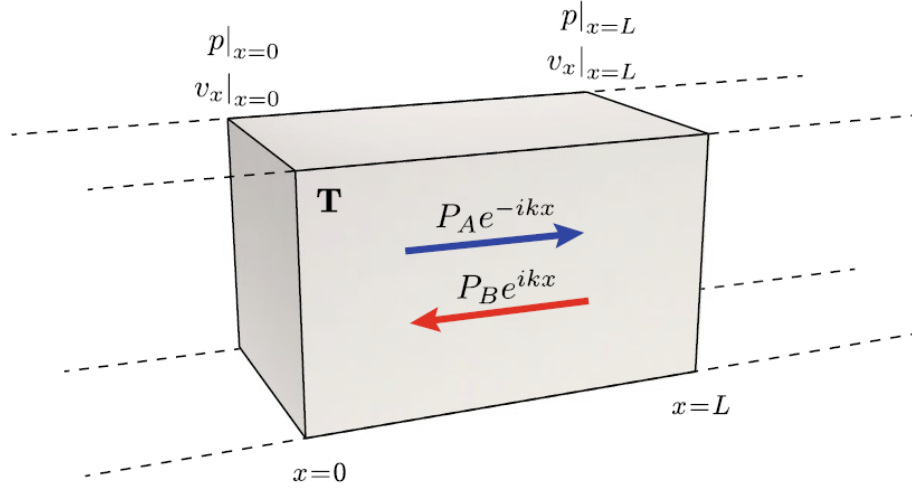
O modelo TMM possibilita a análise detalhada do sinal acústico antes e após se propagar pelo líquido de interesse, além de permitir a investigação dos efeitos causados ao variar parâmetros construtivos da célula, como a largura da cubeta, a distância entre os transdutores e a célula, entre outros. Nesta seção, será discutido o modelo de camadas desenvolvido por Jiménez, Umnova e Groby (2021), e serão elaboradas as equações que podem ser implementadas computacionalmente para prever o comportamento dos sinais para diferentes tipos de líquidos.

2.3.1 Método da Matriz de Transferência

O modelo TMM é utilizado para descrever a propagação de sinais acústicos através de estruturas com múltiplas camadas. Com esse método, é possível calcular o coeficiente de transmissão do sinal acústico por essas camadas, permitindo simular o sinal que se espera receber no transdutor após a propagação.

No desenvolvimento da matriz de transferência, conforme descrito por Jiménez, Umnova e Groby (2021), considera-se inicialmente uma estrutura de uma única camada, pela qual apenas ondas planas se propagam. Neste contexto, a pressão acústica $p(x)$ e a velocidade de partícula $v_x(x)$ dentro da camada são as principais variáveis de interesse. Logo, o campo acústico total dentro do material é descrito como a superposição de duas ondas planas que se propagam em sentidos opostos, uma de incidência e outra de reflexão,

Figura 6 – Esquema da camada de material acústico caracterizada por uma matriz de transferência $\mathbf{T}$.



Fonte: Retirado de Jimenez (2021).

conforme mostrado na Figura 6. A pressão acústica $p(x)$ e a velocidade de partícula $v_x(x)$ são descritos por

$$p(x) = P_A e^{-ikx} + P_B e^{ikx}, \quad (2.12)$$

$$v_x(x) = \frac{P_A}{Z} e^{-ikx} - \frac{P_B}{Z} e^{ikx}, \quad (2.13)$$

em que P_A e P_B correspondem às amplitudes das ondas, Z corresponde à impedância acústica do meio e k é o número de onda que pode ser calculado por

$$k = \omega/c, \quad (2.14)$$

em que c é a velocidade de propagação do som no meio e ω é a frequência angular da onda.

Em seguida, avaliam-se as equações (2.12) e (2.13) em ambas as extremidades da camada. Em $x = 0$ têm-se

$$p(x) \Big|_{x=0} = P_A + P_B, \quad (2.15)$$

$$Zv_x(x) \Big|_{x=0} = P_A - P_B. \quad (2.16)$$

Já em $x = L$, têm-se

$$p(x) = P_A e^{-ikL} + P_B e^{ikL}, \quad (2.17)$$

$$v_x(x) = \frac{P_A}{Z} e^{-ikL} - \frac{P_B}{Z} e^{ikL}. \quad (2.18)$$

Expandindo estas equações utilizando as relações de Euler

$$e^{ikx} = \cos(kx) + i\text{sen}(kx), \quad (2.19)$$

$$e^{-ikx} = \cos(kx) - i\text{sen}(kx), \quad (2.20)$$

têm-se

$$p(x) = P_A \cos(kL) - iP_A \text{sen}(kL) + P_B \cos(kL) + iP_B \text{sen}(kL), \quad (2.21)$$

$$v_x(x) = \frac{P_A}{Z} \cos(kL) - i \frac{P_A}{Z} \text{sen}(kL) - \frac{P_B}{Z} \cos(kL) - i \frac{P_B}{Z} \text{sen}(kL). \quad (2.22)$$

Na sequência, reorganizam-se os termos para colocar as componentes de cosseno e seno em evidência,

$$p(x) \Big|_{x=L} = (P_A + P_B) \cos(kL) - i(P_A - P_B) \text{sen}(kL), \quad (2.23)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=L} = \frac{(P_A - P_B)}{Z} \cos(kL) - i \frac{(P_A + P_B)}{Z} \text{sen}(kL). \quad (2.24)$$

Substituindo as equações (2.15) e (2.16) em (2.23) e (2.24), têm-se

$$p(x) \Big|_{x=L} = \cos(kL) p(x) \Big|_{x=0} - iZ \text{sen}(kL) v_x(x) \Big|_{x=0}, \quad (2.25)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=L} = \cos(kL) v_x(x) \Big|_{x=0} - i \frac{1}{Z} \text{sen}(kL) p(x) \Big|_{x=0}. \quad (2.26)$$

As equações anteriores podem ser escritas como

$$\begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=L} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & -iZ \text{sen}(kL) \\ -i \frac{1}{Z} \text{sen}(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=0}. \quad (2.27)$$

Desta forma, as magnitudes dos sinais acústicos em ambos os lados da camada ilustrada na Figura 6 são relacionadas pela matriz 2x2 mostrada na equação anterior, que depende apenas da impedância acústica do meio (Z) e do número de onda (k).

2.3.2 Matriz de Transferência Total

Para uma dada camada, é possível definir uma matriz $\mathbf{T}$, que relaciona a velocidade de partícula acústica v_x e a pressão sonora p em ambas as extremidades da estrutura. Ou seja, em $x = 0$ e $x = L$. A matriz é descrita como

$$\begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=0} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=L}, \quad (2.28)$$

A matriz $\mathbf{T}$, portanto, é descrita como

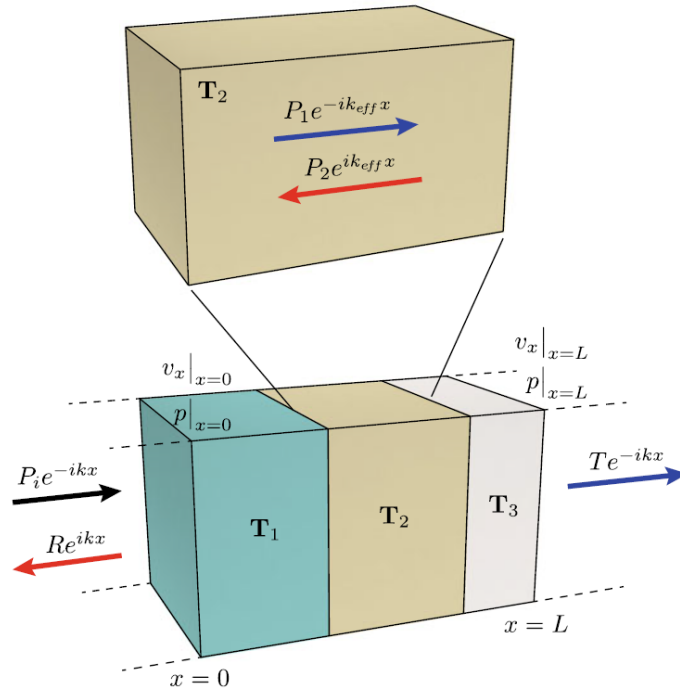
$$\begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=L}. \quad (2.29)$$

Considerando uma estrutura complexa, composta por várias camadas, conforme mostrado na Figura 7, é possível definir uma matriz de transferência ($\mathbf{T}$) para cada camada, logo a matriz de transferência total pode ser obtida fazendo o produto das N matrizes individuais referentes a cada camada conforme a equação

$$\mathbf{T} = \prod_{n=1}^N \mathbf{T}_n. \quad (2.30)$$

A matriz de transferência total fornece informações importantes para o sistema, como os coeficientes de transmissão, reflexão e absorção.

Figura 7 – Esquema de uma estrutura composta por várias camadas com diferentes propriedades.



Fonte: Retirado de Jimenez (2021).

2.3.3 Matriz de Dispersão

A matriz de dispersão $\mathbf{S}$ relaciona as amplitudes das ondas que entram e saem de uma determinada camada. A pressão total dos dois lados da estrutura, em $x = 0$ e $x = L$ é dada por

$$p(x) = \begin{cases} Ae^{-ikx} + Be^{ikx} & \text{para } x < 0, \\ Ce^{-ikx} + De^{ikx} & \text{para } x > L, \end{cases} \quad (2.31)$$

em que A , B , C e D correspondem às amplitudes das ondas. Então, a matriz $\mathbf{S}$ é dada por

$$\begin{bmatrix} C \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^- & R^+ \\ R^- & T^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

em que os elementos T^- e T^+ correspondem aos coeficientes de transmissão e R^- e R^+ aos coeficientes de reflexão. sendo que os sinais (+,-) denotam a direção da onda de incidência: o sinal positivo para as ondas que incidem do lado direito da camada e o sinal negativo para os sinais que incidem do lado esquerdo.

2.3.4 Problema de Transmissão

Considerando um sistema em que um material está cercado por um meio fluido (como a água), então o sinal acústico irá entrar no material em $x = 0$ e sair em $x = L$, sendo as impedâncias acústicas $Z_0 = \rho_0 c_0$ para $x = 0$ e $Z_L = \rho_L c_L$ para $x = L$, respectivamente. A equação (2.30) pode ser escrita como

$$p(x) \Big|_{x=0} = T_{11} p(x) \Big|_{x=L} + T_{12} v_x(x) \Big|_{x=L}, \quad (2.33)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=0} = T_{21} p(x) \Big|_{x=L} + T_{22} v_x(x) \Big|_{x=L}. \quad (2.34)$$

Então, assumindo uma onda de pressão incidente cuja amplitude é unitária, a pressão e a velocidade em ambos os lados da estrutura podem ser definidas em função dos coeficientes de reflexão R^+ e R^- , e dos coeficientes de transmissão correspondentes T^+ e T^- , como

$$p(x) \Big|_{x=0} = 1 + R^-, \quad (2.35)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=0} = \frac{1 - R^-}{Z_0}, \quad (2.36)$$

$$p(x) \Big|_{x=L} = T^- e^{ikL}, \quad (2.37)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=L} = \frac{T^- e^{ikL}}{Z_L}, \quad (2.38)$$

para uma onda plana incidente vindo de $-\infty$ e propagando-se na direção $+x$, e

$$p(x) \Big|_{x=0} = T^+ e^{ikL}, \quad (2.39)$$

$$p(x) \Big|_{x=L} = R^+ + 1, \quad (2.40)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=0} = -\frac{T^+ e^{ikL}}{Z_0}, \quad (2.41)$$

$$v_x(x) \Big|_{x=L} = \frac{R^+ - 1}{Z_L}, \quad (2.42)$$

para uma onda plana incidente vindo de $+\infty$ e propagando-se na direção $-x$, onde $Z_0 = \rho_0 c_0$ e $Z_L = \rho_L c_L$ são as impedâncias dos meios em cada lado da estrutura, ou seja, $x < 0$ e $x > L$, respectivamente.

Combinando as equações (2.35)-(2.42) com (2.33)-(2.34), obtêm-se as seguintes relações

$$T^- = \frac{1 + R^-}{T_{11} + T_{12}/Z_L}, \quad (2.43)$$

$$T^- = \frac{1 - R^-}{T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}, \quad (2.44)$$

$$T^+ = T_{11}(1 + R^+) + \frac{T_{12}}{Z_L}(R^+ - 1), \quad (2.45)$$

$$T^+ = -T_{21}Z_0(1 + R^+) - T_{22}\frac{Z_0}{Z_L}(R^+ - 1). \quad (2.46)$$

A seguir, obtêm-se a relação entre os elementos da matriz S e aqueles da matriz T em configurações específicas:

1. Sistemas não recíprocos

Estruturas nas quais a condição $T^- \neq T^+$ é satisfeita.

2. Sistemas recíprocos

Estruturas nas quais a condição $T^- = T^+$ é satisfeita.

3. Sistemas recíprocos e simétricos

Estruturas nas quais as condições $T^+ = T^-$ e $R^- = R^+$ são satisfeitas.

2.3.5 Sistemas não recíprocos

Para casos gerais, as equações que relacionam a matriz T e a matriz S são

$$T^- = \frac{2e^{ikL}}{T_{11} + T_{12}/Z_L + T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}, \quad (2.47)$$

$$R^- = \frac{T_{11} + T_{12}/Z_L - T_{21}Z_0 - T_{22}Z_0/Z_L}{T_{11} + T_{12}/Z_L + T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}, \quad (2.48)$$

$$T^+ = \frac{Z_0}{Z_L} \frac{2e^{ikL}T_{11}(T_{22} - T_{12}T_{21})}{T_{11} + T_{12}/Z_L + T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}, \quad (2.49)$$

$$R^+ = \frac{-T_{11} + T_{12}/Z_L - T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}{T_{11} + T_{12}/Z_L + T_{21}Z_0 + T_{22}Z_0/Z_L}. \quad (2.50)$$

2.3.6 Sistemas recíprocos

Em sistemas recíprocos, a determinante da matriz de transferência é unitária, $T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1$. Esta propriedade é satisfeita em sistemas lineares e invariantes no tempo, onde a transmissão não depende da direção da onda de incidência. Como este termo aparece na equação (2.49), implica que $T_- = T_+ = T$. Logo, os coeficientes de transmissão são dados por

$$T = \frac{2e^{ikL}}{T_{11} + T_{12}/Z_0 + T_{21}Z_0 + T_{22}}. \quad (2.51)$$

2.4 Controle de Instrumentos de Bancada

O controle de instrumentos de bancada, como osciloscópios, multímetros e geradores de sinais, é uma tarefa essencial em experimentos que envolvem a aquisição de dados em tempo real. No contexto do presente trabalho, foi utilizado o protocolo *Standard Commands for Programmable Instruments* para a comunicação e controle desses instrumentos por meio do *software* Matlab. Esta seção aborda as características do protocolo SCPI, as técnicas de controle aplicadas, e as vantagens de sua utilização no nosso caso.

2.4.1 Protocolo SCPI

O protocolo SCPI é um padrão de comandos utilizados para a comunicação com instrumentos de bancada eletrônica e de medição. Introduzido em 1990, o SCPI fornece uma linguagem padrão para controlar diferentes tipos de instrumentos por meio de comandos textuais. Esses comandos são baseados em uma sintaxe hierárquica de palavras-chaves que permitem o controle remoto de funções e configurações dos equipamentos, como a aquisição de sinais, medições e ajustes de parâmetros.

O protocolo SCPI foi projetado para ser utilizado sobre diversos protocolos de comunicação, como GPIB, USB, Ethernet e RS-232, sendo amplamente adotado pela maioria dos fabricantes de instrumentos eletrônicos. O principal benefício do SCPI é a padronização: independentemente do fabricante, os comandos seguem uma mesma estrutura, permitindo o controle de diversos dispositivos de diferentes marcas com a mesma base de comandos. Os comandos SCPI são enviados ao instrumento em formato de texto, podendo realizar operações como configuração de parâmetros de medição, aquisição de dados, calibrações, controle de funções específicas, como ajuste de *triggers* e modos de captura.

A escolha de comandos SCPI para controlar o osciloscópio neste trabalho trouxe várias vantagens. Primeiramente, o SCPI é amplamente suportado por praticamente todos os osciloscópios modernos, o que facilita a integração de diferentes dispositivos em um único ambiente de controle. Além disso, a linguagem SCPI é baseada em texto, o que permite que os comandos sejam facilmente escritos, compreendidos e depurados no ambiente de programação. Especificamente no caso do presente trabalho, o SCPI permitiu a automação de diversas tarefas, como o ajuste automático da escala de visualização e a configuração de parâmetros de aquisição de sinais, como o *trigger* e o modo de aquisição. Essas operações, que antes seriam realizadas manualmente, foram automatizadas com comandos SCPI dentro do ambiente Matlab, permitindo maior precisão, reprodutibilidade e controle no processo de aquisição de dados Tektronix (2006).

2.5 Considerações parciais

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão teórica dos conceitos fundamentais para o desenvolvimento do sistema de medição de temperatura por meio de ultrassom. Inicialmente, foram discutidos os transdutores, que desempenham um papel essencial na transmissão e recepção dos sinais acústicos, além das características das ondas acústicas, como a velocidade de propagação, que influenciam diretamente o comportamento dos sinais em meios líquidos.

Também foi detalhado o uso de métodos de medição com ultrassom utilizando ondas pulsadas, destacando-se as configurações de pulso-eco e transmissão-recepção, amplamente aplicadas em ensaios não destrutivos. A análise das técnicas para o cálculo do tempo de voo (Δt), como detecção de picos, cruzamento com zero, correlação cruzada e fase espectral, evidenciou a importância de escolher o método mais apropriado para garantir precisão nas medições, mesmo em meio às interferências causadas por ruídos e atenuações.

Por fim, o modelo acústico de camadas foi revisado como uma ferramenta crucial para prever o comportamento dos sinais ultrassônicos em diferentes configurações. Esses conceitos fornecem a base teórica sólida necessária para o desenvolvimento subsequente do sistema de medição e controle de temperatura, garantindo que o sistema funcione de forma precisa e eficiente nas condições experimentais.

3 Sistema de Alta Frequência

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de medição e controle de temperatura para uma célula de caracterização de líquidos por meio de sinais acústicos. Neste contexto, este capítulo tem como foco apresentar as diferentes abordagens testadas para otimizar o cálculo do tempo de voo, visando identificar a técnica que oferece os resultados mais precisos e confiáveis.

Para alcançar esse objetivo, foram utilizados dados experimentais previamente obtidos em um sistema de alta frequência que se tem disponível para este tipo de medição. Inicialmente, será fornecida uma visão geral desse sistema, detalhando suas principais características e os sinais acústicos utilizados no presente estudo. Em seguida, serão discutidos os resultados obtidos com as diferentes técnicas de cálculo do tempo de voo. A partir da comparação desses resultados, serão definidas as técnicas mais adequadas que servirão de base para as etapas subsequentes deste trabalho.

3.1 Visão geral do sistema de alta frequência

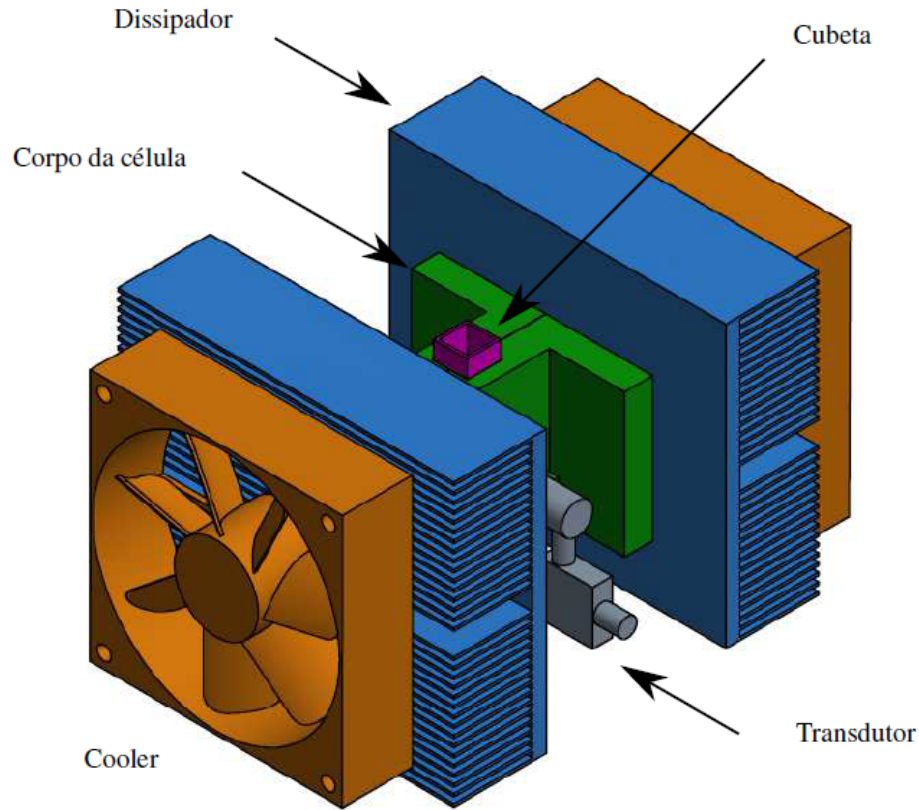
Conforme discutido anteriormente, o tempo de voo (Δt) está diretamente relacionado à velocidade de propagação do sinal acústico em um líquido, a qual, por sua vez, depende de propriedades físicas do líquido, como a densidade, por exemplo. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi testar diferentes técnicas para o cálculo do tempo de voo, com o intuito de identificar a que oferece os resultados mais precisos e confiáveis. Para isso, foram utilizados os dados experimentais obtidos por Tiago (2018), onde foi desenvolvida uma célula de medição para caracterização de líquidos por meio de ultrassom. A Figura 8 apresenta uma ilustração tridimensional do sistema de alta frequência utilizado.

Neste trabalho, foram utilizados dois transdutores com frequência central de 75 MHz e largura de banda de 58,8 MHz a meia potência (-6 dB), operando no modo transmissão-recepção. Esses transdutores têm a função de enviar e receber sinais ultrassônicos que se propagam através do líquido de interesse, que está localizado dentro da cubeta.

O sistema foi construído com uma célula de medição específica, composta por um bloco metálico de alumínio, escolhido por ser de fácil usinagem, baixo custo e excelente condutividade térmica. A cubeta de medição foi acoplada ao bloco por meio de uma camada de água destilada para garantir o alinhamento dos transdutores e minimizar a atenuação do sinal durante a propagação.

A fim de maximizar o desempenho térmico durante os testes, células Peltier foram acopladas ao sistema para garantir o controle da temperatura da amostra dentro da cubeta. O uso desses transdutores de alta frequência, em conjunto com um sistema de exci-

Figura 8 – Representação tridimensional do sistema de alta frequência.



Fonte: Retirado de Tiago (2018).

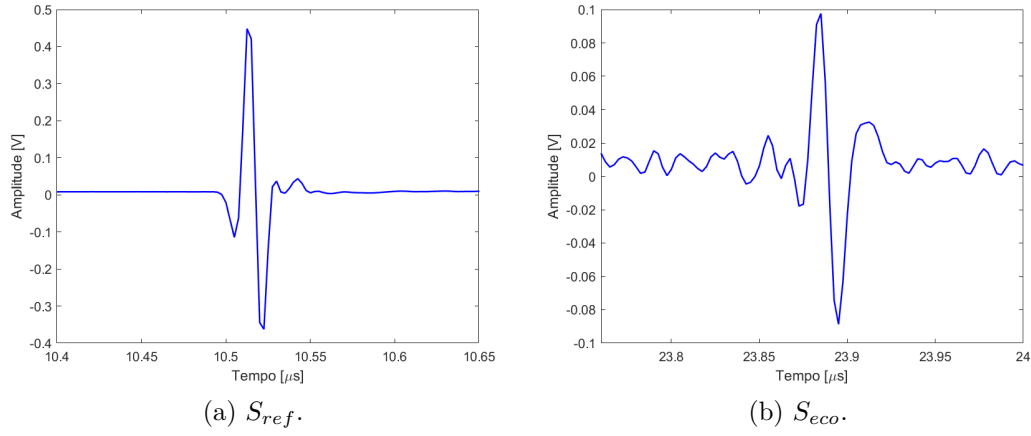
tação de pulsos, permitiu a medição da velocidade de propagação e atenuação acústica em líquidos. O sinal de excitação do transdutor emissor foi gerado por um pulsador programável (JSR, modelo DPR500) operando em conjunto com um módulo pulsador/amplificador remoto (JSR, modelo RP-H2), que excita o transdutor com um pulso estreito, de banda larga, e tem um receptor com banda de 500 MHz e ganho de até 50 dB.

Os sinais utilizados neste trabalho para testar as diferentes técnicas para calcular o Δt foram obtidos no sistema de alta frequência utilizando água como líquido de referência, a uma temperatura de 25 °C, e possuem uma frequência de amostragem de 400 MHz. Na Figura 9, são apresentados esses sinais, sendo a Figura 9(a) referente ao primeiro sinal recebido pelo transdutor (S_{ref}) e a Figura 9(b) ao eco principal, correspondente ao sinal refletido dentro da cubeta (S_{eco}).

3.2 Avaliação dos métodos para cálculo de tempo de voo

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação de diferentes técnicas para o cálculo do tempo de voo nos sinais experimentais discutidos anteriormente. As técnicas avaliadas foram: detecção de picos, cruzamento com zero, correlação cruzada e fase espectral. A análise comparativa se baseou na precisão dos tempos

Figura 9 – Sinais adquiridos no sistema de alta frequência que foram utilizados para realizar os testes da medição do tempo de voo.



Fonte: Do autor.

de voo calculados e na robustez das técnicas em relação ao ruído presente nos sinais.

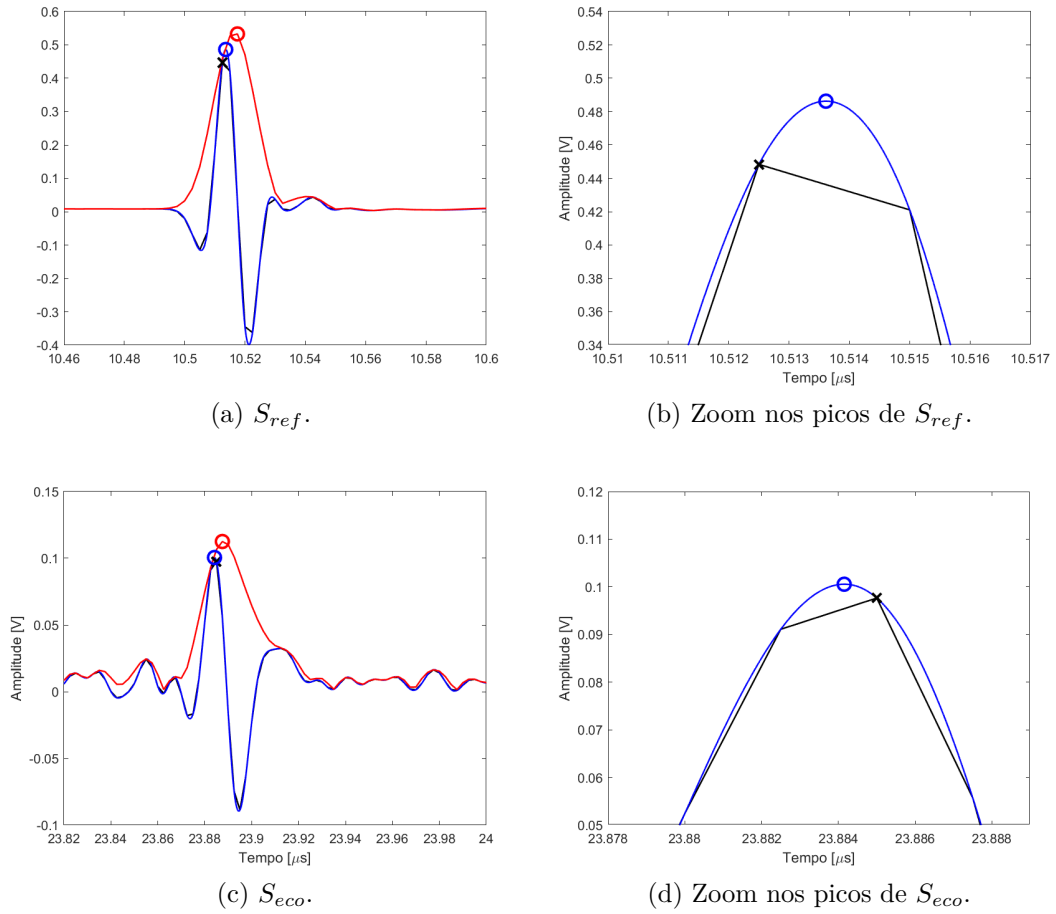
Antes de calcular o tempo de voo utilizando as técnicas citadas, algumas características dos sinais apresentados na Figura 9 devem ser destacadas, pois são relevantes para a aplicação das técnicas de medição do tempo de voo. Primeiramente, é importante ressaltar que os sinais foram adquiridos através de métodos pulsados. Essa característica é crucial, pois as técnicas utilizadas neste trabalho são especificamente voltadas para métodos pulsados. Além disso, observa-se que o sinal S_{eco} , visto na Figura 9(b), apresenta um nível maior de ruído, o que se deve às reflexões e transmissões ocorridas ao longo do trajeto de propagação. Essa característica é relevante, pois exige maior cuidado na identificação do pico correto ao aplicar a técnica de detecção de picos, ou do cruzamento correto ao utilizar a técnica de cruzamento com zero. Por fim, é importante destacar que o sinal S_{eco} possui uma magnitude aproximadamente cinco vezes menor que o sinal S_{ref} . Essa diferença é significativa, pois, se os sinais forem muito atenuados, pode se tornar inviável calcular o tempo de voo com precisão.

3.2.1 Detecção de Picos

Para calcular o tempo de voo utilizando a detecção de picos, é necessário identificar os picos de amplitude nos sinais S_{eco} e S_{ref} e subtrair os tempos correspondentes a esses picos. Este método foi aprimorado por técnicas que aumentam a resolução dos sinais e reduzem erros. Uma das técnicas utilizadas foi a interpolação cúbica, que expandiu o sinal original de 128 para 128.000 pontos, permitindo uma identificação mais precisa do pico. Além disso, aplicou-se a transformada de Hilbert, uma técnica que gera a envoltória analítica de um sinal, permitindo a identificação precisa dos picos a partir da envoltória, o que aprimora o cálculo do tempo de voo.

A Figura 10 apresenta os sinais gerados durante o teste. A Figura 10(a) corresponde ao primeiro sinal recebido no transdutor, S_{ref} , onde foram plotados na mesma figura a sua interpolação, sua envoltória e foram identificados os picos dos sinais. Na Figura 10(b) foi ampliada a região dos picos dos sinais original e interpolado com o intuito de deixar evidente o deslocamento entre eles. O mesmo procedimento foi realizado para o eco principal, conforme visto nas Figuras 10(c) e 10(d).

Figura 10 – Técnica de detecção de picos. São mostrados os sinais original (preto), interpolado (azul), e a envoltória (vermelho), junto com os picos do sinal original (x preto), do sinal interpolado (círculo azul), e da envoltória (círculo vermelho).



Fonte: Do autor.

Para evidenciar a melhoria na resolução dos sinais, foram ampliados os picos dos sinais original e interpolado, conforme apresentado nas Figuras 10(b) e 10(d). Observa-se que as amostras do sinal original não capturam de forma precisa a posição do pico, enquanto a interpolação corrige essa imprecisão. Essa precisão é fundamental para o cálculo do tempo de voo, especialmente ao utilizar técnicas no domínio do tempo, que dependem da exatidão na identificação dos picos.

Sem a utilização de métodos para melhorar a resolução dos sinais, o valor obtido

para o Δt foi de $13,372 \mu s$. Com a aplicação de interpolação, o resultado foi de $13,373 \mu s$, enquanto o uso da envoltória dos sinais resultou em $13,370 \mu s$.

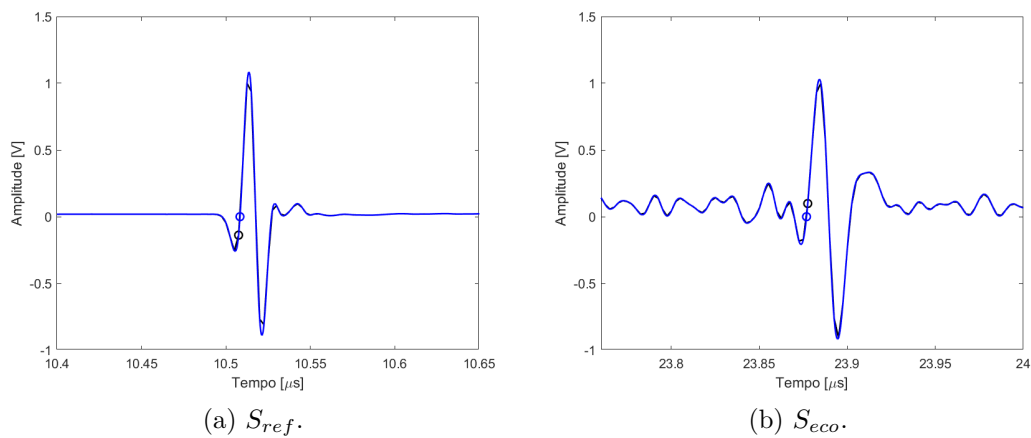
3.2.2 Cruzamento com Zero

Para calcular o tempo de voo utilizando a técnica de cruzamento com zero, é necessário, inicialmente, identificar em ambos os sinais o mesmo ponto de cruzamento com zero para realizar o cálculo. O ponto de cruzamento escolhido foi o instante em que o sinal atravessa o eixo $y = 0$ pela primeira vez após o início da forma de onda significativa. Portanto, para calcular o tempo de voo, é necessário identificar os pontos dos sinais mais próximos de zero e subtrair os tempos de atraso correspondentes a esses pontos.

Assim como na técnica de detecção de picos, a interpolação também favorece o método de cruzamento com zero, pois a melhoria na resolução do sinal amplia a precisão na detecção do ponto de cruzamento. A transformada de Hilbert, por outro lado, não é utilizada, pois os seus valores são sempre positivos, logo não há como detectar o ponto de cruzamento.

Os resultados obtidos utilizando este método são apresentados na Figura 11. As Figuras 11(a) e 11(b) mostram os sinais original, em preto, interpolados, em azul, e os pontos referentes ao cruzamento com zero para os sinais original e interpolado. É possível observar que o ponto de cruzamento com zero do sinal original (círculo preto) está mais distante do eixo x do que o ponto de cruzamento com zero do sinal interpolado (círculo azul). Isso comprova que a interpolação melhora a resolução do sinal e, consequentemente, torna o método mais preciso.

Figura 11 – Cruzamento com zero. É mostrado o sinal interpolado (azul), assim como os pontos de cruzamento com zero do sinal original (círculo preto) e do sinal interpolado (círculo azul).



Fonte: Do autor.

Os resultados para o tempo de voo obtidos utilizando a técnica de cruzamento com zero foram de $13,370 \mu s$ para o sinal original e $13,368 \mu s$ para o sinal interpolado.

3.2.3 Correlação Cruzada

Para calcular o Δt entre dois sinais utilizando a técnica de correlação cruzada, segue-se o seguinte processo matemático: primeiramente, calcula-se a correlação cruzada entre o sinal de referência (S_{ref}) e o sinal de eco (S_{eco}). A correlação cruzada permite identificar a similaridade entre os sinais em diferentes atrasos temporais. Em seguida, é necessário encontrar o valor máximo absoluto dessa correlação, que indica o ponto de maior similaridade entre os dois sinais. A partir da posição desse valor máximo, calcula-se o atraso entre os sinais, medido em número de amostras.

Essa diferença em número de amostras é, então, convertida em uma diferença de tempo real, multiplicando pelo período de amostragem dos sinais (dt). Dessa forma, obtém-se o atraso de tempo entre o sinal de referência e o sinal de eco em segundos.

Finalmente, é necessário ajustar esse atraso considerando o instante inicial de captura de cada sinal. Para isso, subtraem-se os tempos de início de aquisição de S_{ref} e S_{eco} , conforme mostra a equação

$$\Delta t = \Delta n \times dt + (t_{eco,ini} - t_{sref,ini}), \quad (3.1)$$

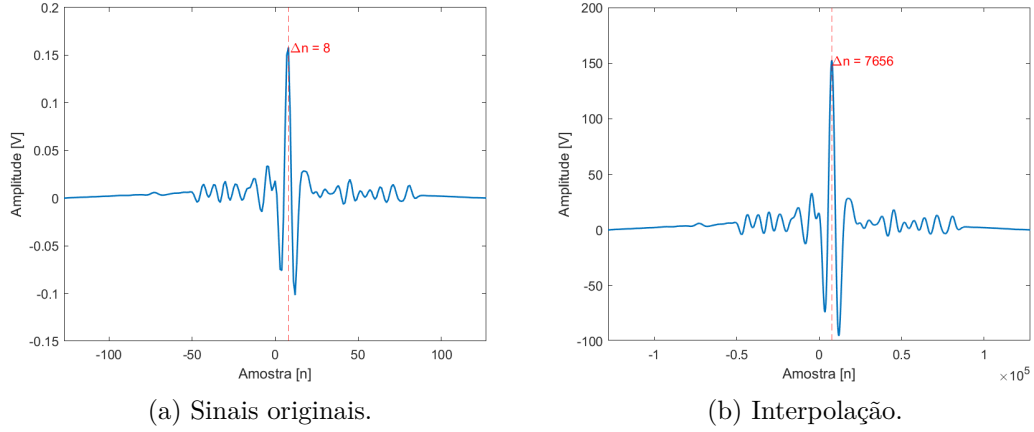
em que Δn representa a amostra correspondente ao pico da correlação cruzada, dt é a frequência de amostragem, e $t_{eco,ini}$ e $t_{sref,ini}$ correspondem aos tempos iniciais dos sinais S_{eco} e S_{ref} , respectivamente.

Para aumentar a precisão do cálculo, para esta técnica também foi utilizada o método de interpolação, que melhora a resolução temporal dos sinais expandindo o número de amostras, permitindo calcular o Δt com mais precisão. Os sinais originais possuem 128 amostras e após a interpolação passaram a ter 128000 pontos.

A Figura 12 apresenta os sinais resultantes da correlação cruzada para os sinais originais e após aplicar a técnica de interpolação, sendo que o ponto de maior similaridade entre os sinais foi destacado com uma linha pontilhada, correspondendo à amostra $\Delta n = 8$ para os sinais originais e $\Delta n = 7656$ para os sinais interpolados. Esses valores demonstram porque a técnica de interpolação é fundamental, pois aumenta a resolução temporal dos sinais, permitindo uma análise mais precisa. Ao dividir o valor de 7656 por mil, que foi o valor utilizado para interpolar os sinais, obtém-se 7,656, que seria um valor de amostra mais apropriado para representar o ponto de maior similaridade. Assim, a interpolação suaviza o sinal, permitindo encontrar pontos intermediários entre as amostras, o que leva a um resultado mais preciso na estimativa do Δt .

Considerando a frequência de amostragem de 400 MHz dos sinais analisados e os tempos iniciais $t_{eco,ini}$ e $t_{sref,ini}$ sendo 23,75 μs e 10,4 μs , respectivamente, o Δt calculado utilizando a técnica de correlação cruzada foi de 13,372 μs tanto para os sinais originais quanto para os sinais interpolados. O fato de os resultados serem idênticos sugere que, embora a interpolação melhore a resolução do sinal, devido às limitações do hardware, sua contribuição não é tão crucial para a técnica de correlação cruzada. No entanto, a

Figura 12 – Técnica de correlação cruzada. São mostrados os sinais resultantes da correlação cruzada entre S_{ref} e S_{eco} utilizando (a) os sinais originais e (b) sinais interpolados.



Fonte: Do autor.

interpolação se mostra mais relevante em métodos que dependem da detecção de picos ou cruzamento por zero. Isso evidencia a robustez da correlação cruzada, que permanece eficaz mesmo com a menor resolução dos sinais analisados.

3.2.4 Fase Espectral

Conforme mencionado anteriormente, a técnica de fase espectral é utilizada para obter o gráfico do tempo de voo em função da frequência. O procedimento para o cálculo utilizando essa técnica foi o seguinte: primeiramente, calcularam-se as FFTs dos sinais S_{ref} e S_{eco} . Em seguida, foram determinados os vetores de fase desses sinais, que foram então subtraídos. O vetor resultante foi dividido por $2\pi f$ para calcular o tempo de voo. Finalmente, este vetor de tempo de voo foi ajustado para compensar o tempo inicial de aquisição dos sinais. Isso foi feito somando o vetor de tempo de voo obtido anteriormente com a diferença entre os tempos de aquisição de S_{eco} e S_{ref} . Assim, obteve-se o vetor de tempo de voo, que pode ser plotado em função da frequência. Este procedimento é ilustrado na equação

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f} \cdot (\phi_{sref} - \phi_{eco}) + (t_{eco,ini} - t_{sref,ini}), \quad (3.2)$$

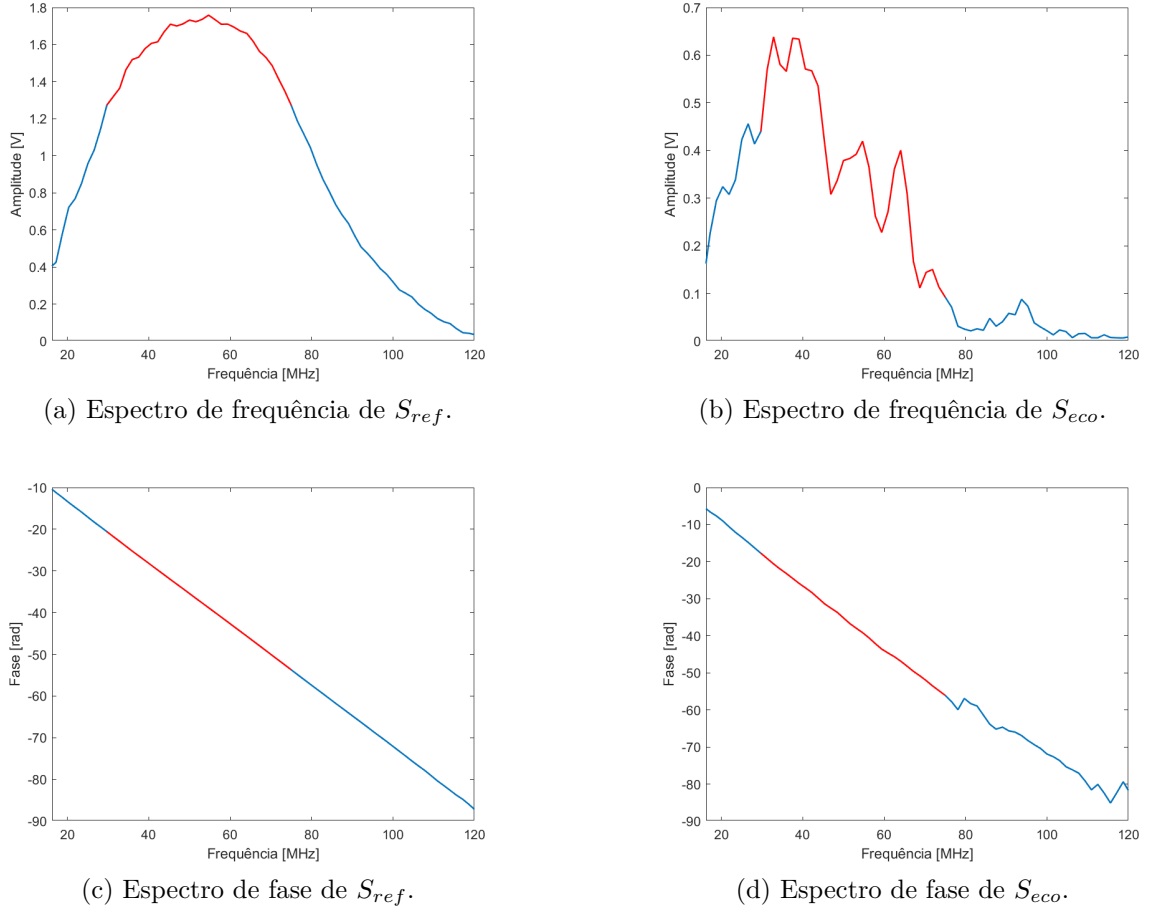
em que ϕ_{sref} e ϕ_{eco} representam as fases dos sinais S_{sref} e S_{eco} , respectivamente.

Conforme dito anteriormente, banda espectral dos transdutores utilizados por Tiago (2018) para a aquisição dos sinais analisados neste teste possui uma frequência central de 75 MHz e uma largura de banda de 58,8 MHz a meia potência (-6 dB). Logo, essa faixa de frequências deve receber uma atenção especial durante as análises dos resultados.

A Figura 13 apresenta os espectros de frequência e fase dos sinais utilizados no cálculo do Δt por meio da análise de fase espectral. Os trechos dos sinais destacados em

vermelho correspondem à faixa de frequências referente à largura de banda dos transdutores mencionado anteriormente, sendo especificamente entre 30 MHz e 75 MHz.

Figura 13 – Representação dos sinais S_{ref} e S_{eco} no domínio da frequência, com suas respectivas fases para ilustrar a técnica de fase espectral.

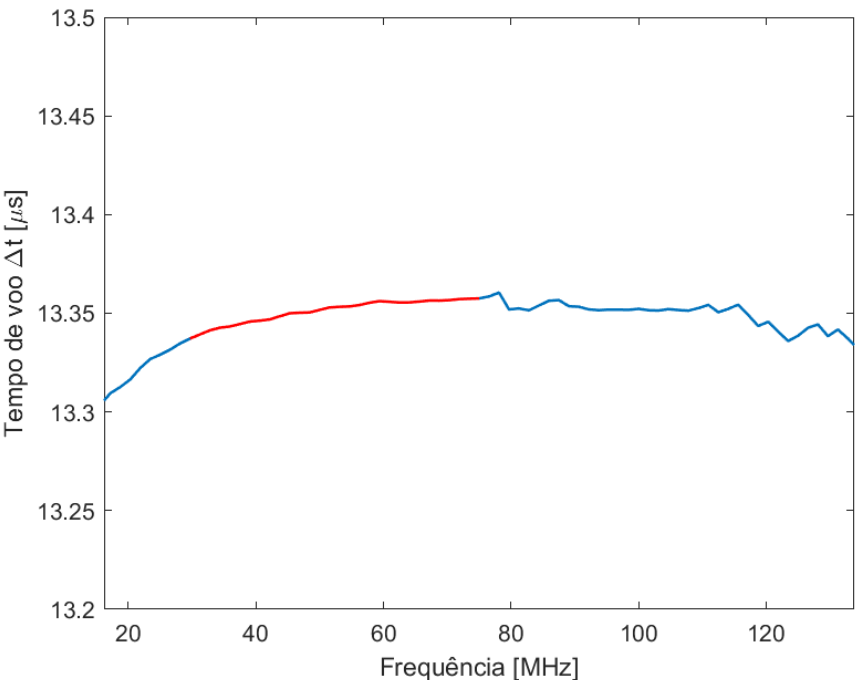


Fonte: Do autor.

Conforme dito anteriormente, a técnica de fase espectral para calcular Δt é bastante vantajosa pois a fase de um sinal em diferentes frequências tende a ser mais robusta do que a amplitude. A Figura 13(b) mostra que, na faixa de frequências destacada, o espectro de frequências de S_{eco} se tornou bastante ruidoso após a propagação em relação ao espectro de S_{ref} , mostrado na Figura 13(a). Contudo, a Figura 13(d) comprova que a fase tende a permanecer estável ao longo das frequências de interesse, o que permite uma estimativa de Δt mais precisa, mesmo com sinais corrompidos por ruído.

A Figura 14 apresenta o resultado do teste de fase espectral. Nota-se que o gráfico obtido para o tempo de voo é aproximadamente constante, conforme o esperado para a água, pois trata-se de um meio homogêneo e isotrópico cuja velocidade do som é praticamente constante em uma faixa de frequências. .

Figura 14 – Tempo de voo (Δt) da água em função da frequência obtido utilizando a técnica de fase espectral.



Fonte: Do autor.

3.2.5 Comparação dos Métodos de Cálculo do Tempo de Voo

A Tabela 2 apresenta uma comparação dos tempos de voo obtidos utilizando diferentes métodos de análise. Cada técnica tem suas particularidades, e os resultados mostram como a interpolação e o uso da envoltória influenciam a precisão da medição.

Tabela 2 – Comparação dos tempos de voo obtidos por diferentes métodos.

Método	Sinal original [μs]	Interpolação [μs]	Envoltória [μs]
D. de picos	13,373	13,372	13,370
C. com zero	13,370	13,368	-
C. cruzada	13,373	13,372	-
Fase espectral	Vide Figura 14		

Fonte: Do autor.

Os resultados mostram que a técnica de Detecção de Picos identificou os tempos de voo com uma precisão ligeiramente melhorada quando a interpolação foi aplicada. O valor do tempo de voo com a interpolação (13,372 μs) foi muito próximo, mas ligeiramente inferior, ao obtido com o sinal original (13,373 μs), e a utilização da envoltória resultou em um valor de (13,370 μs).

Na técnica de Cruzamento com Zero, a interpolação resultou em uma leve diminuição do tempo de voo (13,368 μs em comparação com 13,370 μs no sinal original). Isso

ocorre porque a interpolação aumenta a resolução temporal, permitindo uma detecção mais precisa do ponto exato de cruzamento do sinal com o eixo zero.

O método de Correlação Cruzada mostrou uma pequena diferença entre o tempo de voo obtido com o sinal original ($13,373 \mu\text{s}$) e o sinal interpolado ($13,372 \mu\text{s}$). Isso indica que, embora a interpolação possa melhorar a precisão, o sinal original já tinha resolução suficiente para esse tipo de análise, resultando em uma diferença mínima.

Por fim, a técnica de Fase Espectral não produz um valor único de tempo de voo, mas sim uma relação entre o tempo de voo e a frequência, como mostrado na Figura 14. A linearidade observada para a água sugere que a técnica é adequada para a faixa de frequências destacada e que pode ser utilizada para analisar a dispersão da velocidade em diferentes meios.

As técnicas de correlação cruzada e fase espectral foram escolhidas para serem utilizadas neste trabalho devido à sua maior robustez em relação aos efeitos de atenuação, ruídos acústicos e elétricos. Em sistemas onde o sinal acústico atravessa múltiplas camadas, as interferências construtivas e destrutivas, juntamente com os ruídos elétricos gerados pelo sistema de medição, podem degradar significativamente o sinal. Isso compromete a precisão de métodos que dependem da resolução temporal, como a detecção de picos e o cruzamento com zero, tornando-os menos confiáveis. Além disso, a atenuação natural do sinal ao se propagar em diferentes meios dificulta ainda mais a análise. A correlação cruzada, ao avaliar a similaridade dos sinais, e a fase espectral, que usa informações de fase estáveis mesmo em ambientes ruidosos, são menos suscetíveis a esses efeitos. Essas características tornam essas técnicas mais confiáveis, garantindo maior precisão no cálculo do Δt .

4 Sistema de Baixa Frequência

Com o objetivo de desenvolver um método não invasivo de medição de temperatura para uma célula de medição ultrassônica, foi construído, neste trabalho, um sistema de baixa frequência, semelhante ao sistema de alta frequência apresentado anteriormente, diferenciando-se principalmente pela frequência central dos transdutores utilizados. Também foram utilizadas diferentes ferramentas matemáticas para auxiliar na construção da célula de medição e para permitir a medição de temperatura do líquido no interior da célula de forma indireta.

Diversas ferramentas matemáticas foram empregadas para auxiliar na construção da célula de medição e possibilitar a estimação indireta da temperatura do líquido em seu interior, a partir de sinais acústicos. O desenvolvimento foi dividido em duas etapas principais.

Na primeira etapa, é apresentada uma visão geral do sistema de baixa frequência, destacando suas principais características e o modelo acústico utilizado como ferramenta de apoio na concepção da célula. Em seguida, são descritos os procedimentos adotados para o controle dos instrumentos de bancada, bem como o desenvolvimento de uma interface gráfica para monitoramento em tempo real dos sinais adquiridos.

Na segunda etapa, os sistemas acústico e térmico foram integrados com o intuito de estimar a temperatura da amostra líquida de forma não invasiva. As medições obtidas a partir da análise dos sinais ultrassônicos são comparadas com as estimativas fornecidas por meio da aplicação do EKF, utilizando um modelo não linear do sistema térmico da célula.

4.1 Visão geral do sistema de baixa frequência

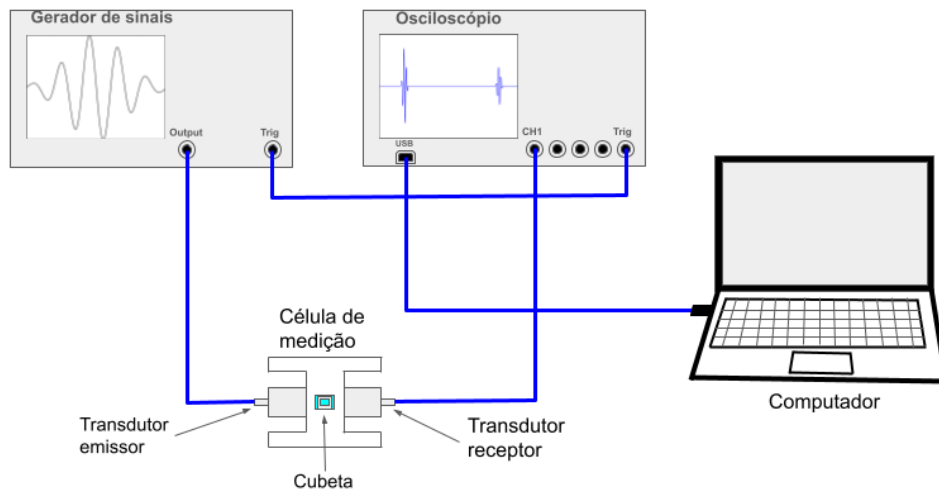
Semelhante ao sistema de alta frequência, o sistema de baixa frequência desenvolvido neste trabalho utiliza transdutores no modo transmissão-recepção, operando com uma frequência central de 10 MHz. Além disso, será implementado um novo método de medição de temperatura, baseado em sinais ultrassônicos, para garantir a estabilidade térmica durante a caracterização dos líquidos. O controle de temperatura também será realizado por meio de células Peltier acopladas à célula de medição. Para controlar o aquecimento ou resfriamento das células Peltier, será utilizado um circuito inversor do tipo ponte H, que, por sua vez, será controlado por sinais de Modulação por Largura de Pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), enviados por um microcontrolador.

Nos testes iniciais com a célula de medição, foi utilizado um gerador de sinais para excitar o transdutor emissor. Para isso, foi sintetizado no Matlab um sinal pulsado, combinando uma senoide de 10 V de amplitude, 5 ciclos e 10 MHz com uma função

gaussiana. Em seguida, foi utilizada uma função para transformar o sinal sintetizado no formato TFS, compatível com o gerador de sinais. Finalmente, o sinal foi enviado via USB para o gerador de sinais, para ser utilizado experimentalmente.

Além disso, foi utilizado um osciloscópio, que em conjunto com um computador, permitiu a aquisição e processamento dos sinais captados pelo transdutor receptor. A Figura 15 ilustra o o arranjo experimental do sistema de baixa frequência, onde é mostrado a vista superior da célula de medição em conjunto com os equipamentos de bancada utilizados.

Figura 15 – Representação do arranjo experimental do sistema de baixa frequência.



Fonte: Do autor.

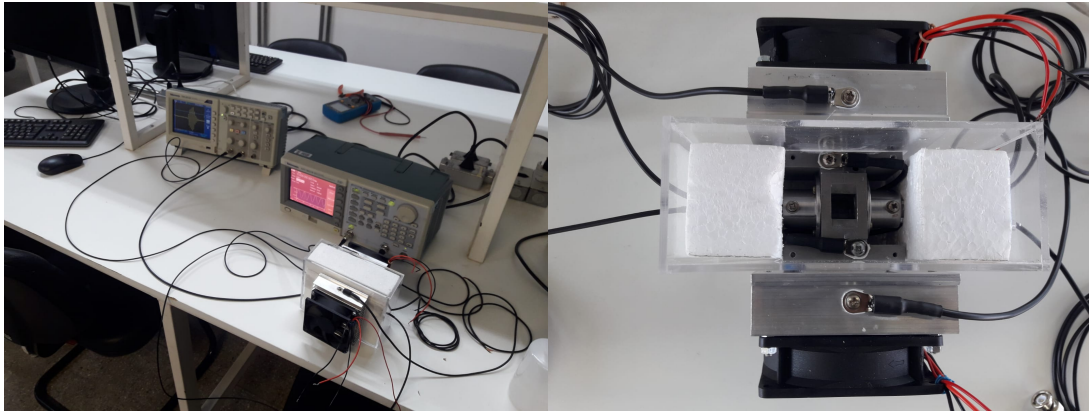
Este mesmo arranjo experimental pode ser observado na Figura 16, que apresenta uma visão ampla do sistema de baixa frequência implementado, assim como uma vista superior da célula de medição. Nessa imagem, é possível visualizar o orifício onde pode ser encaixada a cubeta com o líquido de interesse para sua caracterização.

Também é possível visualizar as células Peltier acopladas à célula de medição, os *coolers* responsáveis pelo resfriamento desses dispositivos, e os sensores digitais posicionados para monitorar a temperatura. No entanto, durante a realização dos testes iniciais, o sistema de controle de temperatura ainda não estava em funcionamento.

4.2 Modelo acústico

Para validar e otimizar o desenvolvimento do novo sistema de caracterização de líquidos, o uso de um modelo acústico é fundamental. Esse modelo permite avaliar o desempenho da célula de medição construída, levando em conta suas características físicas, como os materiais utilizados e suas respectivas espessuras. Ao descrever o comportamento dos sinais acústicos recebidos pelo transdutor, o modelo possibilita ajustes, como a espessura da camada de acoplamento entre os transdutores e a cubeta, por exemplo. Dessa

Figura 16 – Fotos do arranjo experimental do sistema de baixa frequência.



(a) Conexões realizadas entre a célula de medição, osciloscópio e gerador de sinais.

(b) Vista superior da célula de medição.

Fonte: Do autor.

forma, garante-se que cada sinal recebido pelo transdutor esteja devidamente isolado de sinais subsequentes, evitando interferências, o que facilita a análise e assegura a precisão das medições acústicas.

As especificações construtivas dos transdutores utilizados neste trabalho não são conhecidas, pois os fabricantes se recusam a fornecer essas informações. Diante dessa limitação, o modelo de camadas TMM foi escolhido para ser utilizado, pois ele dispensa a necessidade de se conhecer com exatidão as características dos transdutores, focando em calcular a transmissão e reflexão de sinais acústicos em diferentes meios, levando em consideração as propriedades físicas de cada camada, como densidade, espessura e velocidade do som.

Para realizar os testes iniciais com o modelo, algumas simplificações precisaram ser feitas devido a limitações no hardware do sistema, que ainda estava em desenvolvimento. O controle de temperatura ainda não havia sido implementado, a estrutura de isolamento térmica da célula ainda estava sendo construída e a distância entre os transdutores ainda não havia sido definida com precisão. Devido a essas limitações, optou-se por realizar os testes iniciais com uma única camada de água, um meio com propriedades bem estabelecidas na literatura, como a velocidade de propagação do som, densidade e coeficiente de atenuação. Reduzindo o sistema a uma camada de água, minimizam-se os erros de medição, possibilitando uma comparação mais precisa entre os sinais simulados pelo modelo e os sinais adquiridos experimentalmente.

Portanto, nesta sessão, será discutido a implementação do modelo TMM no Matlab, visando utilizar esta ferramenta de forma auxiliar na construção da célula de medição e será discutido a realização dos testes iniciais utilizando uma única camada de água, para verificar o funcionamento do mesmo.

4.2.0.1 Descrição do Modelo Implementado

Para implementar o modelo TMM no Matlab é necessário construir uma matriz de transferência para cada camada física pela qual o sinal acústico se propaga entre os transdutores. Para a construção da matriz, é necessário conhecer algumas propriedades físicas referente a cada camada, como a velocidade de propagação do sinal acústico (c), a densidade (ρ) e o coeficiente de atenuação (α). Com base nessas propriedades, é possível calcular a impedância acústica no material (Z) utilizando a Equação (2.6) e o número de onda (k) utilizando a Equação (2.14), parâmetros essenciais para a construção da matriz referente a cada camada, conforme mostra a equação (2.27).

Ao construir a matriz de cada camada, é necessário utilizar a equação (2.30) para construir a matriz equivalente de toda a estrutura por onde o sinal acústico se propaga. Por fim, utilizando os elementos da matriz de transferência total da estrutura, calcula-se o vetor de coeficientes de transmissão do sistema através da equação (2.51). Esses coeficientes de transmissão são utilizados para gerar os sinais esperados no transdutor.

Para o modelo ser capaz de gerar os sinais referentes à propagação do sinal acústico pela camada de água, é utilizado um sinal de referência, que neste trabalho será tratado como sinal de entrada do modelo ($s_{in}(t)$). Por meio deste sinal de entrada, ele retorna o sinal desejado na saída aplicando-se um processo matemático que será descrito a seguir.

Primeiramente, o sinal de entrada ($s_{in}(t)$), é passado para o domínio da frequência, por meio da transformada de Fourier, como

$$S_{in}(f) = \mathcal{F}\{s_{in}(t)\}, \quad (4.1)$$

em que $s_{in}(t)$ corresponde ao sinal de entrada no domínio do tempo e $S_{in}(f)$ corresponde ao mesmo sinal no domínio da frequência. Na sequência, o coeficiente de transmissão calculado anteriormente, $T_{ref}(f)$, é multiplicado ao sinal $S_{in}(f)$, de forma que o espectro do sinal após a propagação pela água é dado por

$$S_{\text{água}}(f) = T_{ref}(f) \cdot S_{in}(f), \quad (4.2)$$

em que $S_{\text{água}}(f)$ corresponde ao espectro do sinal após a propagação. Finalmente, para retornar o sinal resultante ao domínio do tempo, é aplicada a transformada inversa de Fourier, obtendo o sinal recebido pelo transdutor, como

$$s_{\text{água}}(t) = \mathcal{F}^{-1}\{S_{\text{água}}(f)\} = \mathcal{F}^{-1}\{T_{ref}(f) \cdot S_{ref}(f)\}, \quad (4.3)$$

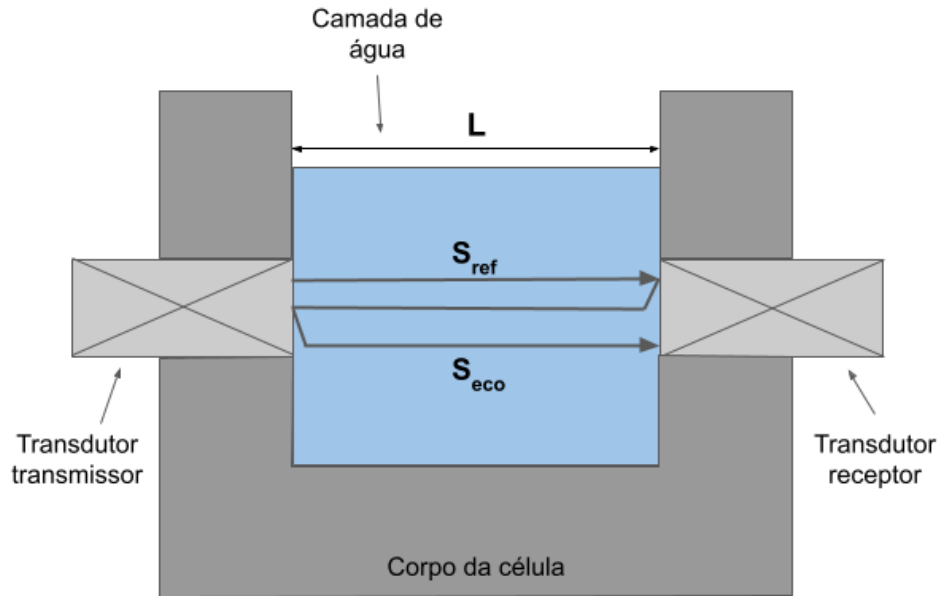
sendo $s_{\text{água}}(t)$ o sinal no domínio do tempo que representa o sinal recebido pelo transdutor após a propagação por uma camada de água.

4.2.1 Testes iniciais com o modelo

Após a implementação do modelo, foram feitos testes iniciais para validar o seu funcionamento. Conforme dito anteriormente, o sistema de teste do modelo é composto

por uma única camada de água. Este sistema é ilustrado na Figura 17, onde também são apresentados os sinais acústicos simulados através do modelo.

Figura 17 – Vista em corte da célula de medição com uma camada de água.



Fonte: Do autor.

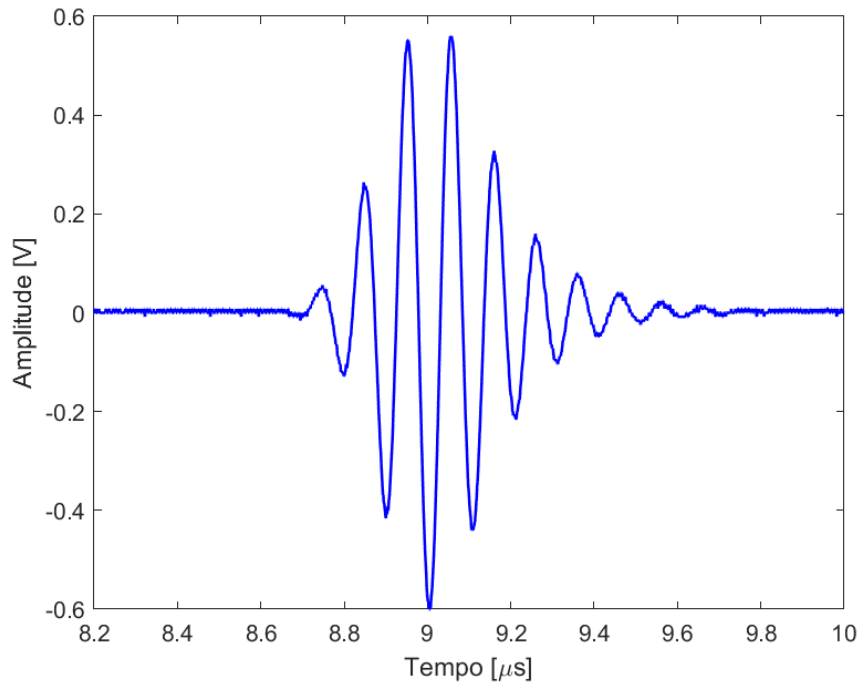
Inicialmente, foram definidas as propriedades físicas da água. Foi definida uma velocidade do som (c) de $1496,70 \text{ m/s}$, que corresponde a uma temperatura de 25°C , segundo a equação (2.4) descrito anteriormente. Também foram definidas uma densidade (ρ) de $997,04 \text{ kg/m}^3$ e um coeficiente de atenuação (α) de $2,16 \times 10^{-14} \text{ Np/m}$. Em seguida, foi definida uma espessura de $13,2 \text{ mm}$ para a camada de água, que corresponde à distância entre os dois transdutores. Na sequência, foi construída a matriz de transferência da camada de água, que, por ser a única neste teste inicial, corresponde à matriz equivalente do sistema. Por fim, foi calculado o vetor de coeficientes de transmissão para esse sistema utilizando os coeficientes da matriz equivalente.

Como sinal de entrada, utilizou-se o sinal S_{ref} recebido pelo transdutor no ensaio experimental com a célula de medição, que será discutido posteriormente. Para gerar este sinal de entrada, mostrado na Figura 18, foi utilizado o arranjo experimental mostrado na Figura 15, onde a célula de medição foi preenchido com uma camada de água.

Na sequência, realizando o processo matemático descrito anteriormente, foi obtido o sinal $s_{agua}(t)$ referente à propagação acústica pela camada de água. O sinal obtido neste primeiro teste com o modelo acústico é mostrado na Figura 19, onde são destacados o primeiro sinal recebido pelo transdutor, S_{ref} , e o sinal de eco gerado após se refletir uma vez no transdutor receptor, S_{eco} .

Nota-se que os sinais gerados são similares ao sinal de entrada do modelo, sendo que estes diferenciam-se apenas nas amplitudes, que são reduzidas devido à atenuação

Figura 18 – Sinal de entrada utilizado para testar o modelo acústico.



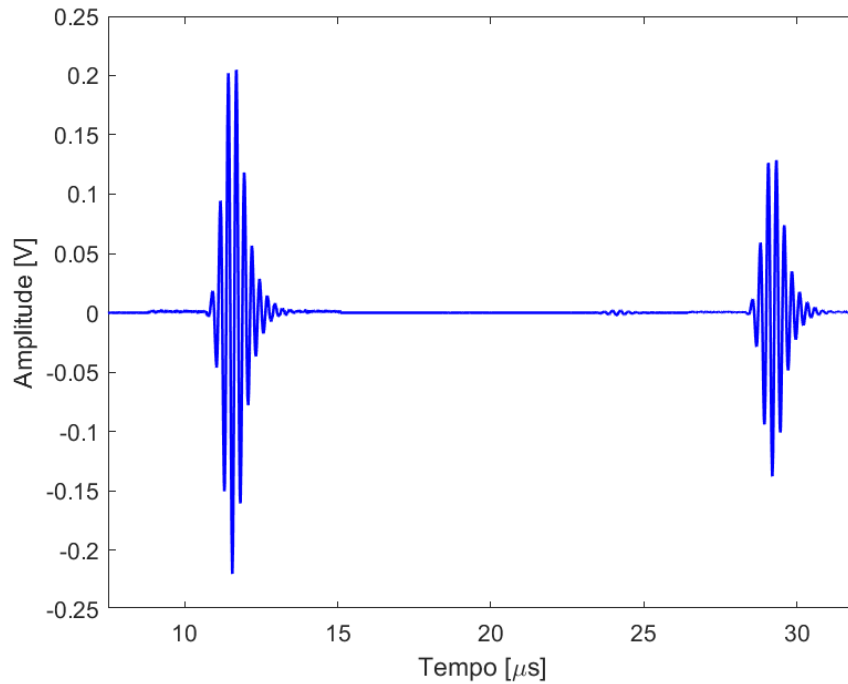
Fonte: Do autor.

causada pela propagação na água e pelas reflexões nos transdutores. Enquanto o sinal de entrada possui uma amplitude de aproximadamente 0,6 V, os sinais S_{ref} e S_{eco} apresentam amplitudes de 0,2 V e 0,12 V, respectivamente. Além disso, o modelo fornece os atrasos dos sinais, ou seja, o tempo de propagação dos sinais pela camada de água. Para o sinal S_{ref} , o modelo indicou um atraso de aproximadamente $8,82 \mu s$, enquanto para o sinal S_{eco} o atraso foi de aproximadamente $26,45 \mu s$. Utilizando a equação (2.3), foi possível calcular os atrasos esperados, e os valores obtidos coincidiram com os valores medidos, comprovando a precisão do modelo.

4.3 Controle dos instrumentos de bancada

Para realizar os testes iniciais com a célula de medição construída, foi necessário implementar códigos no MATLAB para adquirir os sinais em tempo real. Essa implementação teve como objetivo capturar os sinais automaticamente com a melhor resolução possível, exibindo-os em uma janela gráfica para que o operador pudesse monitorar os resultados dos testes em tempo real. Para isso, foram utilizados os comandos do protocolo SCPI, conforme descrito no manual Tektronix (2006) para controlar o osciloscópio da série TDS2000. Esses comandos permitiram o controle automático das funções do osciloscópio, como o ajuste de escala, configuração de *trigger* e aquisição dos sinais. Portanto, nesta sessão serão discutidos os procedimentos realizados para controlar os instrumentos

Figura 19 – Sinais S_{ref} e S_{eco} gerados pelo modelo acústico para uma camada de água.



Fonte: Do autor.

de bancada, ilustrados na Figura 15.

4.3.1 Configurações Iniciais do Osciloscópio

Antes de iniciar a aquisição dos sinais durante os experimentos, é essencial realizar algumas configurações iniciais no osciloscópio. Essas configurações garantem que o equipamento capture os sinais com a resolução adequada, minimizando interferências e ruídos que possam comprometer a qualidade dos dados. Para facilitar e automatizar esse processo, foi desenvolvido um código em Matlab, permitindo a configuração remota do osciloscópio. Dessa forma, as medições podem ser realizadas corretamente e de forma consistente, independentemente da situação.

Para realizar as configurações, primeiramente foi necessário estabelecer uma comunicação entre o osciloscópio e o computador por meio de um cabo USB. Utilizou-se o *software* Keysight e o *instrument control toolbox* do Matlab para garantir a comunicação entre os instrumentos. Uma vez estabelecida a comunicação, o primeiro passo foi redefinir o osciloscópio para suas configurações de fábrica. Isso assegurou que todas as medições partam de uma base comum, sem influências de ajustes anteriores. Além disso, foi feita uma limpeza no *buffer* de eventos do osciloscópio, eliminando qualquer erro ou estado anterior que pudesse interferir nas novas medições.

Em seguida, foram configurados os parâmetros de *trigger*, um mecanismo que faz o osciloscópio começar a capturar um sinal quando uma certa condição é atendida, como

quando o sinal sobe de um valor baixo para um alto. A fonte de *trigger* foi definida como externa, pois o sinal que iniciaria a captura viria de um gerador de sinais. O *trigger* foi configurado para ocorrer na borda de subida do sinal, ou seja, quando o sinal passar de um nível baixo para um nível alto. O modo de *trigger* foi ajustado para “normal”, garantindo que o osciloscópio só inicie a captura de novos sinais quando um evento válido for detectado.

As configurações de aquisição também foram cuidadosamente ajustadas. O modo de aquisição foi definido como média, para que o osciloscópio calculasse a média de várias amostras, reduzindo ruídos e aumentando a precisão dos dados. Especificamente, foi configurado que o osciloscópio utilizaria a média de quatro amostras, resultando em uma medição mais estável e confiável.

A aquisição dos sinais foi realizada no canal 1 do osciloscópio, e a escala inicial de tensão para esse canal foi ajustada para 1 volt por divisão (1V/div).

Para manter a consistência nas medições, o período de amostragem foi fixado para todas as aquisições. Sabendo que a tela do osciloscópio possui 10 divisões horizontais e que o sinal capturado tem 2500 pontos no total, foi utilizado um comando para consultar a escala horizontal do osciloscópio, que define o tempo por divisão. O valor retornado foi então dividido por 250, o que corresponde ao número de pontos por divisão. Dessa forma, o período de amostragem do sinal foi salvo em uma variável para uso posterior nas análises.

4.3.2 Aquisição Contínua e Armazenamento de Sinais

Após as configurações iniciais do osciloscópio, foram criados vetores de 2500 pontos para armazenar as amostras de tempo e amplitude dos sinais. Também foram definidas variáveis para ajustar as posições iniciais dos sinais que seriam adquiridos, S_{ref} , S_{eco} assim como o primeiro eco recebido após o primeiro sinal, chamado de S_{agua} . Estas variáveis podem ser definidas manualmente, utilizando por exemplo os valores retornados pelo modelo de camadas apresentado anteriormente.

Dentro do laço principal do código foi realizada a aquisição contínua dos sinais, onde uma função é chamada repetidamente para ajustar a posição inicial de cada sinal no osciloscópio, sua amplitude e realizar a captura deste. Assim os sinais são atualizados de forma contínua no supervisorio criado.

4.3.3 Ajuste Automático de Visualização no Osciloscópio

Também foi desenvolvida uma função no Matlab para otimizar automaticamente a posição e a escala do sinal exibido no osciloscópio, garantindo uma visualização clara e precisa. Ela recebe como parâmetros de entrada a posição inicial do sinal, a variável de

comunicação com o osciloscópio e o período de amostragem previamente salvo durante as configurações iniciais e retorna os valores de tempo e amplitude dos sinais após o ajuste.

O funcionamento da função começa com a aquisição de um sinal inicial. A partir desse sinal, a função ajusta a posição do pico do sinal de modo que ele fique centralizado na tela do osciloscópio. Esse ajuste é feito verificando se o pico do sinal corresponde à amostra 1250, que é o ponto médio entre os 2500 pontos exibidos pelo osciloscópio. Caso o pico não esteja centralizado, a função corrige automaticamente a posição inicial do sinal.

A função ajusta ainda a amplitude do sinal, calculando o valor de pico a pico. Com base nisso, ajusta a escala vertical do osciloscópio, garantindo que o sinal seja exibido corretamente. A tela do osciloscópio possui 8 divisões verticais, e a função verifica se a amplitude do sinal excede os limites da tela. Se isso ocorrer, a escala é reduzida para assegurar que todo o sinal seja exibido de forma clara e completa.

4.4 Supervisório

Para permitir o monitoramento em tempo real dos sinais adquiridos pelo osciloscópio, foi desenvolvido um sistema de visualização gráfica no *software* MATLAB. O código implementado organiza uma figura com seis subgráficos (*subplots*), onde os sinais S_{ref} , S_{eco} , S_{agua} , o tempo de voo (Δt), a temperatura ambiente e a temperatura do líquido em análise são atualizados em tempo real. A estrutura de exibição foi desenhada de forma a facilitar o acompanhamento dos dados durante os experimentos.

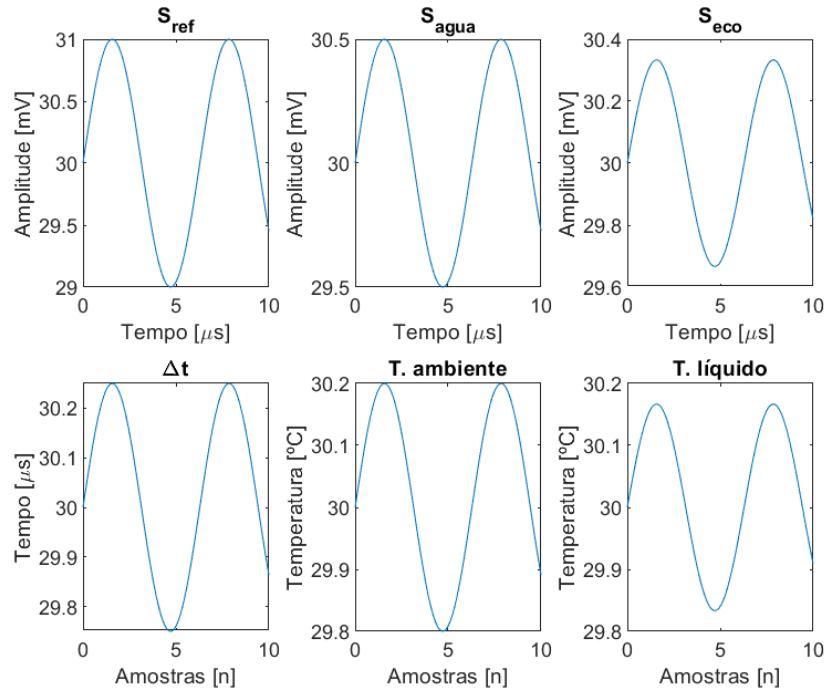
O supervisório consiste em uma matriz de 2 linhas e 3 colunas onde cada subgráfico é alocado em uma das seis posições da matriz. Para cada subgráfico, são inicializados os vetores de tempo e amplitude com zeros, e o gráfico é gerado vazio. Posteriormente, esses vetores são atualizados com os valores adquiridos em tempo real, permitindo que o operador monitore os sinais e variáveis de interesse durante o experimento. Dependendo da posição do subgráfico são definidos títulos específicos e os rótulos dos eixos através de uma estrutura condicional. A Figura 20 apresenta a interface criada. Os sinais mostrados nas subfiguras foram gerados no MATLAB apenas para ilustrar a utilização do supervisório.

4.5 Comparação entre modelo e sinais reais

Conforme dito anteriormente, os sinais adquiridos experimentalmente foram comparados com os sinais obtidos pelo modelo acústico implementado. Desta forma, pode-se verificar a funcionalidade de ambos.

Para comparar estes resultados dos testes iniciais, algumas considerações devem ser feitas sobre algumas limitações dos testes iniciais. Primeiramente, o TMM não leva em consideração possíveis desalinhamentos entre os transdutores na célula de medição, o que, na prática, pode causar alterações nos sinais adquiridos, resultando em discrepâncias em

Figura 20 – Supervisório criado para monitoramento dos sinais adquiridos no osciloscópio em tempo real.



Fonte: Do autor.

relação aos sinais simulados pelo modelo. Além disso, o modelo assume que a temperatura do líquido na célula de medição é constante e homogênea, contudo o sistema de controle de temperatura ainda não havia sido implementado. Outro ponto importante é que a distância entre os transdutores não foi definida com precisão nos testes experimentais, enquanto no modelo foi definida uma distância de 13,2 mm.

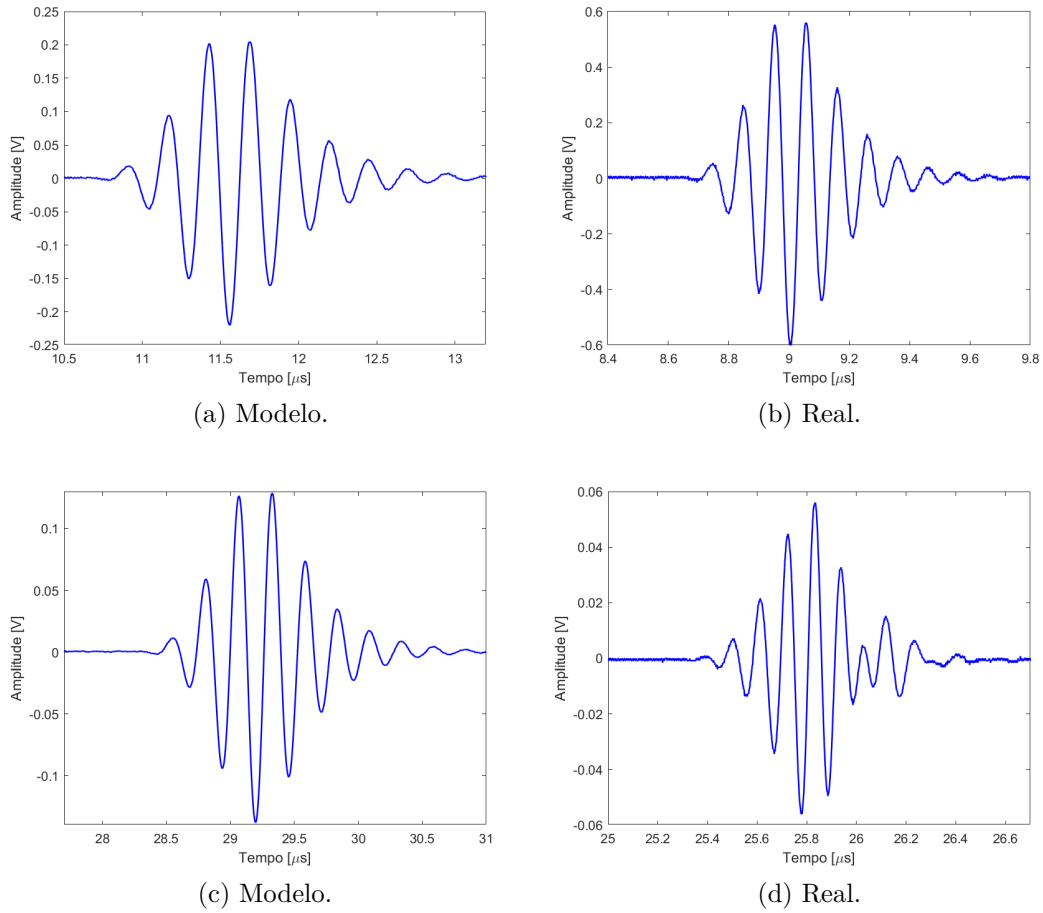
Os sinais adquiridos experimentalmente foram comparados com os sinais gerados pelo modelo acústico, conforme mostra a Figura 21. Os gráficos superiores mostram os sinais de referência (S_{ref}) do modelo teórico (à esquerda) e do sinal adquirido experimentalmente na célula (à direita). Os gráficos inferiores exibem os sinais de eco (S_{eco}) para o modelo (à esquerda) e para a célula (à direita).

A comparação entre os sinais obtidos experimentalmente e pelo modelo de camadas TMM pode ser realizada com base em três aspectos principais: as amplitudes, o tempo de atraso e o formato.

Em relação às amplitudes, os sinais experimentais possuem valores significativamente maiores, particularmente nos sinais de referência (S_{ref}). O sinal experimental atinge uma amplitude de cerca de 0,4 V, enquanto o modelo teórico alcança apenas 0,2 V. Nos sinais de eco (S_{eco}), também observa-se diferenças de amplitudes, com o sinal experimental apresentando uma amplitude em torno de 0,05 V, enquanto o modelo prevê uma amplitude de 0,12 V. Essas diferenças podem ter sido causadas pelos problemas de alinhamento.

Quanto ao tempo de atraso, há uma pequena variação entre os sinais experimentais

Figura 21 – Comparação entre os sinais simulados pelo modelo de camadas e os sinais experimentais. (a) S_{ref} gerado pelo modelo teórico. (b) S_{ref} obtido experimentalmente. (c) S_{eco} gerado pelo modelo teórico. (d) S_{eco} obtido experimentalmente.



Fonte: Do autor.

e os simulados. Os sinais experimentais estão ligeiramente deslocados para a direita em relação ao modelo, sendo esta diferença de aproximadamente de $2 \mu s$ para os sinais S_{ref} e $3 \mu s$ para os sinais S_{eco} . Essa discrepância pode ter sido causada pela falta de controle de temperatura no experimento e pela falta de precisão na espessura da camada de água no experimento.

Quanto ao formato dos sinais, percebe-se que os sinais obtidos experimentalmente são mais estreitos que os sinais gerados pelo modelo. Além disso, percebe-se na Figura 21(d) distorções causadas por problemas de alinhamento entre o transdutor e a superfície da cubeta.

4.6 Integração dos sistemas acústico e térmico para estimação de temperatura

Diferente da metodologia adotada na etapa anterior deste trabalho, na qual foram analisados os sinais acústicos obtidos experimentalmente e comparados aos resultados gerados por meio do modelo TMM, esta etapa tem como foco a análise térmica da célula de medição. Aqui, são integrados os sistemas acústico e térmico, permitindo realizar a medição indireta da temperatura da amostra a partir da velocidade de propagação do som, bem como a estimação da temperatura interna utilizando o EKF. Para isso, foram desenvolvidas placas de circuito impresso (PCB) dedicadas tanto à aquisição das temperaturas externas da célula de medição, quanto à geração do sinal do tipo *chirp* utilizado para excitar dinamicamente o sistema térmico.

4.6.1 Sistemas acústico e térmico

A Figura 22 apresenta os diagramas dos sistemas acústico e térmico utilizados nos ensaios. O sistema acústico emprega um gerador de sinais Tektronix AFG3021B para excitar o transdutor emissor com pulsos sintetizados no MATLAB. Esses sinais propagam-se pela camada de água e são captados pelo transdutor receptor, sendo transmitidos posteriormente ao osciloscópio Tektronix TDS2000. A aquisição é realizada remotamente via MATLAB, assegurando alta resolução.

No sistema térmico, um microcontrolador ESP32 gera sinais PWM para o controle de uma ponte H, responsável por acionar as células Peltier acopladas à célula de medição. A alimentação da ponte H é feita por uma fonte DC Tektronix PWS2323. As leituras de temperatura e corrente são adquiridas e enviadas a um computador para análise posterior.

A Figura 23 mostra a bancada experimental onde os sistemas de medição acústico e térmico foram montados. Nela, estão dispostos os equipamentos utilizados, como o gerador de sinais, osciloscópio, fonte de alimentação, computador, célula de medição e circuito eletrônico, ilustrando a integração dos componentes do sistema.

O controle do sistema térmico foi implementado por meio de um microcontrolador ESP32, responsável por gerar sinais PWM com frequência de 10 kHz e resolução de 12 bits para o acionamento da ponte H, a qual controla o sentido da corrente elétrica aplicada às células Peltier, permitindo tanto o aquecimento quanto o resfriamento da célula de medição. Para a realização dos testes de excitação dinâmica do sistema térmico, foi utilizado um sinal do tipo *chirp* para modular o sinal PWM.

O microcontrolador também aciona os *coolers* responsáveis pela dissipação de calor e monitora a corrente elétrica fornecida ao sistema. Para este monitoramento, utilizou-se o sensor de corrente de efeito Hall ACS712, com faixa de medição de ± 5 A e sensibilidade de 66 mV/A. O sinal analógico gerado pelo sensor é atenuado por um filtro passa-baixa,

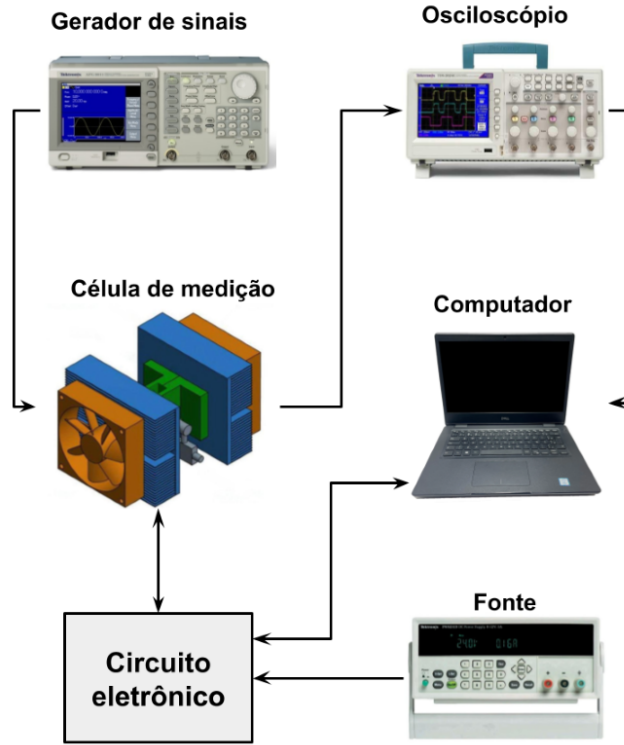


Figura 22 – Diagramas dos sistemas utilizados no experimento.

a fim de suprimir ruídos de alta frequência, e posteriormente digitalizado pelo conversor ADC ADS1115, que permite ajuste de ganho programável para maior resolução da leitura. Um display OLED foi integrado ao sistema para exibir, em tempo real, as temperaturas medidas durante os ensaios.

Para reduzir os efeitos de comutação e suavizar a corrente fornecida às células Peltier, foi implementado um filtro passa-baixa LC, composto por quatro indutores de $47\mu\text{H}$ em série e capacitores de $2,2\mu\text{F}$, com base em um arranjo descrito na literatura (Renesas Electronics Corporation, 2020).

4.6.2 Modelo não linear da célula Peltier

O modelo contínuo que representa o comportamento da célula Peltier é dado por (MIRONOVA et al., 2020):

$$\dot{T}_c(t) = \frac{\frac{1}{2}R_e i(t)^2 - ST_c(t)i(t) + K(T_h(t) - T_c(t))}{m_a c_a}, \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_h(t) = \frac{1}{m_k c_k} & \left[\frac{1}{2}R_e i(t)^2 + ST_h(t)i(t) - K_k(T_h(t) - T_a) \right. \\ & \left. - K(T_h(t) - T_c(t)) \right], \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\dot{R}_e(t) = K_R(\dot{T}_h(t) - \dot{T}_c(t)), \quad (4.6)$$

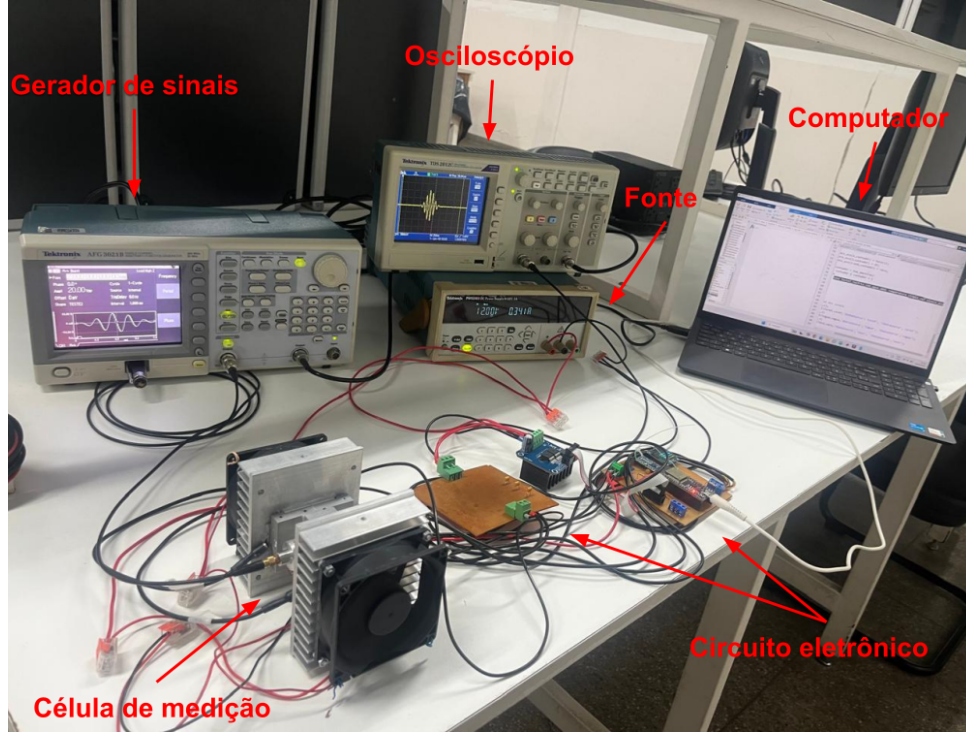


Figura 23 – Configuração experimental dos sistemas de medição acústico e térmico.

em que $T_c(t)$ e $T_h(t)$ são as temperaturas nas faces fria e quente da célula Peltier, respectivamente, $R_e(t)$ é a resistência elétrica da célula, dependente da temperatura, $i(t)$ é a corrente elétrica aplicada, S é o coeficiente de Seebeck, T_a é a temperatura ambiente, assumida constante, m_a é a massa do bloco de medição, m_k é a massa do dissipador, c_a e c_k são os calores específicos das respectivas massas, K_k é o coeficiente de potência de resfriamento do dissipador de calor, K é um parâmetro que quantifica a transferência térmica interna entre as faces quente e fria da célula, e K_R é o coeficiente de proporcionalidade que relaciona a variação da resistência com a diferença entre as taxas de variação das temperaturas. Para discretizar esse modelo, utiliza-se o método de Euler. Os detalhes do modelo discreto não são apresentados neste trabalho, mas podem ser encontrados em (MIRONOVA et al., 2020).

4.6.3 Estimação de estados

Considera-se o sistema dinâmico não linear em tempo discreto descrito por

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}, k-1), \quad (4.7)$$

$$y_k = h(x_k, \nu_k, k), \quad (4.8)$$

em que $x_k \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^n$ é o modelo de processo e $h : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^m$ é o modelo de observação. As entradas são dadas por $u_k \in \mathbb{R}^p$ e o vetor de medições é dado por $y_k \in \mathbb{R}^m$. Assume-se que o ruído de processo $w_k \in \mathbb{R}^q$ e o

ruído de medição $\nu_k \in \mathbb{R}^r$ sejam variáveis aleatórias brancas, de média nula e mutuamente independentes, com matrizes de covariância Q_{k-1} e R_k , respectivamente.

Sob uma perspectiva Bayesiana, o problema de estimação de estados visa à estimação da função densidade de probabilidade (PDF) *a posteriori* de x_k a partir de um conjunto de medições ruidosas $y_{1:k} = \{y_1, \dots, y_k\}$. Essa PDF pode ser descrita como $J(x_k) = \rho(x_k|y_{1:k})$, cujo maximizador $\hat{x}_k$ de J é a estimativa de estados ótima.

A solução para o problema de estimação de estados para sistemas não lineares, (4.7) e (4.8), considera o que a PDF marginal *a posteriori* $p(x_k|y_{1:k})$ não pode ser completamente caracterizada por sua média $\hat{x}_k$ e covariância P_k^{xx} , pois não é gaussiana (DAUM, 2005). Dessa forma, empregam-se algoritmos subótimos para contornar esse problema como o EKF (MAYBECK, 1979) e o filtro de Kalman *unscented* (UKF, do inglês *Unscented Kalman Filter*) (JULIER; UHLMANN; DURRANT-WHYTE, 2000).

4.6.3.1 Filtro de Kalman Estendido

O EKF é usado para estimar os estados de um sistema dinâmico não linear de forma recursiva. O cerne do EKF está na linearização do modelo dinâmico do sistema, para que as equações do filtro de Kalman sejam diretamente aplicadas. Para tal, o EKF lineariza o modelo não linear do sistema, f e h , por truncamento de primeira ordem de suas séries de Taylor em torno da média da respectiva variável a priori.

O algoritmo EKF compreende duas etapas fundamentais: a *etapa de predição* e a *etapa de assimilação de dados*. Para a inicialização, assumem-se as seguintes condições: a estimativa do vetor de estados, $\hat{x}_0$, e a matriz de covariância, P_0^{xx} são conhecidas. O algoritmo EKF é descrito a seguir.

A *etapa de predição* é responsável pela predição do vetor de estados a partir da informação disponível a priori $\hat{x}_{k-1|k-1}$ descrita como

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}, 0_{q \times 1}, k-1), \quad (4.9)$$

$$P_{k|k-1}^{xx} = \hat{A}_{k-1} P_{k-1|k-1}^{xx} \hat{A}_{k-1}^T + \hat{G}_{k-1} Q_{k-1} \hat{G}_{k-1}^T, \quad (4.10)$$

$$\hat{y}_{k|k-1} = h(\hat{x}_{k|k-1}, k), \quad (4.11)$$

$$P_{k|k-1}^{yy} = \hat{C}_k P_{k|k-1}^{xx} \hat{C}_k^T + R_k, \quad (4.12)$$

$$P_{k|k-1}^{xy} = P_{k|k-1}^{xx} \hat{C}_k^T, \quad (4.13)$$

em que $P_{k|k-1}^{xx} = E[(x_k - \hat{x}_{k|k-1})(x_k - \hat{x}_{k|k-1})^T]$, $P_{k|k-1}^{yy} = E[(y_k - \hat{y}_{k|k-1})(y_k - \hat{y}_{k|k-1})^T]$ e $P_{k|k-1}^{xy} = E[(x_k - \hat{x}_{k|k-1})(y_k - \hat{y}_{k|k-1})^T]$ são as matrizes de covariância do erro de predição, covariância da inovação e covariância cruzada, respectivamente. As matrizes Jacobianas

das funções f e h são avaliadas nas estimativas de estado mais recentes como

$$\hat{A}_{k-1} = \left. \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}} \right|_{\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}, 0_{q \times 1}, k-1}, \quad (4.14)$$

$$\hat{G}_{k-1} = \left. \frac{\partial f}{\partial w_{k-1}} \right|_{\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}, 0_{q \times 1}, k-1}, \quad (4.15)$$

$$\hat{C}_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x_k} \right|_{\hat{x}_{k|k-1}, k} \quad (4.16)$$

A etapa de assimilação de dados incorpora uma nova informação do sinal medido, y_k , para obter uma melhoria na estimativa do vetor de estados $\hat{x}_{k|k}$, dada por

$$K_k = P_{k|k-1}^{xy} (P_{k|k-1}^{yy})^{-1}, \quad (4.17)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - \hat{y}_{k|k-1}), \quad (4.18)$$

$$P_{k|k}^{xx} = P_{k|k-1}^{xx} - K_k P_{k|k-1}^{yy} K_k^T. \quad (4.19)$$

em que $K_k \in \mathbb{R}^{n \times m}$ é a matriz do ganho de Kalman, $\hat{x}_{k|k}$ é o vetor de estado e a correspondente matriz de covariância $P_{k|k}^{xx} = E[(x_k - \hat{x}_{k|k})(x_k - \hat{x}_{k|k})^T]$.

4.6.3.2 Índice de desempenho

O índice raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) é utilizado como uma métrica de desempenho para quantificar a diferença entre os valores observados e previstos por um modelo. O índice RMSE é dado por

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \hat{x}_k)^2}, \quad (4.20)$$

em que x_k é o valor real da variável e $\hat{x}_k$ é a estimativa do vetor de estados, ambos no instante k , o qual excursiona de 1 a N .

4.7 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentadas as duas principais etapas do desenvolvimento do sistema de medição de temperatura para a célula de medição ultrassônica em baixa frequência.

Na primeira etapa, a célula foi projetada e construída com o auxílio do modelo TMM, permitindo comparar os sinais acústicos simulados com os sinais adquiridos experimentalmente. Essa comparação forneceu uma base para validar a modelagem acústica e identificar possíveis ajustes no arranjo físico da célula. Além disso, foram detalhados os procedimentos adotados para o controle remoto dos instrumentos de bancada utilizados nos experimentos, bem como o desenvolvimento da interface gráfica para aquisição e visualização dos sinais em tempo real.

Na segunda etapa, os sistemas acústico e térmico foram integrados com o objetivo de estimar a temperatura da amostra líquida de forma não invasiva. A análise da velocidade de propagação dos sinais acústicos permitiu a inferência da temperatura da amostra, enquanto o sistema térmico foi responsável por realizar os processos de aquecimento e resfriamento controlado. Para aprimorar a estimativa de temperatura, foi implementado o EKF, utilizando um modelo não linear da dinâmica térmica do sistema, baseado em medições externas de corrente e temperatura.

5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos testes experimentais realizados para validar o sistema de medição de temperatura não invasivo e a estratégia de estimação de temperatura baseada no EKF. O objetivo principal é avaliar a capacidade do sistema proposto em estimar, de forma precisa, a temperatura da amostra líquida no interior da célula de medição ultrassônica, sem a necessidade de sensores diretamente em contato com o líquido.

A seguir, são apresentados os sinais aplicados para excitar as células Peltier, as respostas térmicas observadas e a análise comparativa entre a temperatura medida indiretamente por meio da técnica de medição acústica e a temperatura estimada pelo EKF, considerando as diferentes configurações avaliadas.

5.1 Descrição dos Cenários de Teste

Os testes realizados foram divididos em dois cenários experimentais, definidos de acordo com a modulação da corrente elétrica aplicada às células Peltier.

No *Cenário 1*, a corrente foi modulada por um sinal *chirp* exclusivamente positivo, com o objetivo de promover apenas o aquecimento do sistema. O sinal *chirp* foi adotado neste trabalho por sua capacidade de variar a frequência de forma contínua e controlada, o que permite avaliar a resposta térmica do sistema sob diferentes dinâmicas de excitação. A forma de onda da corrente nesse cenário está ilustrada na Figura 24(a).

No *Cenário 2*, a corrente foi modulada para assumir valores positivos e negativos, promovendo tanto o aquecimento quanto o resfriamento das células Peltier. Esse tipo de excitação foi empregado visando submeter o sistema a variações térmicas mais intensas e dinâmicas, simulando condições de operação mais realistas e desafiadoras. A Figura 24(b) mostra o sinal aplicado nesse experimento.

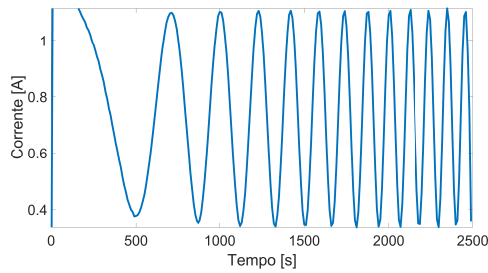
A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no modelo térmico da célula Peltier para os dois cenários. O período de amostragem adotado foi $T_s = 10$ s.

5.1.1 Cenário 1

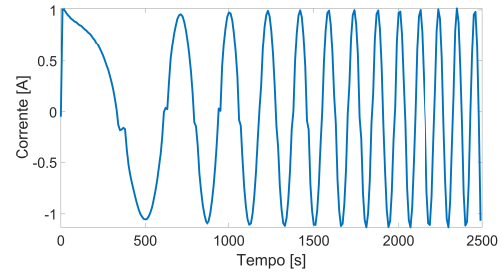
5.1.1.1 Cálculo da temperatura da água

Para determinar a temperatura da água presente no bloco de medição, iniciou-se com o cálculo do tempo de voo (Δt) entre os sinais S_{ref} e S_{eco} adquiridos, utilizando (2.11). Com os valores de Δt obtidos, a velocidade do som na água foi calculada pela relação $c = 2L/\Delta t$, considerando $L = 12,5$ mm como a distância entre os transdutores. Em

Figura 24 – Sinais de corrente utilizados nos testes das células Peltier: (a) aquecimento (Cenário 1) e (b) aquecimento e resfriamento (Cenário 2).



(a) Aquecimento (Cenário 1).



(b) Aquecimento e resfriamento (Cenário 2).

Fonte: Do autor.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no modelo da célula Peltier.

Símbolo	Valor
m_a	0,2 kg
m_k	0,14 kg
T_a	296,4 K
c_a, c_k	896 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
K_k	0,5 WK ⁻¹
K_r	0,2 WK ⁻¹
K	0,976 WK ⁻¹
S	0,17 WK ⁻¹ A ⁻¹

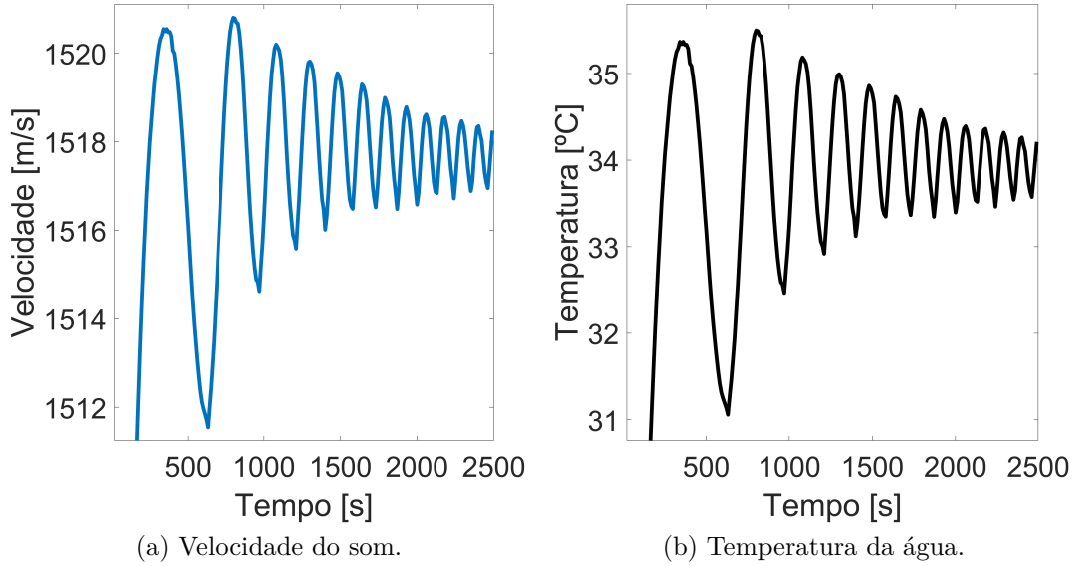
seguida, aplicou-se (2.5), juntamente com um método numérico de busca de raízes, para estimar a temperatura correspondente à velocidade do som medida.

A Fig. 25 apresenta a evolução (a) da velocidade do som e (b) da temperatura da água ao longo do tempo. Observa-se que ambas as curvas acompanham a variação de frequência do sinal *chirp* aplicado e convergem para uma condição de estabilidade ao final do ensaio. Nota-se ainda uma tendência clara de aumento da velocidade do som e da temperatura ao longo do tempo, condizente com o processo de aquecimento aplicado à célula, evidenciando que o método proposto é capaz de monitorar adequadamente a evolução térmica do sistema, mesmo sob modulação em frequência.

5.1.1.2 Estimação da temperatura da água

Para tratar o problema de estimação da temperatura da água utilizando a abordagem do EKF, considera-se que o modelo de processo (4.4)-(4.6) é um sistema não linear (4.7), enquanto o modelo de observação (4.8) é um sistema linear, cuja matriz de saída

Figura 25 – Evolução da (a) velocidade do som e (b) temperatura da água durante o teste de aquecimento.



Fonte: Do autor.

$C_k \in \mathbb{R}^{m \times n}$ é dada por

$$C_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

em que são medidas as temperaturas nas faces fria, T_c , e quente, T_h , de uma das células Peltier. A partir dessas temperaturas, calcula-se a resistência elétrica, R_e , usando (4.6).

Os resultados apresentados neste trabalho consideram o uso de duas células Peltier, cujo vetor de estados do sistema é definido por

$$x_k = \begin{bmatrix} T_c & T_h & R_e \end{bmatrix}^T, \quad (5.2)$$

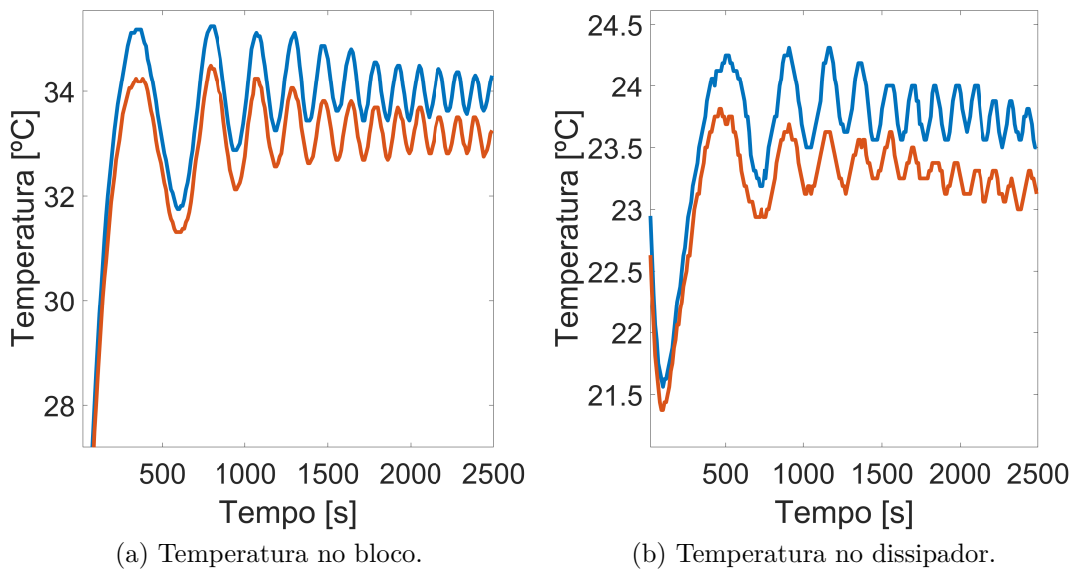
em que k indica o k -ésimo instante de tempo. Para a inicialização, assume-se que o vetor de estados $x_{0|0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ e a matriz de covariância $P_{0|0}^{xx} = \text{diag}(10 \cdot I_{n \times n})$.

Considera-se que o ruído de processo Q_k é sintonizado de forma empírica e o ruído de medição R_k é sintonizado a partir de informações fornecidas pelas especificações de instrumentação. Assume-se que o ruído de processo, $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k)$, é um ruído branco de média zero com covariância constante $Q_k = 10^{-4} I_{n \times n}$ e o ruído de observação, $v_k \sim \mathcal{N}(0, R_k)$, é um ruído branco de média zero com covariância constante $R_k = 10^{-3} I_{n \times n}$.

Para o *Cenário 1*, considera-se a condição de aquecimento do sistema de controle térmico que utiliza quatro sensores para medir a temperatura da água dentro da célula de medição ultrassônica. Nas Figuras 26(a) e 26(b) são apresentadas as temperaturas fornecidas pelos sensores 1 e 3, respectivamente, posicionados na face fria, T_c , junto ao

bloco de alumínio e os sensores 2 e 4 posicionados na face quente, T_h , junto ao dissipador de calor das duas células Peltier. Observam-se variações entre as medições da temperatura de cada células Peltier do mesmo modelo TEC-12706. Esse fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, como tolerâncias de fabricação, condições de operação, medição imprecisa, entre outros.

Figura 26 – *Cenário 1*: Sinais das temperaturas das duas células Peltier durante o ensaio de aquecimento, posicionados no: a) bloco de alumínio, T_c , e medido pelo sensor 1 (azul) e sensor 3 (laranja), e b) dissipador de calor, T_h , e medido pelo sensor 2 (azul) e sensor 4 (laranja).



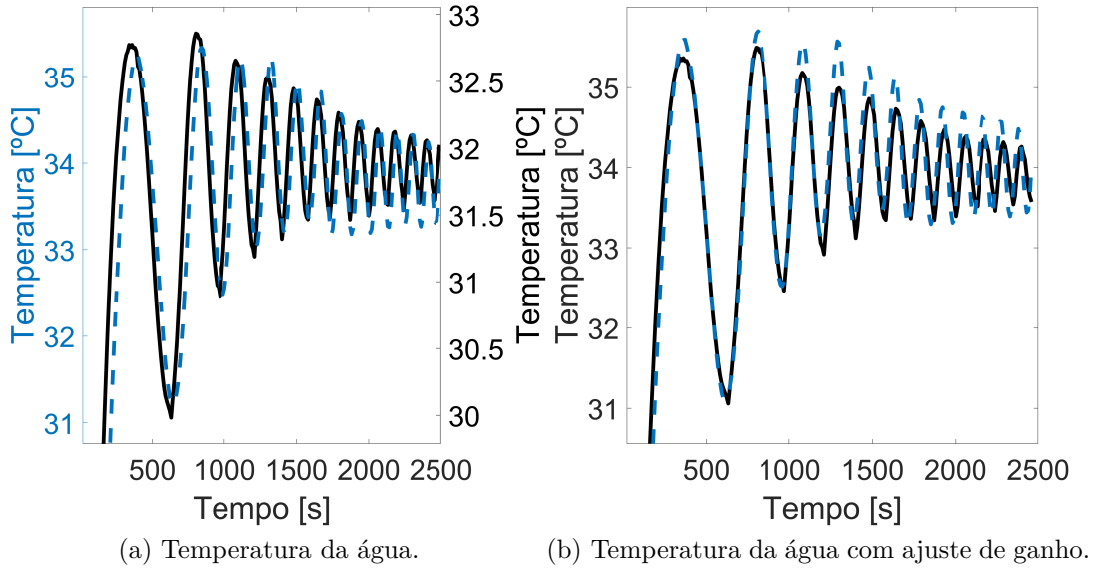
Fonte: Do autor.

O algoritmo do EKF fornece a estimativa do sinal de temperatura da água dentro da célula de medição a partir dos valores das estimativas anteriores, as medições apenas de uma célula Peltier e os modelos do sistema térmico.

A Figura 27.a apresenta a estimativa da temperatura da água dentro da célula de medição utilizando os modelos (4.4)-(4.6) e (5.1) no EKF considerando apenas as medições dos sensores 1 e 2 de uma célula Peltier no *Cenário 1*. Observa-se que a estimativa do sinal de temperatura da água, $\hat{T}_c$, (linha tracejada azul) descreve o comportamento de aquecimento da temperatura da água, $T_{\text{água}}$ (linha preta). Entretanto, é necessário realizar um ajuste para compensar o atraso de fase. Para realizar o procedimento de correção, considera-se o cálculo de um ganho a partir dos valores pico a pico do sinal estimado, $\hat{T}_c$, e a temperatura da água, $T_{\text{água}}$. A compensação da estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, é mostrada na Figura 27.b. Observa-se que a estimativa do sinal de temperatura da água apresenta variações nos picos do sinal. Essas variações podem ser resultados do comportamento térmico da célula Peltier durante o ensaio de aquecimento.

A Tabela 4 apresenta o índice RMSE obtido a partir da estimativa da temperatura

Figura 27 – *Cenário 1*: Estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, dentro da célula de medição utilizando os modelos (4.4)-(4.6) e (5.1) no EKF: a) sem correção e b) com correção do ganho. O traçado em linha contínua preta indica o sinal de temperatura da água, $T_{\text{água}}$ enquanto que o traçado em linha tracejada azul indica o sinal estimado.



Fonte: Do autor.

da água, $\hat{T}_c$, dentro da célula de medição utilizando o EKF considerando os dois cenários experimentais. Verifica-se que a estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, apresentou o índice RMSE de 1,13% e 2,51% para os *Cenários 1* e *2*, respectivamente. Esses resultados mostram que a qualidade da estimativa melhora quando o sistema térmico permanece na condição de aquecimento (*Cenário 1*), pois o sistema sofre menores variações térmicas comparados com o *Cenário 2*. É interessante observar que o baixo índice RMSE da estimativa da água fornecida pelo EKF para os dois cenários indica que é viável aplicar um processo de estimação de estados, mesmo utilizando sensores de temperatura de baixa resolução.

Tabela 4 – Índice RMSE (4.20) da temperatura da água dentro da célula de medição para o *Cenário 1* e *Cenário 2* utilizando o EKF.

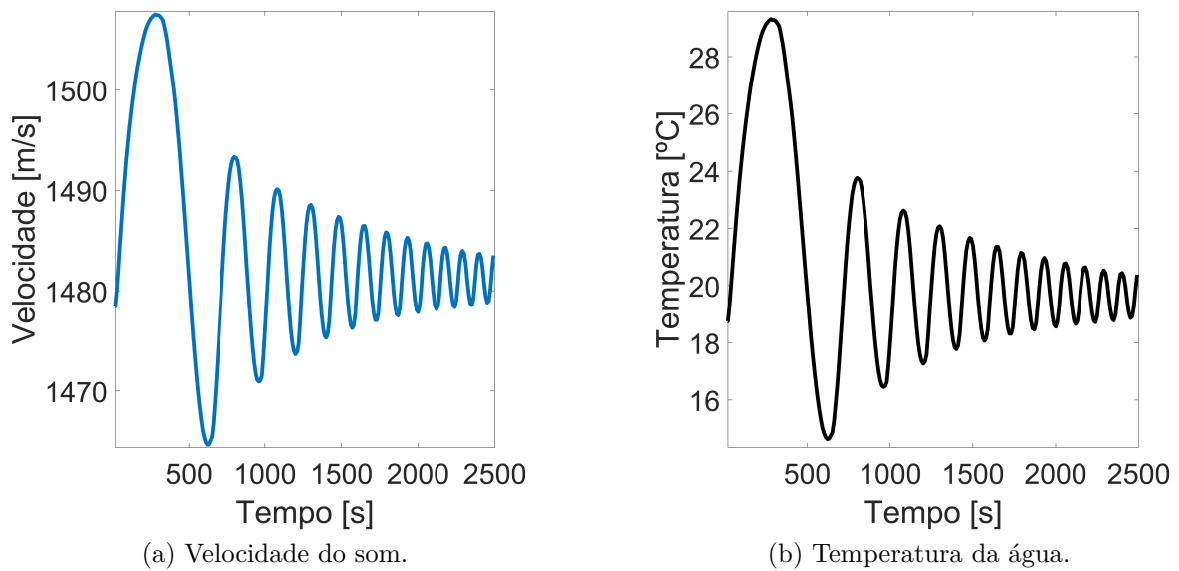
RMSE % Cenário 1	RMSE % Cenário 2
1,13	2,51

5.1.2 Cenário 2

Para o *Cenário 2*, mantém-se a mesma configuração do sistema de monitoramento térmico, utilizando quatro sensores para medir a temperatura da água na célula de medição. Entretanto, alterou-se o sinal *chirp* para que a corrente elétrica modulada assumia valores positivos e negativos, permitindo tanto o aquecimento quanto o resfriamento das células Peltier.

5.1.2.1 Cálculo da temperatura da água

Figura 28 – Evolução da (a) velocidade do som e (b) temperatura da água durante o ensaio de aquecimento e resfriamento.



Fonte: Do autor.

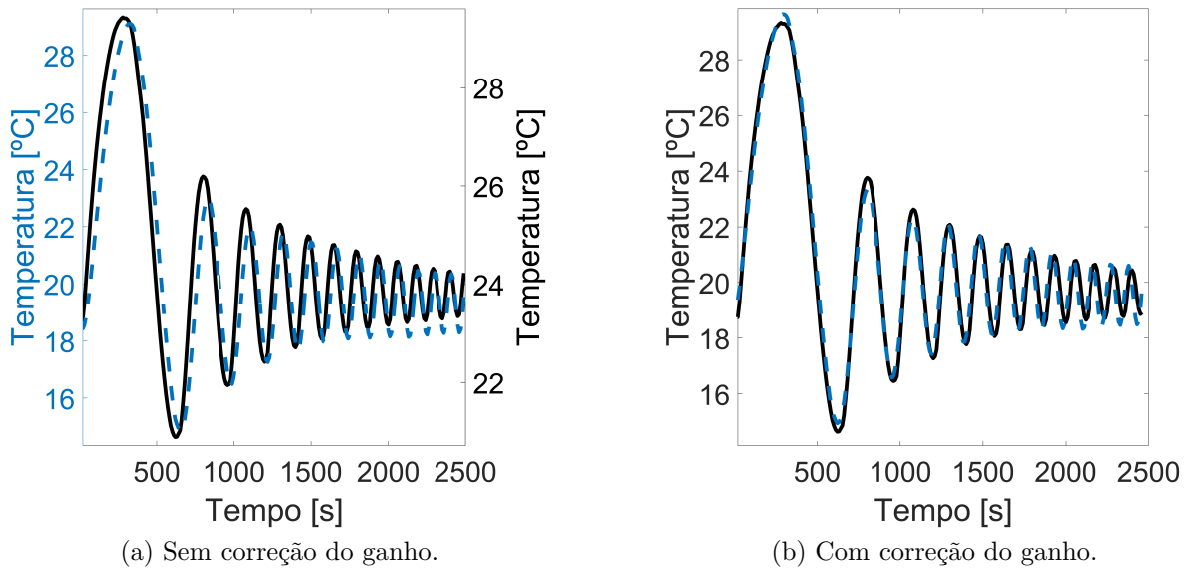
Para caracterizar o processo de aquecimento e resfriamento das células Peltier, realizou-se o mesmo procedimento descrito no *Cenário 1*. A Fig. 28 apresenta a evolução (a) da velocidade do som e (b) da temperatura da água ao longo do ensaio. Observa-se que tanto a velocidade do som quanto a temperatura da água tendem à estabilização, indicando o equilíbrio térmico do sistema. Esse resultado reforça a coerência do método, visto que a variação da temperatura é compatível com as alterações no sinal de corrente controlado.

5.1.2.2 Estimação da temperatura da água

De forma análoga, utiliza-se o EKF para estimar a temperatura da água dentro da célula de medição a partir dos modelos (4.4)-(4.6) e (5.1), e o conjunto de medições que monitoram a condição de aquecimento e resfriamento das células Peltier (*Cenário 2*).

A Figura 29(a) apresenta a estimativa da temperatura da água dentro da célula de medição durante o ensaio de aquecimento e resfriamento. Observa-se que a estimativa do sinal de temperatura da água, $\hat{T}_c$, caracteriza a variação entre a condição de aquecimento e resfriamento das células Peltier. Analogamente ao *Cenário 1*, é necessário compensar o atraso de fase na estimativa da temperatura da água seguindo o mesmo procedimento. Essa correção é mostrada na Figura 29(b). Nota-se que a estimativa do sinal de temperatura da água apresenta variações nos picos e vales da curva. Tais oscilações podem estar associadas às variações na corrente elétrica aplicada às células Peltier durante a alternância entre os modos de aquecimento e resfriamento. Portanto, é esperado o aumento do erro na estimativa da temperatura da água no *Cenário 2*, conforme mostrado na Tabela 4.

Figura 29 – *Cenário 2*: Estimativa da temperatura da água, $\hat{T}_c$, dentro da célula de medição utilizando os modelos (4.4)–(4.6) e (5.1) no EKF: (a) sem correção e (b) com correção do ganho. A linha contínua preta representa a temperatura real da água, $T_{\text{água}}$, enquanto a linha tracejada azul indica o sinal estimado.



Fonte: Do autor.

5.2 Considerações Parciais

Os resultados indicam que o sistema de controle térmico e o EKF apresentaram bom desempenho na estimação da temperatura da amostra, sem a necessidade de sensores internos. No entanto, observou-se que variações térmicas mais rápidas, especialmente no cenário com aquecimento e resfriamento, impactam negativamente a precisão das estimativas devido à falta de adaptação dos parâmetros do modelo.

A aplicação da correção no ganho do EKF reduziu significativamente os erros, melhorando a acurácia nas transições térmicas. De modo geral, os resultados validam a proposta de um método não invasivo para controle e estimação térmica em sistemas ultrassônicos, destacando sua aplicabilidade em situações onde o uso de sensores na amostra não é viável.

6 Considerações Finais

Este trabalho desenvolveu um sistema de medição de temperatura não invasivo para uma célula de medição ultrassônica em baixa frequência (10 MHz), capaz de estimar a temperatura da água no interior da célula sem contato direto com a amostra e sem depender de propriedades termoacústicas específicas.

Inicialmente, foram realizados testes com diferentes técnicas de cálculo do tempo de voo entre sinais ultrassônicos, com o objetivo de selecionar os métodos mais adequados ao projeto. Dentre as abordagens avaliadas — detecção de picos, cruzamento com zero, correlação cruzada e fase espectral — os métodos baseados em correlação cruzada e fase espectral demonstraram maior robustez frente a ruídos e atenuações, apresentando melhor desempenho em termos de precisão e repetibilidade. Também foi desenvolvido um modelo acústico da célula de medição (modelo TMM), capaz de simular a propagação dos sinais acústicos. Esse modelo permitiu analisar o comportamento do sistema de medição de forma detalhada e comparar os sinais simulados com os sinais experimentais, contribuindo para a validação do arranjo físico e a identificação de possíveis fontes de distorção.

Na etapa experimental, foi construída uma nova célula de medição inspirada no projeto de Tiago (2018) com modificações estruturais importantes: (i) eliminação das cubetas removíveis, sendo o líquido depositado diretamente no bloco de alumínio; (ii) substituição dos transdutores de alta frequência (75 MHz) por modelos de baixa frequência (10 MHz); e (iii) adoção de um método não invasivo de medição de temperatura, baseado na análise de sinais ultrassônicos. Para estimar a temperatura da água, de forma indireta, utiliza-se a propriedade acústica da velocidade de propagação do som obtida a partir da medição do tempo de voo entre os sinais ultrassônicos. Porém, essa abordagem requer uma relação específica para cada líquido, tornando-se inviável em amostras complexas.

Para testar o monitoramento térmico na célula de medição, o presente estudo considerou dois cenários experimentais que caracterizam o aquecimento e resfriamento da amostra líquida. Para tal, o sinal de entrada aplicado ao sistema térmico é um sinal *chirp* que modula a corrente elétrica aplicada às células Peltier. O comportamento dinâmico do sinal *chirp* permite a avaliação da resposta térmica do sistema frente a diferentes frequências de excitação ao longo do tempo. Diferentes condições de testes, apresentadas em (MIRONOVA et al., 2020), utilizaram sinais contínuos com frequência fixa e aplicaram apenas aquecimento nas células Peltier.

Este trabalho também investigou o problema de estimação da temperatura da água no interior da célula de medição por meio da abordagem do EKF. Para essa estimação, o EKF utiliza um modelo matemático não linear que descreve o comportamento das células Peltier e um conjunto de medições fornecidas pelos sensores de temperatura e corrente do sistema térmico. Com essa abordagem, torna-se possível estimar a temperatura da amostra

líquida sem a necessidade de conhecer previamente as propriedades termoacústicas, como a velocidade de propagação do som. Os resultados mostram um índice RMSE de 1,13% e 2,51% para os cenários 1 e 2, respectivamente. Uma constatação relevante é que as variações térmicas aplicadas às células Peltier provocam um decréscimo na qualidade das estimativas de estado, devido à falta de adaptação dos parâmetros do modelo matemático utilizado no EKF. Os resultados obtidos sugerem que o EKF é uma abordagem promissora para a estimação de sinais térmicos, tornando-se uma ferramenta útil para aplicação de métodos ultrassônicos.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Como propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros, destacam-se alguns pontos a serem considerados para a complementação desta pesquisa:

- Implementar o controle de temperatura utilizando como variável de realimentação a temperatura estimada pelo EKF;
- Melhorar o ambiente de medição, com foco no aumento do isolamento térmico da célula, a fim de reduzir as perdas de calor para o meio externo;
- Realizar melhorias no arranjo físico do sistema, incluindo a fixação adequada das placas de circuito impresso (PCB) e a organização dos fios e conexões, visando aumentar a robustez, confiabilidade e reprodutibilidade dos experimentos;
- Desenvolver e validar um modelo térmico específico para a célula de medição construída, determinando experimentalmente os parâmetros térmicos do sistema.

Referências

- ADAMOWSKI, J. C. et al. Caracterização de líquidos por ultra-som. 2001.
- AGUIRRE, L. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Ed. UFMG, 2004. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=h8u-AQAACAAJ>>.
- ALOUACHE, B. et al. Characterization of olive oil by ultrasonic and physico-chemical methods. *Physics Procedia*, v. 70, p. 1061–1065, 2015. Proceedings of the 2015 ICU International Congress on Ultrasonics, Metz, France. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215009670>>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.226>.
- BAÊSSO, R. M. et al. Ultrasound as a metrological tool for monitoring transesterification kinetics. In: FARRUKH, M. A. (Ed.). *Advanced Chemical Kinetics*. Rijeka: IntechOpen, 2017. cap. 11. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.70501>>. doi: [10.5772/intechopen.70501](https://doi.org/10.5772/intechopen.70501).
- BILANIUK, N.; WONG, G. S. K. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 93, n. 3, p. 1609–1612, 03 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.406819>>. doi: [10.1121/1.406819](https://doi.org/10.1121/1.406819).
- CHAVAN, P. et al. Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2304-8158/11/1/122>>. doi: [10.3390/foods11010122](https://doi.org/10.3390/foods11010122).
- DAUM, F. Nonlinear filters: Beyond the Kalman filter. *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, v. 20, n. 8, p. 57–69, 2005.
- DORABIATO, L. F. *Caracterização de leite bovino utilizando ultra-som e redes neurais artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1333>>.
- ETTAHIRI, M. et al. An ultrasound approach to characterize mixtures of vegetable oils with the same type of dominant chemical compositions. *Applied Food Research*, v. 4, n. 1, p. 100430, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502224000428>>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100430>.
- FIGUEIREDO, M. K.-K.; ALVARENGA, A. V.; COSTA-FÉLIX, R. P. Ultrasonic attenuation and sound velocity assessment for mixtures of gasoline and organic compounds. *Fuel*, v. 191, p. 170–175, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116311772>>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.076>.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física, Volume 2*. 10ª edição. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. E-book.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. 9. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013. v. 2.

- JACKSON, J. C. et al. Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 60, n. 2, p. 343–355, 2013. doi: 10.1109/TUFFC.2013.2570.
- JIMÉNEZ, N.; UMNOVA, O.; GROBY, J.-P. *Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media From Fundamentals to Industrial Applications: From Fundamentals to Industrial Applications*. [S.l.: s.n.], 2021. doi: 10.1007/978-3-030-84300-7.
- JULIER, S. J.; UHLMANN, J. K.; DURRANT-WHYTE, H. F. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 45, n. 3, p. 477–482, 2000.
- KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960.
- MARCZAK, W. Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 102, n. 5, p. 2776–2779, 11 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.420332>>. doi: 10.1121/1.420332.
- MAYBECK, P. S. *Stochastic Models, Estimation and Control*. Academic press, inc. San Diego: [s.n.], 1979.
- MIRONOVA, A. et al. Extended kalman filter for temperature estimation and control of peltier cells in a novel industrial milling process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 56, n. 2, p. 1670–1678, 2020. doi: 10.1109/TIA.2020.2965058.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Processamento de Sinais em Tempo Discreto*. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- Renesas Electronics Corporation. *RX23E-A Group Example of Thermoelectric Peltier Controller*. [S.l.], 2020. Available at: <<https://www.renesas.com/en/products/microcontrollers-microprocessors/rx-32-bit-performance-efficiency-mcus/rx23e-a-thermoelectric-peltier-controller-reference-design>>.
- TEKTRONIX. *TDS1000/TDS2000 and TPS2000 Series Digital Storage Oscilloscopes Programmer Manual*. [S.l.], 2006. Available online at Tektronix’s official website. Disponível em: <<https://www.tek.com/oscilloscope/tds2000-programmer-manual>>.
- TIAGO, M. M. *Desenvolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/153878>>.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Estratégia não invasiva para estimação da temperatura de amostras em células de medição ultrassônicas usando o filtro de Kalman Estendido é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 11 de novembro de 2025.

Enzo Lopes de Freitas