



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MATHEUS FERNANDES DE BRITO
PAULLA HORTÊNCIA FREITAS VASCONCELOS**

**ANÁLISE DE SINAIS OBTIDOS DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS
SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

**Palmas – TO
2019**

MATHEUS FERNANDES DE BRITO
PAULLA HORTÊNCIA FREITAS VASCONCELOS

ANÁLISE DE SINAIS OBTIDOS DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS
SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Engenheiro (a)
Eletricista do Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal do Tocantins,
Campus Palmas.

Orientador: Dr. Maxwell Moura Costa

Coorientador: Dr. Marcus André Pereira
Oliveira

Palmas – TO
2019

Brito, Matheus Fernandes; Vasconcelos, Paulla Hortência Freitas
Análise de sinais obtidos de transdutores ultrassônicos submetidos à variação de temperatura / Matheus Fernandes de Brito; Paulla Hortência Freitas Vasconcelos– Palmas, 2019.
87f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Palmas, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Maxwell Moura Costa; Coorientador Dr. Marcus André Pereira Oliveira

1. Transdutores ultrassônicos 2. Tempo de trânsito 3. Transformada discreta de Fourier
4. Correlação cruzada | Análise de sinais obtidos de transdutores ultrassônicos submetidos à variação de temperatura.

MATHEUS FERNANDES DE BRITO
PAULLA HORTÊNCIA FREITAS VASCONCELOS

ANÁLISE DE SINAIS OBTIDOS DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS
SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

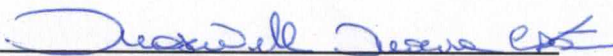
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como cumprimento às exigências legais do currículo do curso de Engenharia Elétrica pela Coordenação da Área de Indústria no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus Palmas*.

Aprovado em 14 de fevereiro de 2019.

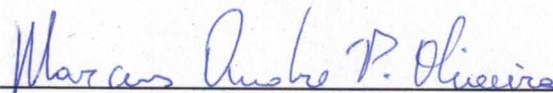


Prof. Esp. Felipe Tozzi Bittencourt
Supervisor de Trabalho de Conclusão de Curso

Banca Avaliadora:



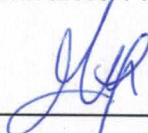
Prof. Dr. Maxwell Moura Costa
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Marcus André Pereira Oliveira
Coorientador



Prof. Dr. Wendell Eduardo Moura Costa
Membro da Banca Avaliadora



Prof. Me. Mateus Lima Peduzzi
Membro da Banca Avaliadora

RESUMO

Ao considerar a importância do estudo sobre ondas ultrassônicas, este trabalho apresenta a análise de sinais obtidos de transdutores ultrassônicos submetidos à variação de temperatura. Foi utilizado para tanto o método do tempo de trânsito - ToF (*Time of flight*), cujos resultados foram obtidos por meio da Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) e Correlação Cruzada (*Cross Correlation* - CC). O procedimento de medição do tempo de trânsito de sinais ultrassônicos se deu com a concepção de um protótipo para o controle de temperatura, aquisição de dados e posterior averiguação de suas características. Além disso, foi realizada simulação do sistema por meio da ferramenta computacional *Simulink* (MATLAB®). Os resultados comprovam a eficácia do uso de transdutores de ultrassom com base na DFT e CC para medição de ToF e temperatura, visto que tais técnicas apresentam baixa incerteza.

Palavras chave: transdutores ultrassônicos, tempo de trânsito, transformada discreta de Fourier, correlação cruzada.

ABSTRACT

When considering the importance of the study on ultrasonic waves, this work presents the analysis of signals obtained from ultrasonic transducers subjected to temperature variation. The Time of Flight (TOF) method was used for the Discrete Fourier Transform (DFT) and Cross Correlation (CC). The proceeding to measure the time of flight of ultrasonic signals was with the design of a prototype for temperature control, data acquisition and subsequent investigation of its characteristics. In addition, a simulation of the system was performed using the Simulink computational tool (MATLAB ©). The results confirm the efficacy of the use of DFT and CC based on ultrasonic transducers for ToF measurement and temperature, since these techniques present low uncertainty.

Key words: ultrasonic transducers, transit time, discrete Fourier transform, cross correlation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	10
1.3	OBJETIVOS.....	11
1.3.1	Objetivo Geral.....	11
1.3.2	Objetivos Específicos.....	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	ULTRASSOM.....	12
2.1.1	Propagação de Ondas Ultrassônicas.....	13
2.1.1.1	Ondas longitudinais.....	13
2.1.1.2	Ondas Transversais.....	14
2.1.2	Frequência.....	15
2.1.3	Velocidade de propagação.....	16
2.1.4	Atenuação.....	16
2.2	TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS.....	19
2.3	TEMPO DE TRÂNSITO.....	21
2.4	SISTEMAS LINEARES E INVARIANTES NO TEMPO.....	22
2.5	REPRESENTAÇÕES DE FOURIER PARA SINAIS.....	23
2.5.1	Transformada Discreta de Fourier (DFT).....	24
2.5.2	Estimação da diferença de fase pela DFT.....	27
2.6	CORRELAÇÃO CRUZADA.....	28
2.7	ANÁLISE DO RUÍDO SOBRE SINAIS.....	31
3.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
3.1	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	33

3.2 CONTROLE DE FASE.....	35
3.3 CIRCUITO DETECTOR DE PASSAGEM POR ZERO.....	36
3.4 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA.....	37
3.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO.....	39
3.6 SIMULAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RUÍDO.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	44
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	46
4.3 ATENUAÇÃO.....	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Onda longitudinal.....	13
Figura 2: Onda transversal.....	14
Figura 3: Classificação de ondas sonoras.....	15
Figura 4: Variação da absorção atmosférica com a umidade relativa a 15 °C.....	17
Figura 5: Variação da absorção atmosférica com a umidade relativa a 0 °C.....	17
Figura 6: Curva típica de atenuação.....	18
Figura 7: Estrutura de um transdutor ultrassônico.....	20
Figura 8: Tempo de trânsito ToF.....	22
Figura 9: Representação gráfica de um sinal contínuo.....	25
Figura 10: Representação gráfica do sinal discretizado.....	26
Figura 11: Representação do espectro de magnitude.....	26
Figura 12: Representação do espectro de fase.....	27
Figura 13: Representação do procedimento para determinação de fase e de tempo de defasamento.....	28
Figura 14: Sinais Defasados no Tempo.....	30
Figura 15: Correlação Cruzada.....	30
Figura 16: Representação de sinal sem ruído.....	32
Figura 17: Representação de sinal com ruído aditivo.....	32
Figura 18: Composição interna do protótipo do sistema.....	33
Figura 19: Esquematisação do sistema para aquisição de sinais.....	34
Figura 20: Esquema de conexão de circuitos à lâmpada.....	34
Figura 21: Circuito de controle de fase.....	36
Figura 22: Circuito para detecção de passagem por zero.....	37
Figura 23: Configuração do LM35 no sistema de medição.....	39

Figura 24: Posicionamento dos transdutores ultrassônicos.....	39
Figura 25: Gerador de onda senoidal – <i>Simulink</i>	41
Figura 26: Sinal senoidal gerado transmitido de 40 kHz.....	42
Figura 27: Sinal recebido no transdutor receptor Rx sem ruído.....	42
Figura 28: Sinal recebido no transdutor receptor Rx com ruído aditivo.....	43
Figura 29: Conjunto de blocos desenvolvidos para análise de sinais sobre influência de ruídos.....	43
Figura 30: Sinais TX e RX em 22° e 42° C.....	47
Figura 31: Atenuação para temperatura 22,30 °C.....	49
Figura 32: Atenuação para temperatura 32,65 °C.....	49
Figura 33: Atenuação para temperatura 42,30 °C.....	50
Figura 34: Curva de atenuação.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade de propagação de ondas Longitudinais em materiais.....	14
Tabela 2: Valores estimados de ToF pela simulação para 22 °C.....	44
Tabela 3: Valores estimados para simulação de Temperatura de 22 °C.....	45
Tabela 4: Valores estimados de ToF pela simulação para 32 °C.....	45
Tabela 5: Valores estimados para simulação de Temperatura de 32 °C.....	45
Tabela 6: Valores estimados de ToF pela simulação para 42 °C.....	46
Tabela 7: Valores estimados para simulação de Temperatura de 42 °C.....	46
Tabela 8: Valores estimados de ToF pelas técnicas de DFT e CC.....	47
Tabela 9: Valores estimados de Temperatura pelas técnicas DFT e CC.....	48
Tabela 10: Atenuação dos sinais transmitidos e recebidos.....	50

1. INTRODUÇÃO

O estudo sobre ondas ultrassônicas tem considerável relevância em diversas áreas de conhecimento, com aplicações na engenharia, medicina, agropecuária, indústria tradicional e farmacêutica (MARTINHON, 2007).

As ondas ultrassônicas dizem respeito a ondas de pressão não audíveis ao ouvido humano, por possuírem frequências superiores a 20 KHz. Elas podem se propagar em materiais sem causar nenhuma alteração ao meio, o que torna vantajosa sua aplicação.

A principal forma de se produzir esse tipo de onda é por meio de transdutores ultrassônicos. Estes dispositivos são elementos que podem emitir e detectar sinais por meio do efeito piezelétrico (MURTY, 2010).

Transdutores ultrassônicos são amplamente utilizados para o desenvolvimento de sistemas de medição de nível, temperatura, velocidade do som, medição de fluxo, medição da velocidade do vento, volume, espessura, entre outros. Isso só é feito porque os transdutores geram e capturam ultrassom. Um princípio para tais medições é o tempo de trânsito - ToF (*Time of flight*), que diz respeito ao tempo que uma onda leva para ser detectada após a transmissão de um sinal (LUCENA, 2018). O ToF está diretamente associado à velocidade de propagação da onda e é influenciado pela temperatura.

Diante do exposto, esse trabalho apresenta uma análise dos sinais obtidos de transdutores ultrassônicos, a partir do método tempo de trânsito, uma vez que estes sinais foram submetidos à variação de temperatura.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

De que forma a variação de temperatura interfere na estimativa do tempo de trânsito – ToF, resultante da aquisição de sinais de transdutores ultrassônicos?

1.2 JUSTIFICATIVA

Em virtude da influência do ruído e da atenuação do meio, a estimativa do ToF deve ser realizada utilizando técnicas adequadas para obtenção de uma baixa incerteza de medição.

De acordo com o trabalho de medição da velocidade de vento utilizando transdutores ultrassônicos baseada na Transformada de Fourier, realizado por (COSTA, 2015), durante o processo de aquisição dos sinais transmitido e recebido de transdutores ultrassônicos foi constatado que a variável temperatura contribui com um erro sistemático na estimativa do ToF, ou seja, há diferença em cada instante entre o sinal de saída ideal e o real.

Diante disso, esse projeto baseia-se na verificação do erro decorrente da temperatura, analisado a partir da influência desta sobre os sinais ultrassônicos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar análise da influência da temperatura sobre os sinais obtidos de transdutores ultrassônicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um protótipo para realizar o controle e medição de temperatura para um sistema linear invariante no tempo (*Linear Time Invariant* - LTI);
- Estimar as características do protótipo desenvolvido;
- Desenvolver um procedimento de medição do tempo de trânsito de sinais ultrassônicos baseado na Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) e Correlação Cruzada (*Cross Correlation* - CC);
- Realizar medições de temperatura com o sensor LM35 e compará-las com as temperaturas resultantes das técnicas DFT e CC;
- Apresentar os resultados experimentais do procedimento de medição dos sinais ultrassônicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 4 capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, problema de pesquisa, objetivos e justificativa.

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica, que contém as definições e conceitos necessários para o desenvolvimento desse trabalho. Dessa forma, foram abordados conceitos sobre as ondas ultrassônicas, com a descrição dos tipos de propagação, frequência, velocidade de propagação e atenuação. Em relação aos transdutores ultrassônicos, descreve-se o princípio de funcionamento e partes constituintes. Além disso, foi apresentada a definição de Tempo de Trânsito (*Time of Flight* – ToF), bem como as técnicas utilizadas para estimação deste. No caso deste trabalho, foram utilizadas a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* – DFT) e Correlação Cruzada (*Cross Correlation* - CC). Tais técnicas dizem respeito a um sistema Linear e Invariante no Tempo.

O Capítulo 3 expõe os procedimentos metodológicos empregados, que abrangem a concepção de um protótipo com o objetivo de proporcionar o controle de temperatura e a utilização de técnicas de medição da temperatura e a determinação do ToF. Além do experimento, este capítulo apresenta a simulação do sistema para análise da interferência de ruídos sobre os sinais dos transdutores ultrassônicos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados oriundos do desenvolvimento experimental e da simulação realizados.

Por fim, o Capítulo 5 corresponde à conclusão do projeto, bem como as proposições para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ULTRASSOM

Ondas sonoras são ondas mecânicas definidas pela oscilação periódica de partículas. Tal oscilação propaga-se pelo meio material, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Diferentemente das ondas eletromagnéticas, o som necessita de matéria para se propagar, não sendo, portanto, propagado através do vácuo (LEÃO, 2012).

O som possui velocidades características para cada meio que atravessa e para cada meio, em particular, existe uma relação inversamente proporcional entre frequência e comprimento de onda.

A propriedade importante das ondas sonoras é que elas se comportam como ondas de luz no que diz respeito a reflexão e refração. Elas também são longitudinais e transversais no meio. A velocidade das ondas sonoras é menor no ar,

sendo equivalente a 330 m/s e alcança até 6.000 m/s em substâncias metálicas. A energia sonora se acentua nos gases e, em certa medida, na viscosidade da frequência das ondas ultrassônicas. Esta depende do material através do qual as ondas são transmitidas e do comprimento do caminho do feixe no material (MURTY, 2010).

2.1.1 Propagação de Ondas Ultrassônicas

A facilidade de propagação da onda depende do meio material e de suas respectivas características. Por este motivo uma onda pode ser classificada como longitudinal ou transversal.

Ondas ultrassônicas apresentam-se sob as duas formas citadas ou sob uma combinação dos dois tipos básicos. Neste trabalho, o meio de propagação para as ondas geradas foi o ar, então o foco de estudo será referente às ondas longitudinais.

2.1.1.1 Ondas longitudinais

As ondas longitudinais, também chamadas de ondas de compressão, são ondas que oscilam na mesma direção de propagação (ADEUCCI, 2014). Isto significa que as partículas do meio de propagação da onda sofrem um movimento similar ao de uma mola em processo de compressão-extensão. A distância entre duas zonas de compressão determinam o comprimento da onda λ . Tal descrição pode ser melhor compreendida por meio da Figura 1.

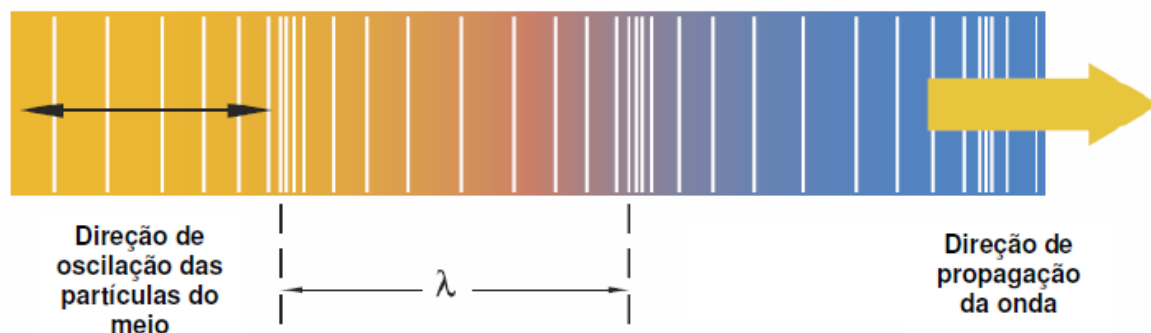


Figura 1: Onda longitudinal

Em decorrência do tipo de propagação, esse tipo de onda apresenta velocidades relativamente altas a depender da característica do meio material. A Tabela 1 apresenta as velocidades de propagação em alguns materiais para a temperatura de 0 °C.

Tabela 1: Velocidade de propagação de ondas Longitudinais em materiais

MATERIAL	VELOCIDADE (m/s)
Ar	330
Alumínio	6.300
Cobre	4.700
Ouro	3.200
Aço	5.900
Aço inoxidável	5.800
Nylon	2.600
Óleo (SAE30)	1.700
Água	1.480
Prata	3.600
Titânio	6.100
Níquel	5.600
Tungstênio	5.200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

Fonte: Reproduzida de (KRAUTKRAMER, 2002)

2.1.1.2 Ondas Transversais

A onda transversal, também chamada de cisalhante, faz as partículas vibrarem em alguma direção perpendicular à de propagação, como pode ser observado na Figura 2.

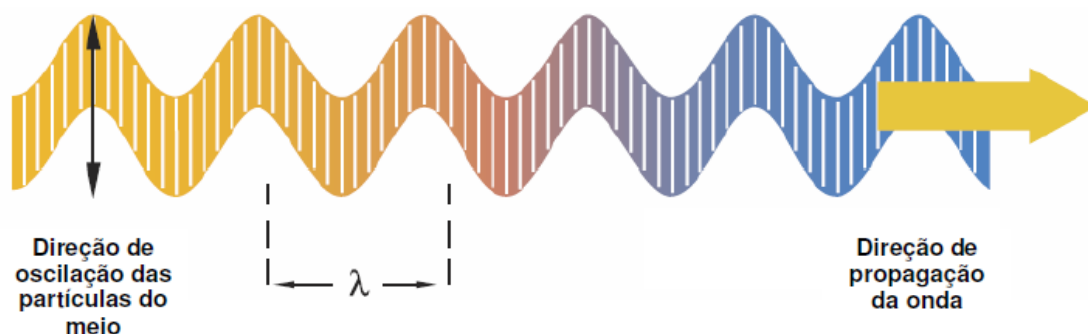


Figura 2: Onda transversal

Esse é o caso das ondas eletromagnéticas e seu comportamento pode ser lembrado como o movimento harmônico de uma corda excitada por uma de suas extremidades (LEÃO, 2012).

Ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem em líquidos e gases por conta das características destes meios, podendo ser transmitidas somente nos sólidos.

2.1.2 Frequência

Fazendo uma analogia com a luz, assim como as radiações eletromagnéticas possuem um espectro de frequências, pode-se variar a frequência de propagação do som, obtendo um tipo inaudível pelos seres humanos. O ouvido humano consegue perceber ondas sonoras nas frequências entre aproximadamente 20 Hz e 20 KHz. Nesse sentido, a Figura 3 ilustra a classificação das ondas sonoras por faixa de frequência.

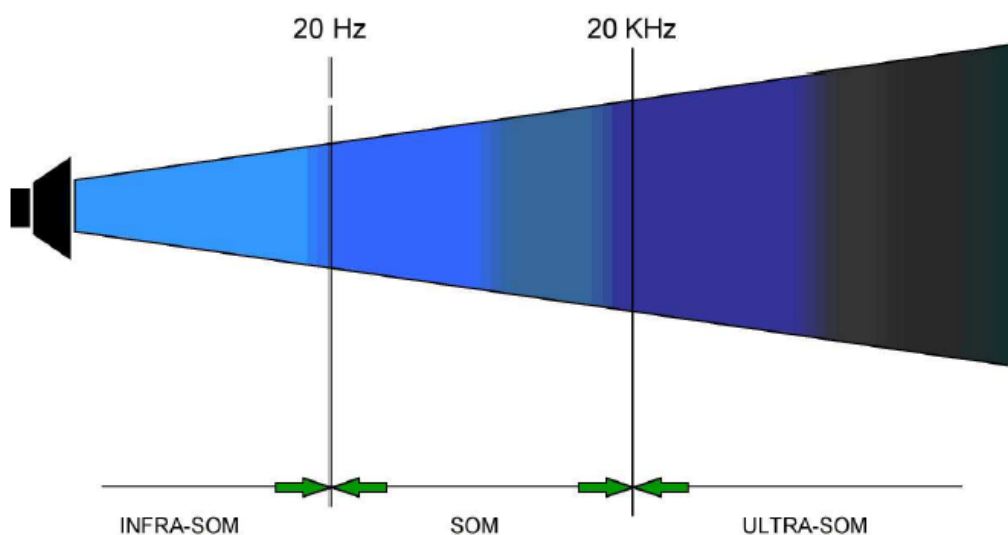


Figura 3: Classificação de ondas sonoras
Fonte: MAYWORM, 2012

Frequências abaixo da faixa percebida pelo homem são chamadas de infrassônicas, enquanto frequências acima do máximo audível pelo homem dão origem a ondas de ultrassom.

2.1.3 Velocidade de propagação

A velocidade de propagação de uma onda é determinada pelo quociente entre a distância percorrida e o tempo. Essa propriedade é característica do meio; por conseguinte, o princípio acústico usado no transdutor de ultrassom baseia-se na expressão clássica para velocidade de propagação do som no gás (KAIMAL; BUSNGER, 1963), expressa por:

$$C = \sqrt{\frac{RT\gamma}{M}} \quad (1)$$

Em que $R = 8,3143 \text{ J/mol.K}$ é a constante universal dos gases, $\gamma = 1,4$ é o quociente entre os calores específicos a pressão constante (C_p) e o volume constante (C_v), M é a massa molecular do ar atmosférico que corresponde a $28,9644 \text{ g/mol}$ e T é a temperatura em Kelvin (DELMÉE, 1995; LIVI, 2004). Assim, a velocidade de propagação da onda ultrassônica no ar está vinculada à temperatura e também pode ser determinada pela seguinte equação:

$$C = 20,05\sqrt{273,15 + T_c} \quad (2)$$

Sendo T_c a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

2.1.4 Atenuação

A onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia (ADEUCCI, 2014). Em consequência disso, a amplitude do sinal de ultrassom será menor em um ponto mais distante do que em um ponto mais próximo da fonte geradora.

A absorção atmosférica depende da frequência, umidade relativa, temperatura e pressão atmosférica (LARSON, 1996). As Figuras 4 e 5 mostram a absorção atmosférica para diferentes frequências e umidade relativa a 15°C e para 0°C respectivamente.

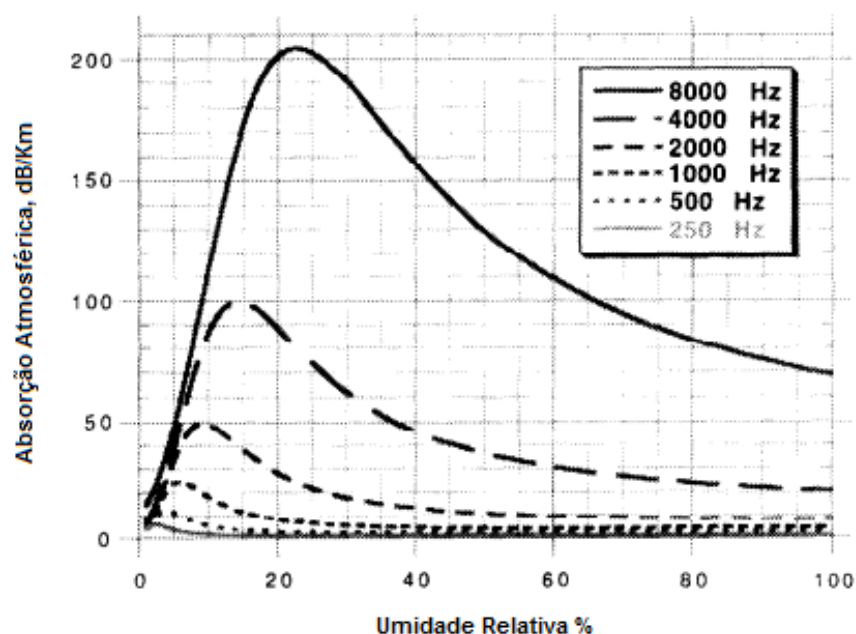


Figura 4: Variação da absorção atmosférica com a umidade relativa a 15 °C
Fonte: LARSSON, 1996

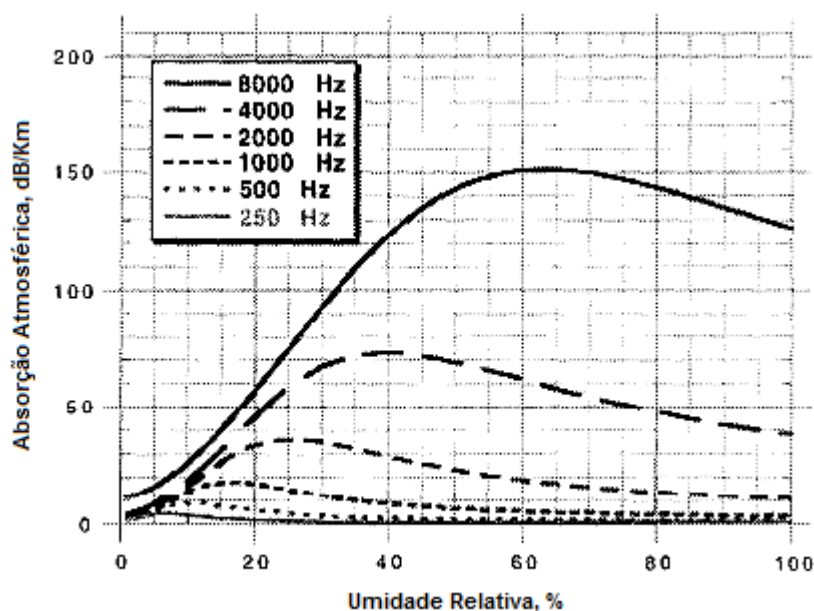


Figura 5: Variação da absorção atmosférica com a umidade relativa a 0 °C
Fonte: LARSSON, 1996

Da análise dos dois gráficos, observa-se que à temperatura de 15 °C existe maior atenuação para valores de umidade relativa baixos, aproximadamente 20%, e altas frequências. Enquanto que à temperatura de 0 °C, a absorção é máxima em valores de umidade relativa em 50%. Ao se comparar os gráficos, verifica-se que para temperaturas mais baixas, a absorção é, também, mais baixa.

Somando-se os efeitos de absorção e dispersão, segundo (FILIPPIN, 2017), a taxa de decaimento energético da onda, quando se propaga pelo material, segue em geral um comportamento exponencial, dado pela expressão:

$$A(D) = A_0 e^{-KD} \quad (3)$$

Nesse caso, A é a amplitude instantânea medida em um ponto específico após a onda ter se propagado por uma distância D ; A_0 é a amplitude máxima sem atenuação; K é uma constante ou coeficiente de atenuação.

O gráfico da Figura 6 ilustra a atenuação de um sinal ultrassônico recebido em função da distância.

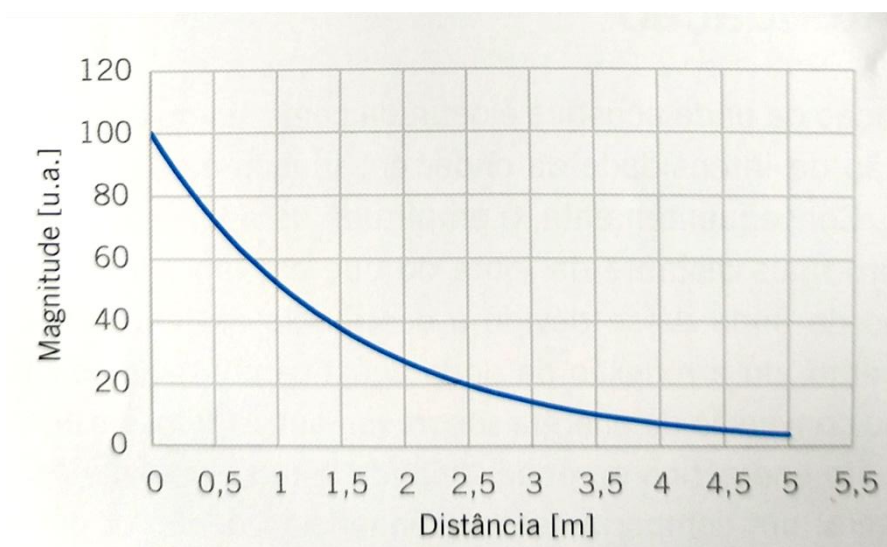


Figura 6: Curva típica de atenuação
Fonte: FILIPPIN, 2017

No gráfico, o eixo vertical indica a intensidade do sinal adimensional, pois é a amplitude do sinal transmitido dividido pela amplitude do sinal recebido. No eixo horizontal, a distância dos transdutores ultrassônicos em metros (m).

É importante compreender que a atenuação é diretamente proporcional à frequência da onda. Quanto maior for a frequência, maior será a atenuação e, conseqüentemente a perda de energia por unidade de distância. Frequências baixas atenuam menos que frequências altas, ou seja, para uma mesma distância percorrida, a atenuação de uma onda de alta frequência será maior que a atenuação numa onda de baixa frequência (FILIPPIN, 2017).

2.2 TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Os transdutores que fornecem saídas elétricas têm sido favorecidos desde há muito tempo por razões da versatilidade que eles oferecem para conduzir estudos de sistemas, análises de produtos e controle de um processo industrial. (MURTY, 2010).

Os transdutores podem ser definidos como um complemento de um elemento sensor, com o objetivo de tornar possível a medição de determinada grandeza e com a função de gerar um sinal relacionado com a variável medida (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Além disso, o transdutor é um dispositivo utilizado em medição que fornece uma grandeza de saída, que tem uma relação determinada com a grandeza de entrada (VIM, 2012).

De acordo com (MURTY, 2010), o termo transdutor pode ser entendido como um dispositivo ou uma combinação de elementos, que responde à condição física ou estado químico de uma substância e desenvolve uma saída funcionalmente relacionada à magnitude do estímulo. Quando utilizado em medições de grandezas, os transdutores proporcionam uma saída proporcional à entrada. Assim, o transdutor de ultrassom transforma um sinal elétrico em um sinal mecânico e vice-versa.

A maioria dos sinais fornecidos pelos transdutores é analógico; por isso, estes sinais de saída exigem determinados processamentos de sinais analógicos antes de serem convertidos em sinais digitais. Naturalmente, certos sistemas de transdutores são projetados para fornecer sinais no domínio do tempo (frequência ou trem de pulso) para que os circuitos de contagem possam ser usados para fornecer saídas digitais (MURTY, 2010).

O crescente interesse em ter sistemas de sensores imunes à interferência eletromagnética, de natureza não invasiva e de resposta rápida, levou à adoção de ondas sonoras como meio para o desenvolvimento de sistemas sensores (MURTY, 2010). Dessa forma, a construção de transdutores ultrassônicos é baseada na utilização das propriedades dessas ondas.

Cada sistema de obtenção dos sinais ultrassônicos é composto por uma fonte e um detector com a frequência escolhida das ondas para se adequarem à aplicação. As ondas ultrassônicas são geradas e introduzidas no meio de propagação por meio de um transdutor transmissor que transforma um sinal elétrico em uma onda de pressão acústica, ao passo que na recepção uma pressão acústica

provoca alterações na forma física do transdutor receptor, modificando o sinal elétrico. Este efeito é chamado de piezoeletricidade, que corresponde à eletricidade devido à pressão (HELLIER, 2001).

O efeito piezoelétrico consiste na alteração das dimensões físicas de certos materiais quando da aplicação de um determinado campo elétrico, sendo que o efeito inverso também ocorre. Diversos materiais apresentam esse efeito: quartzo, sulfato de lítio, titanato de bário, metaniobato de chumbo (PMN) e titanato zirconato de chumbo (PTZ). Sendo os dois últimos os materiais piezoelétricos utilizados na construção de transdutores de ultrassom (HELLIER, 2001).

A Figura 7 apresenta as partes constituintes de um transdutor ultrassônico, cuja composição está elencada a seguir:

- Caixa – Invólucro plástico para proteção da parte interna do transdutor;
- Vibrador – Constituído de uma placa de metal e da cerâmica piezelétrica;
- Ressonador – Possui formato cônico projetado com o propósito de irradiar eficientemente as ondas de ultrassom geradas pela vibração e também a fim de concentrar de forma eficaz as ondas de ultrassom na parte central do vibrador;
- Base – Sustenta as partes internas do sensor;
- Terminais – Efetua a ligação de alimentação do ultrassom.

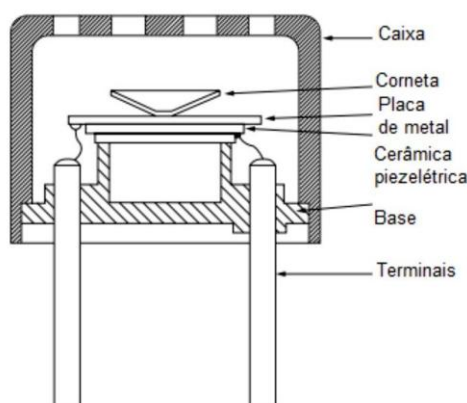


Figura 7: Estrutura de um transdutor ultrassônico
Fonte: Reproduzida de (MURATA, 2010).

Os transdutores ultrassônicos apresentam as seguintes características (DELMÉE, 1995; BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011):

- Baixa incerteza quando comparados a instrumentos que utilizam técnicas convencionais;

- Funcionamento com menor tempo de resposta, registrando mudanças bruscas de velocidade (turbulência);
- Capacidade de realizar medição com ou sem contato com o fluido;
- Inexistência de partes móveis;
- Resistência à corrosão.

As desvantagens que podem ser delineadas são: custo elevado, necessidade de calibração periódica e de manutenção especializada (DELMÉE, 1995; BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

É importante ressaltar que as características de frequência, potência e consequente faixa de atuação do transdutor ultrassônico dependem das especificações de projeto do mesmo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

2.3 TEMPO DE TRÂNSITO

O tempo de trânsito (*Time-of-Flight* – ToF) corresponde ao tempo de viagem da onda de ultrassom desde a transmissão até a detecção. Uma das variáveis que podem afetar o seu valor é a temperatura (LUCENA, 2018).

Segundo (HALLIDAY, 2009), a equação que determina a distância entre dois transdutores é definida por:

$$L = C \cdot \text{ToF} \quad (4)$$

Onde L é a distância entre os transdutores e C é a velocidade do som que é definida pela equação 2. Logo, o ToF teórico em função da velocidade do som e temperatura é:

$$\text{ToF} = \frac{L}{20.05\sqrt{273.15 + T_c}} \quad (5)$$

A Figura 8 apresenta a emissão de um sinal ultrassônico Tx e o sinal recebido Rx.

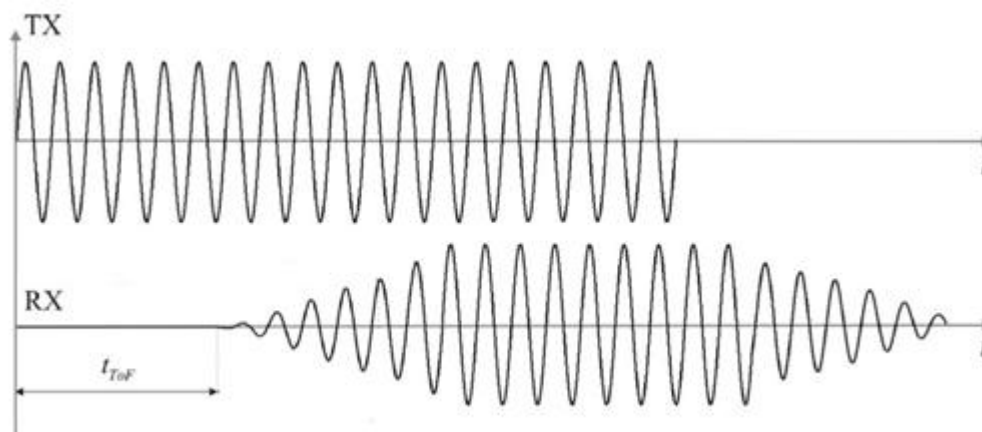


Figura 8: Tempo de trânsito ToF
Fonte: Reproduzida de (COSTA,2015)

Pode ser observado na figura o significado do ToF, que corresponde ao atraso de tempo de detecção do sinal pelo transdutor receptor.

2.4 SISTEMAS LINEARES E INVARIANTES NO TEMPO

Um sistema pode ser visto do ponto de vista matemático como uma interconexão de conexões que transformam um sinal de entrada em um sinal de saída com propriedades diferentes do sinal de entrada (HAYKIN; VEEN, 2001).

Considerando que um operador H denote a ação do sistema, a aplicação de um sinal de entrada contínuo $x(t)$ na entrada vai produzir o sinal de saída $y(t)$ que pode ser descrito por:

$$y(t) = H\{x(t)\} \quad (6)$$

Diz-se que um sistema é invariante no tempo se um retardo ou avanço de tempo no sinal de entrada levar a um deslocamento de tempo no sinal de saída (HAYKIN; VEEN, 2001). Independente do sinal de entrada, o sistema invariante não irá se modificar com o tempo, caso contrário o sistema é variante.

Um sistema é linear se ele satisfizer o princípio da superposição. Ou seja, a resposta de um sistema linear a uma soma ponderada de sinais de entrada é igual a mesma soma ponderada de sinais de saída, sendo cada sinal de saída associado a um sinal de entrada particular que age no sistema independente dos outros sinais de entrada (HAYKIN; VEEN, 2001). Segundo (MAYA; LEONARDI, 2003) os sistemas

reais são não lineares, no entanto eles podem se comportar como lineares dentro de certos limites.

Matematicamente, sistemas LTI podem ser expressos por equações diferenciais ordinárias com seus parâmetros constantes. E estes parâmetros e seus devidos limites são definidos de acordo com o comportamento físico do sistema.

2.5 REPRESENTAÇÕES DE FOURIER PARA SINAIS

Segundo (OPPENHEIN, 2010), é vantajoso no estudo dos sistemas LTI representar sinais como combinações lineares de sinais básicos para construir uma classe ampla e útil de outros sinais. Para essa representação alternativa, usa-se as séries e transformadas de Fourier.

A representação de Fourier para sinais é realizada pela soma ponderada de senoides complexas. Há quatro representações de Fourier distintas, cada uma aplicável a uma classe diferente de sinais. Estas quatro classes são definidas pelas propriedades de periodicidade de um sinal, mostrando se ele é de tempo contínuo ou discreto (HAYKIN; VEEN, 2001). São elas:

- Série de Fourier (*Fourier Series* - FS): aplica-se a sinais periódicos e contínuos no tempo;
- Série de Fourier de tempo discreto (*Discrete Time Fourier Series* - DTFS): aplica-se a sinais periódicos de tempo discreto;
- Transformada de Fourier de tempo discreto (*Discrete Time Fourier Transform* - DTFT): aplica-se a sinais de tempo discreto não periódicos;
- Transformada de Fourier (*Fourier Transform* - FT): aplica-se a sinais de tempo contínuos e não periódicos.

O sinal emitido pelo transdutor nesse trabalho foi contínuo e periódico, pois não apresenta variação de período com o passar do tempo. No entanto, técnicas de processamento digital exigem que o sinal seja discretizado no tempo.

Cálculos numéricos da Transformada de Fourier de um sinal necessitam dos valores amostrados, pois um computador digital pode trabalhar somente em dados discretos. Além disso, um computador pode calcular a transformada com amostras do sinal (LATHI, 2007).

Esse método é chamado de Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT), em que é calculada a Série de Fourier de Tempo Discreto (DTFS) por meio de amostras discretizadas do sinal contínuo, permitindo que o sinal seja processado e analisado digitalmente em comprimentos finitos.

A DFT é a representação de Fourier adequada para uso em computador digital porque é discreta e possui comprimento finito nos domínios de tempo e frequência (LATHI, 2007).

2.5.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Pela identidade de Euler, podem-se relacionar sinais exponenciais complexos com sinais senoidais (OPPENHEIN):

$$e^{j\omega_0 t} = \cos(\omega_0 t) + j\sin(\omega_0 t) \quad (7)$$

A partir desta identidade, torna-se possível representar um sinal a partir da soma ponderada de senoides complexas.

A transformada discreta de Fourier de um sinal $x[n]$, representada por $X[k]$ é definida por (HAYKIN; VEEN, 2001):

$$X[k] = \sum_{n=(N)} x[n] \cdot e^{-jk\Omega_0 n} \quad (8)$$

$k = 1, 2, \dots, N-1$, em que k é o número de amostras e cada coeficiente desta sequência está associado a uma senoide complexa.

A partir dos valores de $X[k]$, os valores de $x[n]$ podem ser determinados pela inversa da DFT:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=(N)} X[k] \cdot e^{jk\Omega_0 n} \quad (9)$$

Em que $x[n]$ tem período fundamental N , e $\Omega_0 = 2\pi/N$.

A representação de Fourier proporciona uma representação dos espectros de amplitude e da fase no domínio da frequência, possibilitando uma forma mais apropriada de analisar as características do sinal.

Para exemplificação, considere-se um sinal contínuo ilustrado na Figura 9 cuja expressão é dada por:

$$X(t) = 1. \cos\left(2\pi.15t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (10)$$

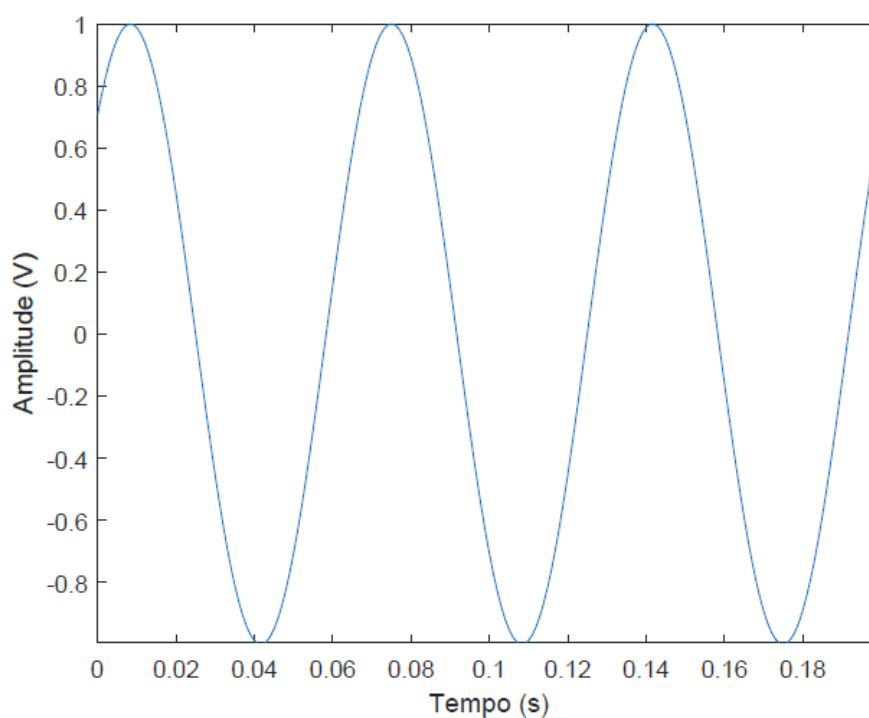


Figura 9: Representação gráfica de um sinal contínuo
Fonte: Elaborada pelos autores

De acordo com a expressão, têm-se uma cossenoide com frequência $f=15$ Hz e um ângulo de fase $\Phi = -\pi/4$ rad.

Ao se plotar o sinal contínuo da amplitude em função do tempo, não se torna possível analisar frequências e fases. No entanto, a representação de Fourier permite isso por meio de dos espectros de magnitude e de fase.

Discretizar este sinal com uma taxa de amostragem de $F_s = 250$ Hz resulta a representação da Figura 10.

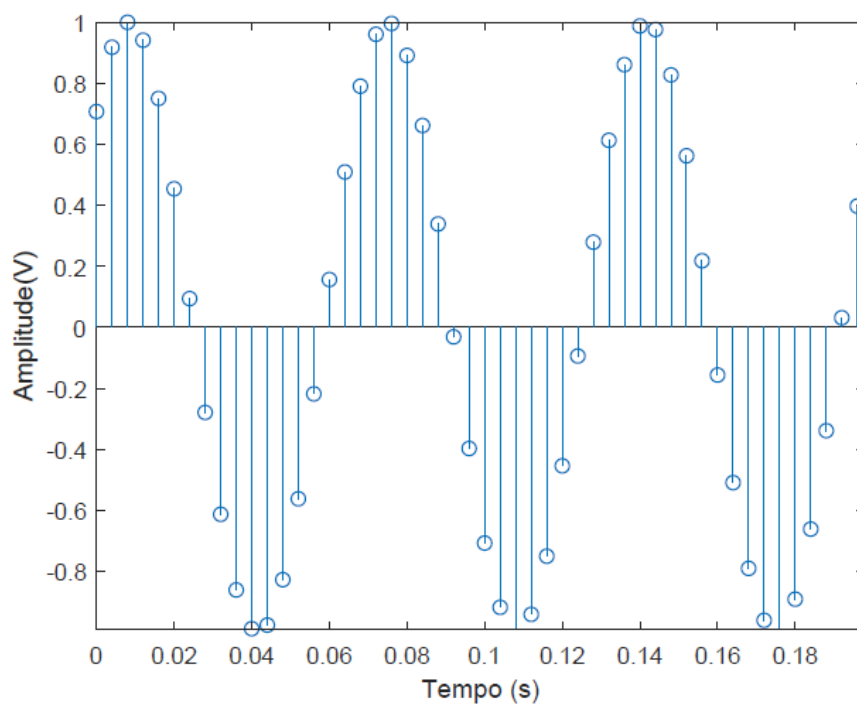


Figura 10: Representação gráfica do sinal discretizado
Fonte: Elaborada pelos autores

Ao aplicar a DFT a este sinal, é gerado um sinal $X[k]$ que contém informações de magnitude e de fase. O espectro de magnitude e de fase está ilustrado nas Figuras 11 e 12 respectivamente.

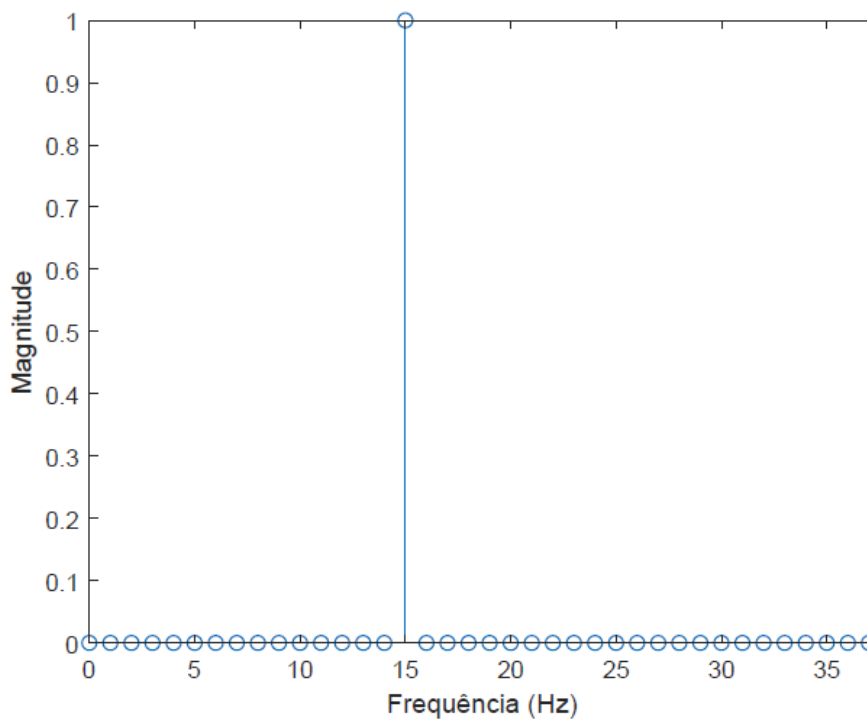


Figura 11: Representação do espectro de magnitude
Fonte: Elaborada pelos autores

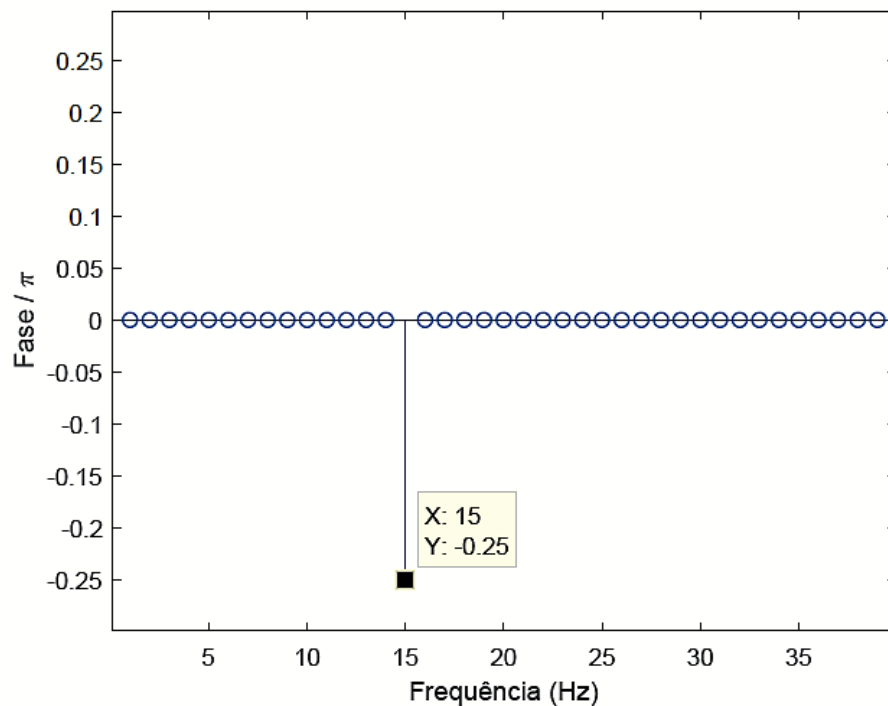


Figura 12: Representação do espectro de fase
Fonte: Elaborada pelos autores

Ao analisar o espectro de magnitude, verifica-se que ele apresenta as componentes de amplitudes das cossenoides de acordo com a frequência de cada uma delas. Ele informa que há uma cossenoide de 1 V de amplitude com 15 Hz de frequência.

Já o espectro de fase, traz informações relativas ao ângulo de defasagem das cossenoides que formam o sinal e a frequência. Como se pode observar na Figura 12, os valores de ângulo de defasamento são $\Phi = (-\pi/4)/\pi = -1/4 = -0,25 \text{ rad}/\pi$ localizado na frequência do sinal $f = 15 \text{ Hz}$.

2.5.2 Estimação da diferença de fase pela DFT

Considerando um transdutor que emite um sinal e outro transdutor que recebe este sinal que se propaga no meio, a detecção do sinal recebido é realizada a partir de um nível de referência chamado limiar (COSTA, 2015).

Após a detecção do nível de limiar há o armazenamento dos dados do sinal transmitido e recebido a uma frequência de amostragem (F_s). A estes sinais amostrados é aplicada a DFT.

De posse das fases dos sinais transmitido e recebido e com a realização da subtração entre estas fases, determina-se o valor de diferença de fase ($\Delta\phi_{TxRx}$) entre sinais Tx e Rx baseada na DFT, por meio de (COSTA, 2015):

$$\Delta\Phi_{TxRx} = \Phi_{Tx} - \Phi_{Rx} \quad (11)$$

A partir desta equação, pode-se então encontrar o tempo de defasagem por meio da equação 12:

$$t = \left| \frac{\Delta\Phi_{TxRx}}{2\pi f_0} \right| \quad (12)$$

Em que $\Delta\Phi_{TxRx}$ é a diferença de fase entre a onda transmitida e recebida e f_0 é a frequência de operação dos transdutores ultrassônicos.

A figura 13 ilustra o procedimento de determinação da diferença de fase e do tempo de defasamento.

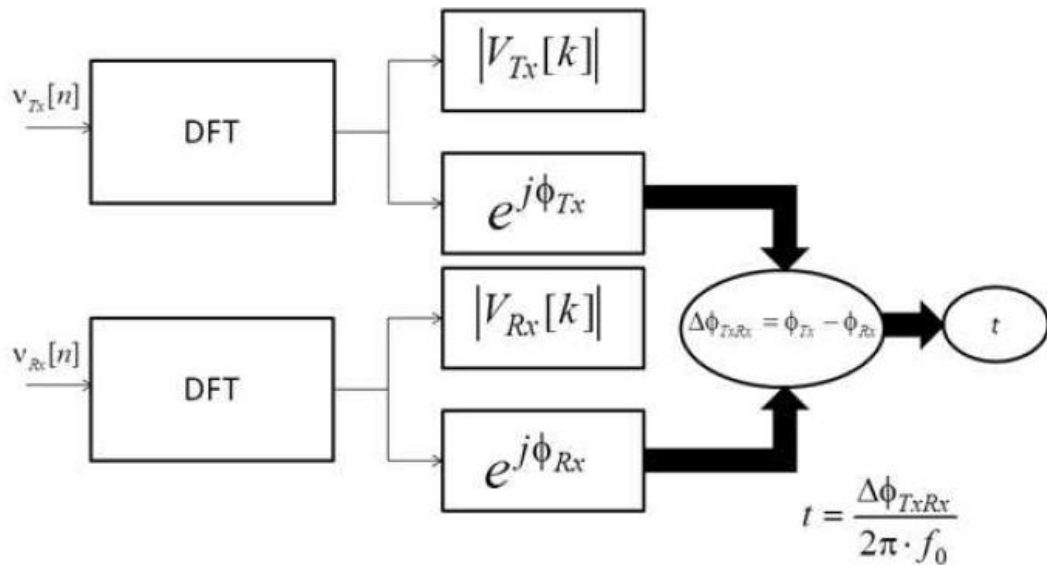


Figura 13: Representação do procedimento para determinação de fase e de tempo de defasamento
Fonte: Reproduzida (COSTA, 2015)

2.6 CORRELAÇÃO CRUZADA

A correlação cruzada (CC) é uma operação entre duas sequências, cujo objetivo consiste em medir a similaridade que existe entre elas, por meio da extração de informações que dependem da aplicação considerada (VILLANUEVA, 2009). No

caso deste trabalho a variável a ser encontrada é o ToF e para isso, deve-se considerar as sequências digitais $x[n]$ como sendo as amostras do sinal transmitido e $y[n]$ como as amostras do sinal recebido.

O sinal recebido é retardado e atenuado em relação ao sinal transmitido. Segundo (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996), o sinal recebido pode ser expresso por:

$$y[n] = Ax[n - \tau] + \omega[n] \quad (13)$$

Onde A denota o fator de atenuação, τ é o atraso relativo ao sinal transmitido (ToF) e $\omega[n]$ é o ruído aditivo associado ao sistema que é captado pelo transdutor receptor.

Considerando as sequências de amostras dos sinais recebidos, o problema consiste em calcular o tempo de atraso à medida que se varia a temperatura. Para isso, calcula-se a correlação cruzada destes sinais, em que o índice da posição do valor máximo do resultado da operação é relacionado ao tempo de defasagem (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996). Portanto, ao calcular a correlação cruzada dos dois sinais, o ponto no eixo do tempo onde o $R[x,y]$ é máximo, é o valor do atraso entre os sinais.

Segundo (COSTA, 2015), a correlação de dois sinais é definida por:

$$R[x, y] = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{n-1} x[n]y[n + \tau] \quad (14)$$

Onde: n é o número de pontos de dados e K é um fator de normalização igual à soma dos quadrados dos valores armazenados de $x[n]$.

Com exceção do espelhamento de uma das sequências em torno do zero, as operações da correlação cruzada são idênticas às da convolução: deslocamento de uma das sequências, multiplicação das sequências e a soma dos valores (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996).

A Figura 14 apresenta dois sinais defasados no tempo.

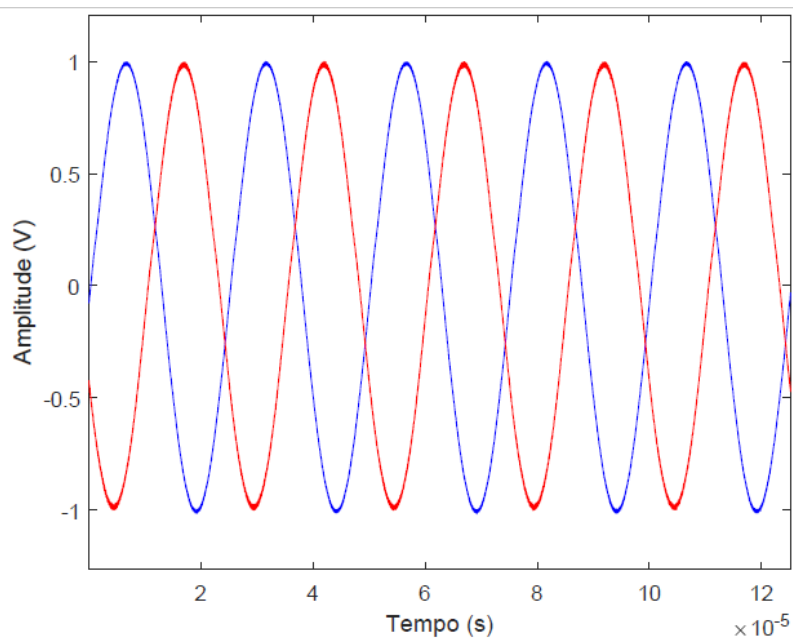


Figura 14: Sinais Defasados no Tempo
Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 15 tem-se a correlação cruzada dos sinais $R[x,y]$ apresentados na Figura 14.

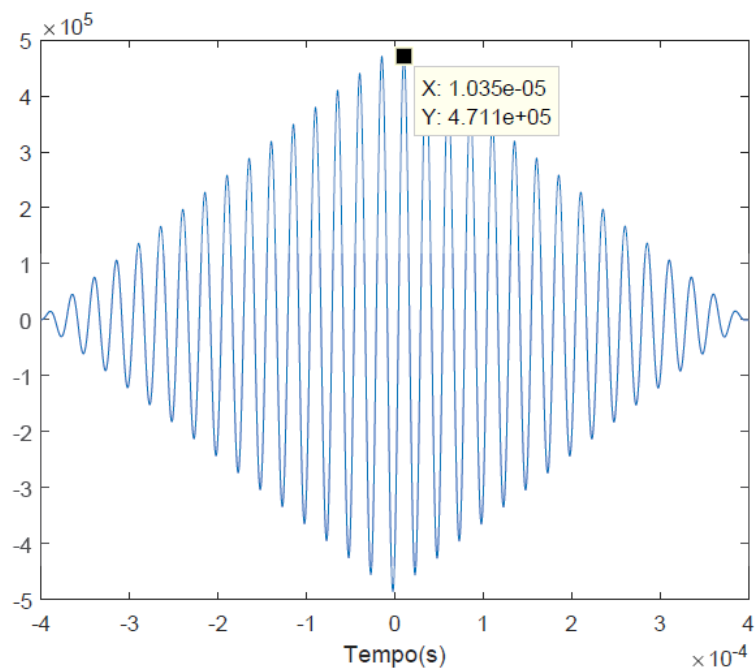


Figura 15: Correlação Cruzada
Fonte: Elaborada pelos autores

Observa-se que o ponto máximo no eixo vertical da correlação indica no eixo x o tempo de defasamento entre os dois sinais senoidais. Comparada com técnicas tradicionais, a correlação cruzada exige maior complexidade, tendo em vista que para obtenção de resultados satisfatórios é necessário alta taxa de amostragem, culminando numa elevada carga computacional (MARINHON, 2007).

2.7 ANÁLISE DO RUÍDO SOBRE SINAIS

O ruído é um sinal interferente de natureza aleatória que provoca degradação de sinal principal durante seu processamento. Ou ainda, pode-se considerar um ruído como sendo qualquer fonte de erro ou deformação (OLIVEIRA, 2007).

O sinal emitido por transdutores ultrassônicos está sujeito a interferências do meio que se propaga, caracterizando em ruídos que podem ser multiplicativos ou aditivos. Segundo (COSTA, 2015), o ruído aditivo influencia na medição de incerteza de fase, culminando numa incerteza de medição do ToF.

A incerteza de medição (desvio padrão - σ) é um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a grandeza submetida à medição (VIM, 2012).

O sinal recebido pelo transdutor receptor depende dos níveis de ruídos presentes no meio de transmissão. A quantificação da incerteza causada pelo ruído aditivo é dada por:

$$SNR_A = 20\log\left(\frac{v_M}{\sigma_A}\right) \text{ dB} \quad (15)$$

Em que SNR_A é a relação sinal-ruído entre o nível máximo do sinal e do ruído aditivo, σ_A representa o desvio padrão para o ruído aditivo e v_M a tensão máxima do sinal.

A Figura 16 apresenta um sinal sem ruído e a Figura 17 o mesmo sinal mas com um ruído aditivo.

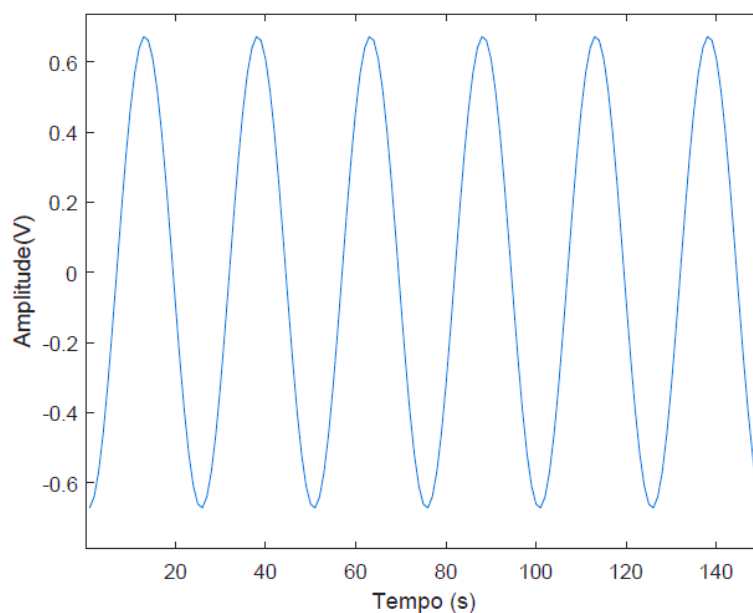


Figura 16: Representação de sinal sem ruído
Fonte: Elaborada pelos autores

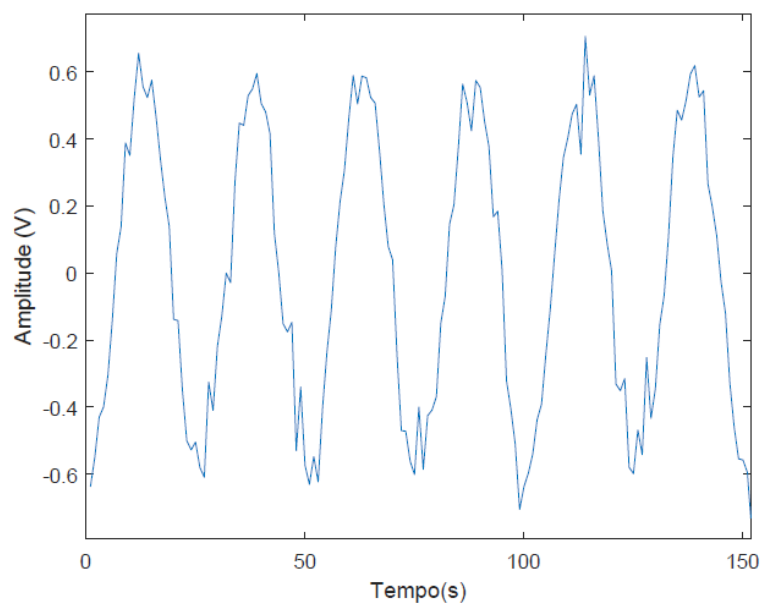


Figura 17: Representação de sinal com ruído aditivo
Fonte: Elaborada pelos autores

Da observação dos gráficos apresentados nas Figuras 16 e 17, verifica-se que há mudança significativa no sinal quando adicionado um ruído. Isso pode afetar significativamente na estimação do tempo de atraso de sinais.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Foi desenvolvido um protótipo a fim de realizar o controle de temperatura e consequentemente as medições dos sinais obtidos do par de transdutores ultrassônicos, conforme representado na Figura 18.

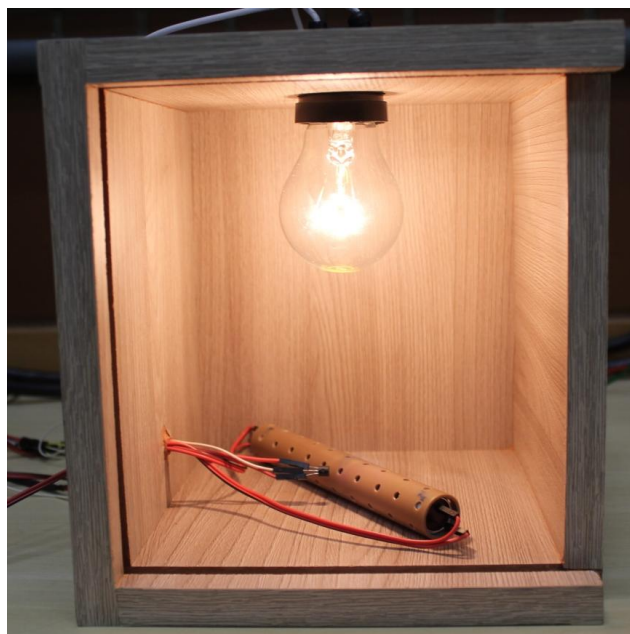


Figura 18: Composição interna do protótipo do sistema

O protótipo foi montado em uma caixa de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard* - placa de fibra de média densidade) para que as medições fossem realizadas em um ambiente fechado, de modo que minimizasse as interferências externas e perturbações ao sistema, de modo que se obtivesse melhor desempenho do estudo realizado. O protótipo é composto por uma lâmpada incandescente de 40 W como fonte de calor, um elemento sensor de temperatura (LM35) e um par de transdutores ultrassônicos separados por uma distância fixa. O transdutor 400ST160 (Transmissor - T_x) foi conectado a um gerador de funções e a um canal de um osciloscópio e o transdutor 400SR160 (Receptor - R_x) foi conectado a outro canal do osciloscópio.

O esquema da Figura 19 ilustra a montagem do sistema para a medição e aquisição dos sinais ultrassônicos. O sinal gerado pelo gerador de funções é transmitido pelo transdutor transmissor ao transdutor receptor submetido à uma

variação de temperatura. O osciloscópio é conectado ao gerador de funções e ao transdutor receptor para aquisição dos sinais emitidos e recebidos. A partir da aquisição, os sinais foram processados digitalmente por meio da ferramenta computacional Matlab.

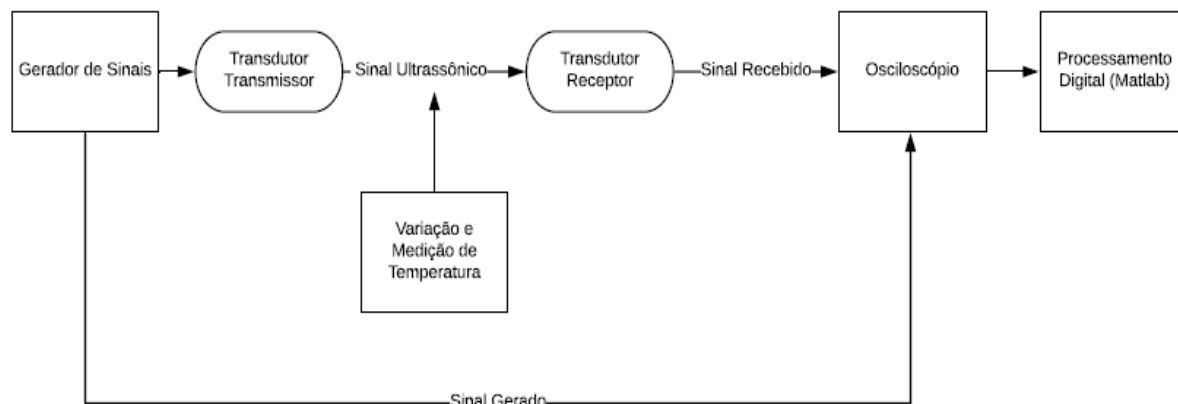


Figura 19: Esquematização do sistema para aquisição de sinais
Fonte: Elaborada pelos autores

Para se obter a variação da temperatura por meio da lâmpada foi necessário a implementação de um sistema que conectou circuitos conforme o esquema ilustrado pela Figura 20.

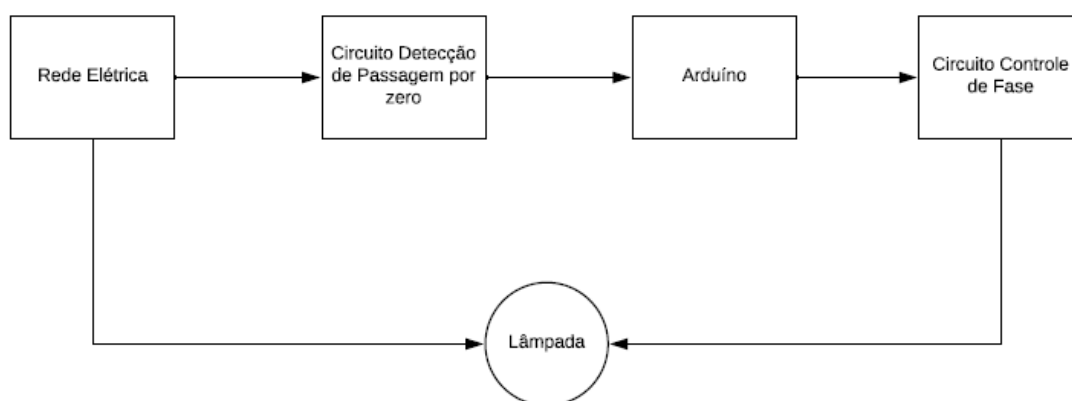


Figura 20: Esquema de conexão de circuitos à lâmpada
Fonte: Elaborada pelos autores

A partir da alimentação da rede elétrica, tem-se um circuito de detecção de passagem por zero responsável pelo sincronismo, este é conectado ao arduíno que é responsável pela programação do circuito de controle de fase que varia a luz emitida pela lâmpada e, conseqüentemente, a temperatura. O detalhamento dos circuitos citados está apresentado nos tópicos seguintes.

3.2 CONTROLE DE FASE

Para realizar a variação de temperatura no protótipo por meio do aquecimento da lâmpada incandescente, foi necessário dispor do controle de fase com o objetivo de determinar a disponibilidade de potência à carga.

Adotou-se o controle por meio de tiristor. O tiristor é um dispositivo semicondutor de quatro camadas, de estrutura PNPN, com três junções PN e que possui três terminais: anodo, catodo e gatilho. Os terminais anodo e catodo, quando polarizados diretamente, começam a conduzir apenas se receber um comando no terminal gatilho. Uma vez conduzindo ele se comportará como um diodo em condução e não há controle sobre o dispositivo. A corrente de anodo é conservada abaixo da corrente de manutenção por um tempo suficientemente grande, de forma que todos os portadores em excesso nas quatro camadas sejam eliminados ou recombinados. No controle de fase, em um dado semiciclo da rede, o tiristor é acionado em um determinado instante e faz com que a carga esteja conectada à rede por um intervalo de tempo menor ou igual ao semiciclo (ALMEIDA, 2003). Os tiristores SCR (*Silicon Controlled Rectifier* – Diodo Controlado de Silício) e TRIAC (*Triode for Alternating Current* - Triodo para Corrente Alternada) funcionam como chaves com acionamento controlado e, por isso podem ser usados no controle de potência em uma carga.

A diferença entre SCR e TRIAC é que enquanto o SCR conduz apenas no semiciclo positivo, o TRIAC pode conduzir também no semiciclo negativo, por se tratar de uma chave semicondutora com um terminal de porta adicionado para controlar a passagem ao estado ligado, conduzindo corrente nas direções direta e inversa. Por esses motivos, o TRIAC é útil para o controle de potência AC (*Alternating Current* - Corrente Alternada) (AHMED, 2000).

Portanto, a temperatura analisada nesse trabalho foi decorrente de uma carga de aquecimento (lâmpada incandescente), cujo controle de potência disponibilizada a ela foi realizado por meio do TRIAC BT137. A Figura 19 ilustra o circuito utilizado para o controle de fase.

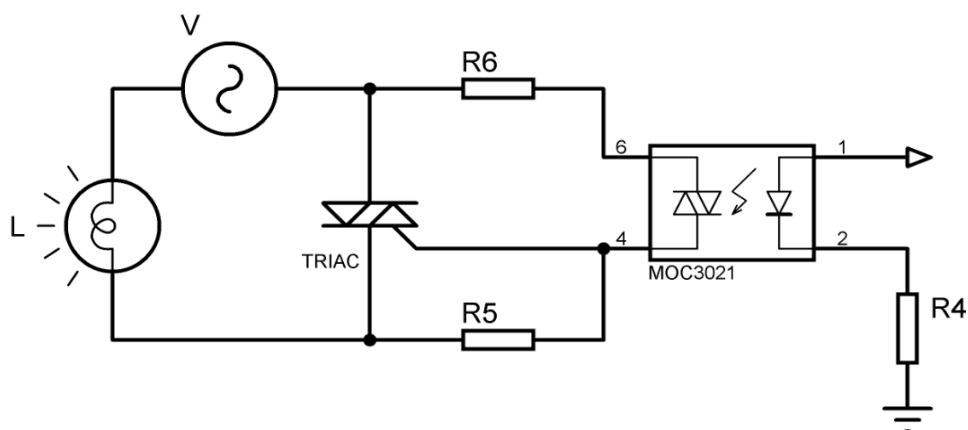


Figura 21: Circuito de controle de fase
Fonte: Elaborada pelos autores

O controle do ângulo de disparo foi realizado por meio de botões associados ao circuito, empregando para isso programação junto ao microcontrolador Arduino. Este dispositivo pode processar entradas e saídas entre o circuito e os componentes externos conectados a ele. Com o auxílio do Arduino, o sistema pode interagir por meio de *hardware* e *software*.

Para que os circuitos de sinal, utilizados na etapa de disparo, não sejam afetados pelas tensões e correntes dos circuitos de potência, é necessário isolá-los de forma que não haja percurso para a corrente de um lado para outro do circuito. Nesse trabalho essa isolação se deu com o emprego de acopladores ópticos. Estes são constituídos por um LED (*Light Emitting Diode* - diodo emissor de luz) infravermelho e um fotodetector.

No circuito de controle de fase apresentado foi utilizado o MOC3021, um optoacoplador cujo fotodetector é um TRIAC. Por meio do terminal 1 deste dispositivo, foram dados os pulsos de disparo necessários ao controle.

3.3 CIRCUITO DETECTOR DE PASSAGEM POR ZERO

Os circuitos de disparo controlado por fase devem ser sincronizados com a rede elétrica para que não ocorram disparos aleatórios do TRIAC. Logo, a passagem da rede por zero é uma referência necessária para manter esse sincronismo do pulso toda vez que a rede passar por 0V.

O circuito da Figura 20 delinea a detecção de passagem por zero para a finalidade de sincronismo.

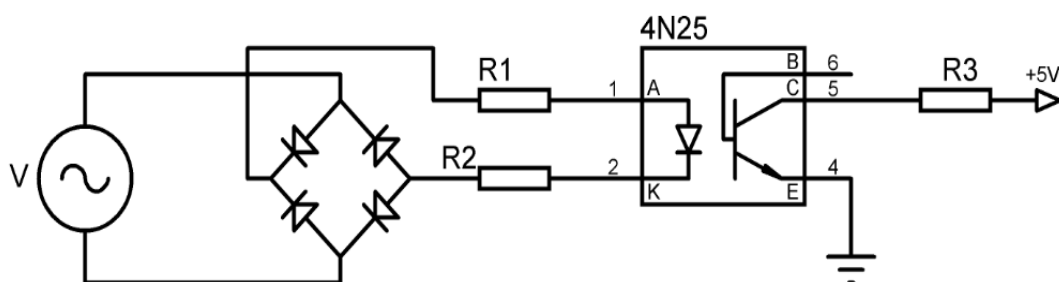


Figura 22: Circuito para detecção de passagem por zero
Fonte: Elaborado pelos autores

No circuito de detecção de passagem por zero foi utilizado um optoacoplador 4N25, cujo fotodetector é um transistor.

Para que o LED do optoacoplador conduza também quando a tensão AC da rede estiver no semiciclo negativo, é necessário realizar a retificação da onda resultante dessa alimentação. A retificação é um processo que converte tensão e corrente alternadas em tensão e corrente contínuas (AHMED, 2000). Pode ser obtida por meio de um retificador de onda completa em ponte, com a utilização de diodos.

Uma vez que a tensão for suficiente para que o LED conduza, o transistor interno do optoacoplador 4N25 estará em estado de saturação, atuando como uma chave fechada, e então a corrente resultante da fonte de tensão de 5 V irá para o referencial terra. Quando a tensão se aproximar de zero ao ponto do LED não conduzir, então o transistor atuará como chave aberta e a corrente circulará pelo resistor R3, com saída para a placa do Arduino.

Além de cumprir essa função de detectar a passagem por zero, o 4N25 também isola uma parte do circuito de alta tensão de outra parte do circuito de baixa tensão.

3.4 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

A temperatura de um corpo é um dos parâmetros fundamentais pelos quais o grau de calor ou frio é identificado. Quando uma substância adquire ou libera calor, ela é refletida por meio de algumas mudanças em suas dimensões físicas e estado, que constituem o principal meio pelo qual a medição de temperatura é realizada (MURTY, 2010).

Assim, as técnicas e sistemas de medição desenvolvidos baseiam-se nas leis da natureza e a evolução dessas técnicas, ao longo do tempo, levou ao desenvolvimento de sistemas indicadores para algumas grandezas físicas. A identificação de fenômenos físicos resulta no desenvolvimento de sistemas de medição que interagem com a quantidade sob medição e desenvolvem sinais de saída na forma de deslocamentos lineares ou angulares que podem ser transmitidos a um ponteiro em uma escala, por exemplo (MURTY, 2010).

Dispositivos semicondutores são sensíveis à temperatura e podem, portanto, ser utilizados como sensores de temperatura. Dessa forma, eles são baseados na sensibilidade à temperatura de semicondutores, como germânio e silício. As principais vantagens na utilização destes são a linearidade, os circuitos simples e a boa sensibilidade. A principal desvantagem é a limitação da faixa de temperatura, restringindo-se a aproximadamente 200 °C, visto que acima desse valor esses dispositivos podem ser danificados (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006).

Em relação à fabricação de componentes de sensores semicondutores para temperatura, destaca-se a família LM135, LM253 e LM335, da *National Semiconductor*, que tem como característica a saída no formato de tensão analógica. Essa saída é proporcional à temperatura absoluta com uma sensibilidade de 10 mV/°C.

De igual modo, a família LM35, LM34 e LM45 é constituída por dispositivos com três terminais, que fornecem na saída uma tensão proporcional na escala °C (10 mV/°C) (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006).

Dessa forma, para realizar as medições de temperatura nesse trabalho foi utilizado o sensor LM35 com o objetivo de comparar tais medições com a temperatura identificada pelos transdutores ultrassônicos. De acordo com o fabricante, o LM35 apresenta faixa de temperatura de -55 °C a +150 °C e tensão de operação recomendada de 4 V a 30 V.

A configuração do sensor no sistema está representada na Figura 21. Este foi conectado ao Arduino, de modo que o terminal 1 foi energizado com 5 V, o terminal 3 foi vinculado ao terra e o terminal 2 apresentou os valores obtidos.

Uma vez que o LM35 apresenta tensão de saída linear relativa à temperatura, por meio de programação no Arduino foi possível apresentar um valor digital referente à temperatura que o sensor identificou dentro da caixa do protótipo. A

apresentação dos valores de temperatura coletados pelo sensor foi expressa no monitor serial do Arduino.

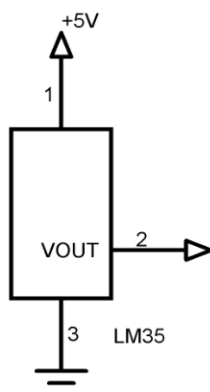


Figura 23: Configuração do LM35 no sistema de medição
Fonte: Elaborada pelos autores

Ao se considerar a faixa de temperatura operacional dos transdutores ultrassônicos e do sensor de temperatura LM35, foi possível definir a temperatura máxima que o sistema poderia apresentar, não podendo exceder $+70^{\circ}\text{C}$. Desta forma, foram realizadas medições para temperaturas de aproximadamente 22°C , 32°C e 42°C . Os resultados de temperatura considerados foram obtidos da média de 100 valores por faixa de temperatura, coletados do LM35 e exibidos no monitor serial. Foram registradas 20 (vinte) formas de onda dos sinais nos transdutores ultrassônicos de transmissão e recepção para cada faixa de temperatura.

3.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO

A Figura 22 ilustra a configuração dos transdutores posicionados com uma distância L pré-determinada. Neste trabalho foi estabelecida a distância fixa de 0,11 m no interior de um cilindro de PVC (Policloreto de Vinila) perfurado.

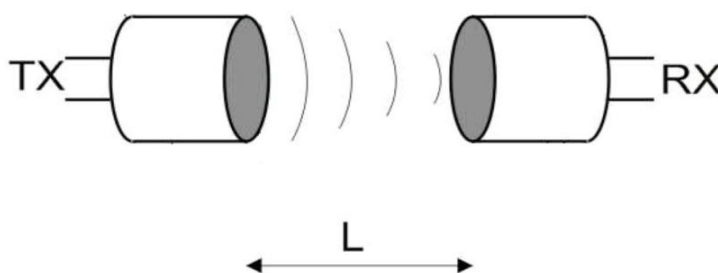


Figura 24: Posição dos transdutores ultrassônicos
Fonte: MOURA, 2015.

Foi utilizado um par de transdutores ultrassônicos cujos modelos são 400SR160 (Receptor - R_x) e 400ST160 (Transmissor - T_x) do fabricante *Pro-Wave Electronics*. Estes são transdutores de baixo custo, que funcionam com uma frequência nominal de 40 kHz e possuem faixa de temperatura operacional de -30 °C a +70 °C, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Para realização dos experimentos foi utilizado um gerador de forma de onda arbitrária fabricado pela Tektronix, modelo AFG3102C, responsável por gerar sinais contínuos senoidais, utilizado para excitar o transdutor transmissor (T_x). Para o registro das formas de onda no transdutor transmissor (T_x) e receptor (R_x) foram utilizados dois canais do osciloscópio digital Tektronix, modelo MSO3032.

Por meio da equação 5 foi calculado um ToF teórico para diferentes temperaturas, que foi comparado ao valor encontrado a partir da técnica de correlação cruzada e DFT. Os sinais resultantes das aquisições no osciloscópio foram processados digitalmente para estimação do ToF por essas técnicas.

As técnicas DFT e CC fornecem o tempo de defasamento entre os sinais e, para encontrar o ToF é somado um tempo de resposta dos transdutores ultrassônicos, assim como é subtraído um erro sistemático do sistema causado pela variação de temperatura.

Em decorrência disto, o tempo que deve ser somado ao tempo de defasamento encontrado por cada técnica e pode ser obtido pela Equação 16.

$$T_R = T_{tec} - ToF_{teo} \quad (16)$$

Onde T_R é o tempo de resposta em conjunto com o erro sistemático do sistema, T_{tec} é o tempo de defasamento obtido e ToF_{teo} é o tempo calculado a partir da equação 5.

3.6 SIMULAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RUÍDO

Como já foi constatado que o ruído aditivo pode interferir na estimativa no tempo de trânsito de sinais ultrassônicos, foi utilizado um sistema modelado por

(COSTA, 2015) na ferramenta computacional *Simulink* (Matlab®¹) que simula a transmissão de sinais ultrassônicos submetidos a um ruído aditivo. O *Simulink* é uma ferramenta integrada ao Matlab para modelagem, simulação e análise de sistemas. Apresenta uma interface gráfica por blocos e bibliotecas que possibilitam a criação e simulação de sistemas conforme a necessidade do usuário.

Para geração da onda senoidal é necessário a criação de três blocos: um gerador de pulso, um gerador de sinais senoidais e um bloco de multiplicação como ilustrado na Figura 25.

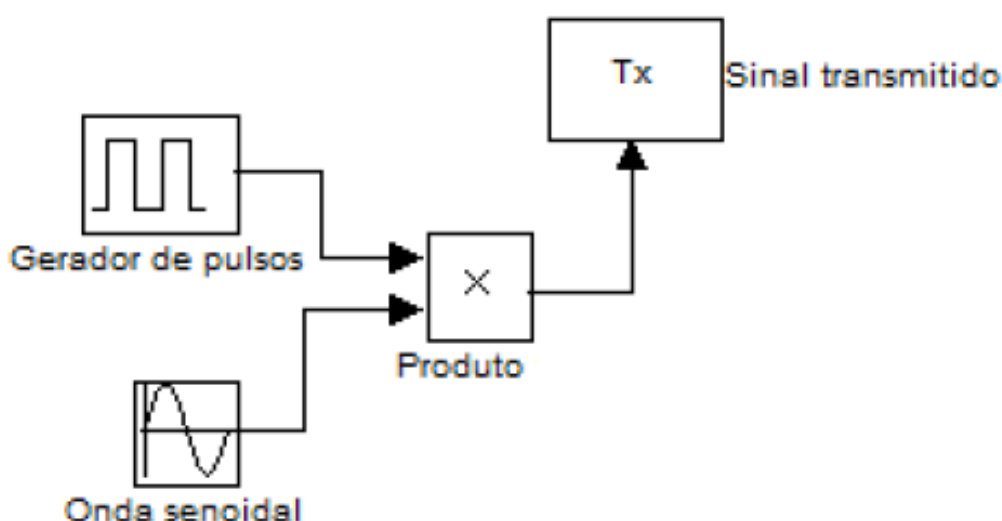


Figura 25: Gerador de onda senoidal – *Simulink*
Fonte: Reproduzida de (COSTA, 2015)

O bloco gerador de sinais é responsável por criar um sinal senoidal com uma frequência de 40 kHz (frequência de operação dos transdutores ultrassônicos). O bloco gerador de pulsos é responsável por gerar pulsos em intervalos regulares. E o bloco de multiplicação é utilizado para multiplicar o sinal senoidal e os pulsos, gerando uma quantidade determinada de ondas senoidais por meio de rajadas, que representam o sinal do transdutor emissor (Tx). A onda senoidal gerada está apresentada na Figura 24.

¹ Matlab/Simulink R2012a, licença nº 704766 para fins acadêmicos, em nome de ifto.edu.br (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, onde os autores exercem suas atribuições acadêmicas.

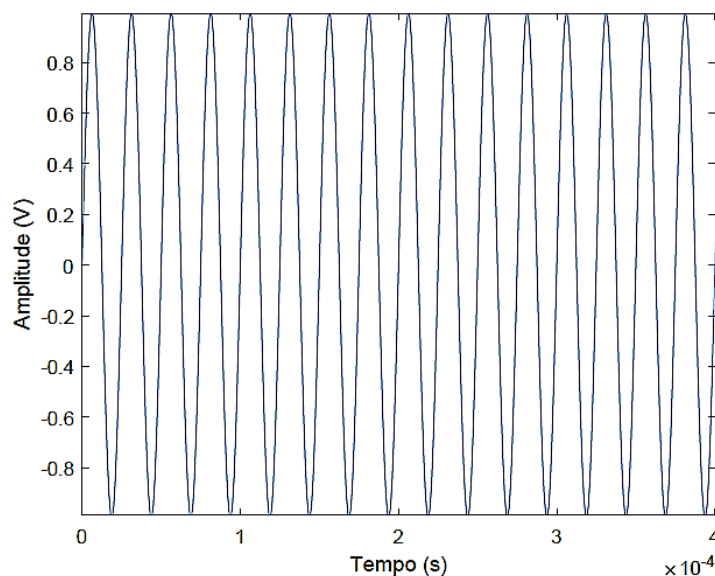


Figura 26: Sinal senoidal gerado transmitido de 40 kHz
Fonte: Elaborada pelos autores

Para simulação da onda senoidal recebida pelo transdutor receptor (Rx) é necessário um bloco responsável pelo atraso referente ao tempo de resposta dos transdutores e outro bloco referente ao tempo de atraso ToF. A Figura 25 representa um sinal atrasado, porém sem nenhum ruído aditivo.

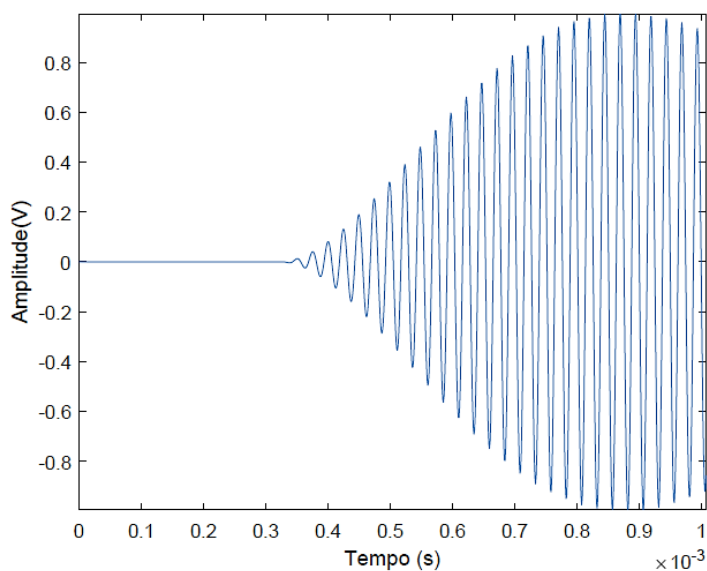


Figura 27: Sinal recebido no transdutor receptor Rx sem ruído.
Fonte: Elaborada pelos autores

Além dos blocos que simulam o atraso no sinal recebido, é fundamental inserir um bloco que represente o ruído aditivo. Para isso é incluído ainda um bloco que gera números aleatórios uniformemente distribuídos com média zero e desvio padrão μ_A . A Figura 26 ilustra o sinal Rx com um ruído aditivo $\mu_A=0,03$.

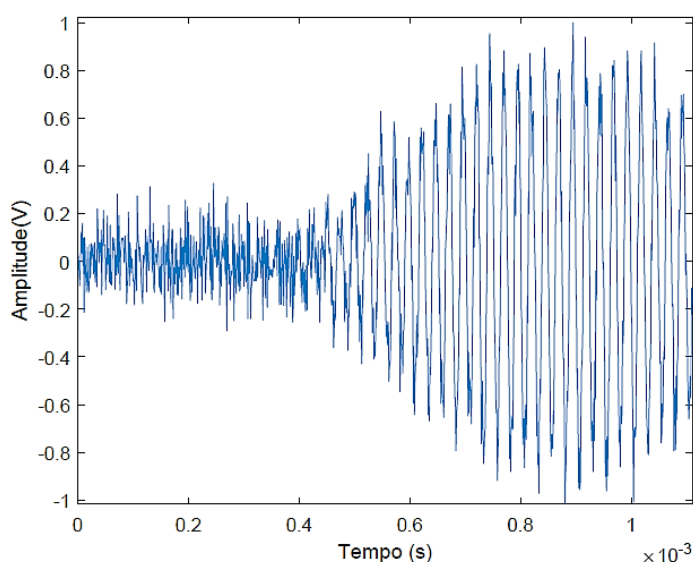


Figura 28: Sinal recebido no transdutor receptor rx com ruído aditivo
Fonte: Elaborada pelos autores

A Figura 27 apresenta todo o sistema de blocos no *Simulink* que integram com a programação feita em Matlab.

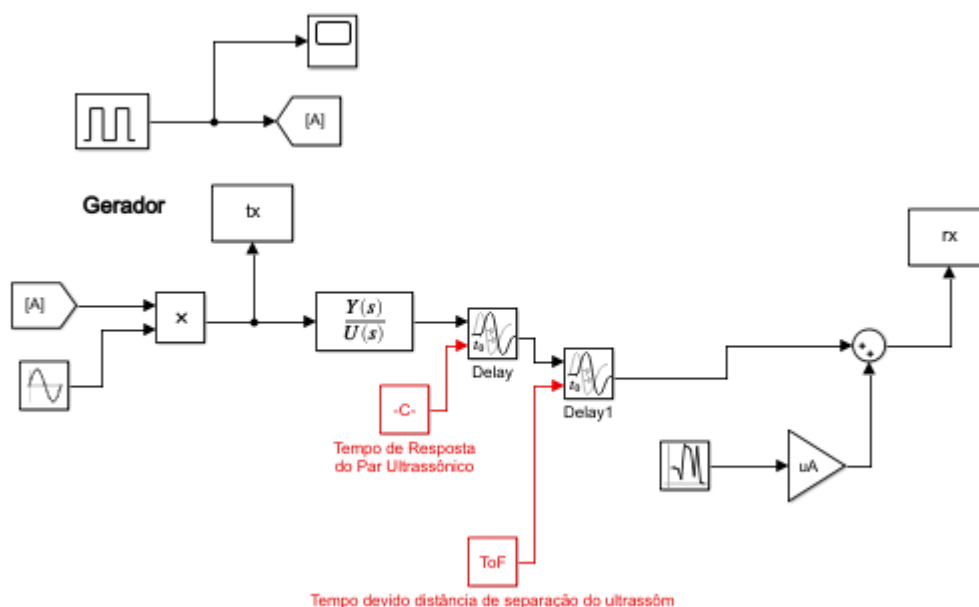


Figura 29: Conjunto de blocos desenvolvidos para análise de sinais sobre influência de ruídos
Fonte: Elaborada pelos autores

Com o sistema do Simulink integrado à programação do Matlab, foram calculados o ToF e as temperaturas de acordo com variação do ruído de $\mu_A = 0,01$ a $\mu_A = 0,05$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

De modo a avaliar as técnicas utilizadas nesse trabalho foi efetivada simulação, em que foram realizadas 20 interações para cada temperatura (22 °C, 32 °C e 42 °C) e para diferentes níveis de ruído aditivo ($u_A = 1\%$, 3% e 5%). Além disso, foi considerada a incerteza do ToF obtido em cada técnica e da temperatura.

O sistema na simulação foi configurado para frequência de 40 kHz (a mesma utilizada experimentalmente). Foi utilizada frequência de amostragem de 1 MHz e $T_R = 307,043 \mu s$ (Equação 16).

Como pode ser observado na Tabela 2, o ToF teórico encontrado na simulação corresponde a 319,343 μs para temperatura configurada em 22 °C. O desvio encontrado na primeira linha para ambas as técnicas é nulo, pois corresponde a uma simulação sem ruído ($u_A = 0$). Observa-se na mesma tabela que para os três níveis de ruídos propostos, foi obtida baixa incerteza de ToF, na ordem de 0,020 a 0,103 μs , para a técnica DFT, enquanto que para a técnica CC o ruído aditivo igual a 0,03 e 0,05 resultou em altíssima incerteza de medição de ToF, na ordem de 5 e 8 μs respectivamente.

Tabela 2: Valores estimados de ToF pela simulação para 22 °C

μA	ToF _{teo} (μs)	ToF _{DFT} (μs)	σ_{DFT} (μs)	ToF _{CC} (μs)	$\sigma_{(CC)}$ (μs)
0,00	319,343	319,045	0	319,044	0
0,01	319,343	319,045	0,020	319,044	0
0,03	319,343	319,046	0,062	317,853	5,455
0,05	319,343	319,048	0,103	315,472	8,964

Em relação à temperatura, a Tabela 3 apresenta os valores resultantes da simulação, em que para ruído aditivo de 0,01 a temperatura obtida foi a mesma em ambas as técnicas. No entanto, a incerteza para esse valor de ruído é consideravelmente maior na técnica CC do que na DFT. Em todos os valores de ruído apresentados, as temperaturas obtidas por meio da DFT foram equivalentes ao mesmo valor (22,55 °C). Enquanto a temperatura na CC para os outros valores de ruído apresentou elevada alteração, comparada ao valor configurado de 22 °C.

Tabela 3: Valores estimados para simulação de Temperatura de 22 °C

μA	$T_{DFT} (^{\circ}C)$	σ_{TDFT}	$T_{CC} (^{\circ}C)$	$\sigma (T_{CC})$
0,00	22,55	0	22,55	0
0,01	22,55	0,039	22,55	0
0,03	22,55	0,116	25,05	11,439
0,05	22,55	0,192	30,04	18,796

Para temperatura configurada em 32 °C foi obtido ToF teórico de 314,067 μs , como pode ser observado na Tabela 4. Observa-se nessa tabela que para os níveis de ruídos empregados, também foi obtida baixa incerteza de ToF, de forma que os valores resultantes se mantiveram praticamente os mesmos. Para a técnica CC os resultados de ToF são mais próximos do ToF teórico, embora a incerteza para essa técnica seja maior, quando comparada à DFT.

Tabela 4: Valores estimados de ToF pela simulação para 32 °C

μA	$ToF_{teo} (\mu s)$	$ToF_{DFT} (\mu s)$	$\sigma_{DFT} (\mu s)$	$ToF_{CC} (\mu s)$	$\sigma_{(CC)} (\mu s)$
0,00	314,067	313,769	0	314,044	0
0,01	314,067	313,768	0,025	314,044	0
0,03	314,067	313,766	0,075	313,996	0,218
0,05	314,067	313,763	0,125	313,948	0,301

No que diz respeito à temperatura, a Tabela 5 apresenta valores para a técnica CC muito próximos ao que foi configurado na simulação (32 °C) para o ruído de 0,01. A incerteza para essa faixa de temperatura foi maior do que a apresentada na temperatura de 22 °C, mas ainda assim pode ser considerada baixa para o sistema.

Tabela 5: Valores estimados para simulação de Temperatura de 32 °C

μA	$T_{DFT} (^{\circ}C)$	σ_{TDFT}	$T_{CC} (^{\circ}C)$	$\sigma (T_{CC})$
0,00	32,58	0	32,04	0
0,01	32,58	0,049	32,04	0
0,03	32,59	0,147	32,14	0,426
0,05	32,59	0,244	32,23	0,587

Na Tabela 6 o ToF teórico encontrado na simulação corresponde a 309,044 μs para temperatura configurada em 42 °C. Esse mesmo resultado foi obtido para simulação sem ruído e ruído de 0,01 na técnica CC. O desvio

encontrado para a técnica DFT é menor, comparado à técnica CC, no entanto todos os valores de ToF obtidos são satisfatórios para a simulação nesse caso.

Tabela 6: Valores estimados de ToF pela simulação para 42 °C

μA	ToF _{teo} (μs)	ToF _{DFT} (μs)	σ_{DFT} (μs)	ToF _{CC} (μs)	$\sigma_{(CC)}$ (μs)
0,00	309,044	308,746	0	309,044	0
0,01	309,044	308,746	0,029	309,044	0
0,03	309,044	308,745	0,087	308,853	0,402
0,05	309,044	308,745	0,146	308,663	0,498

Na Tabela 7 pode ser constatado que as temperaturas obtidas por meio da DFT foram equivalentes ao mesmo valor (42,61 °C) e apresentou baixa incerteza para essa técnica. A temperatura na técnica CC foi correspondente ao valor padronizado (42 °C) para o caso sem ruído e ruído aditivo de 0,01.

Tabela 7: Valores estimados para simulação de Temperatura de 42 °C

μA	T _{DFT} (°C)	σ_{TDFT}	T _{CC} (°C)	$\sigma_{(T_{CC})}$
0,00	42,61	0	42,00	0
0,01	42,61	0,006	42,00	0
0,03	42,61	0,178	42,39	0,825
0,05	42,61	0,298	42,78	1,020

Pode-se considerar, portanto, que na simulação do sistema a incerteza na técnica DFT é menor do que a CC. Além disso, houve maior variação nos resultados para a simulação em 22 °C.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A aquisição dos sinais foi feita pelo osciloscópio com taxa amostragem de 2,5 GHz, e então foram aplicadas as técnicas mencionadas por meio da ferramenta matemática Matlab. Para ilustrar a influência da temperatura no atraso temporal dos sinais, foi plotada a Figura X a qual apresenta sinais transmitido e recebido em duas diferentes temperaturas, 22 e 42 graus.

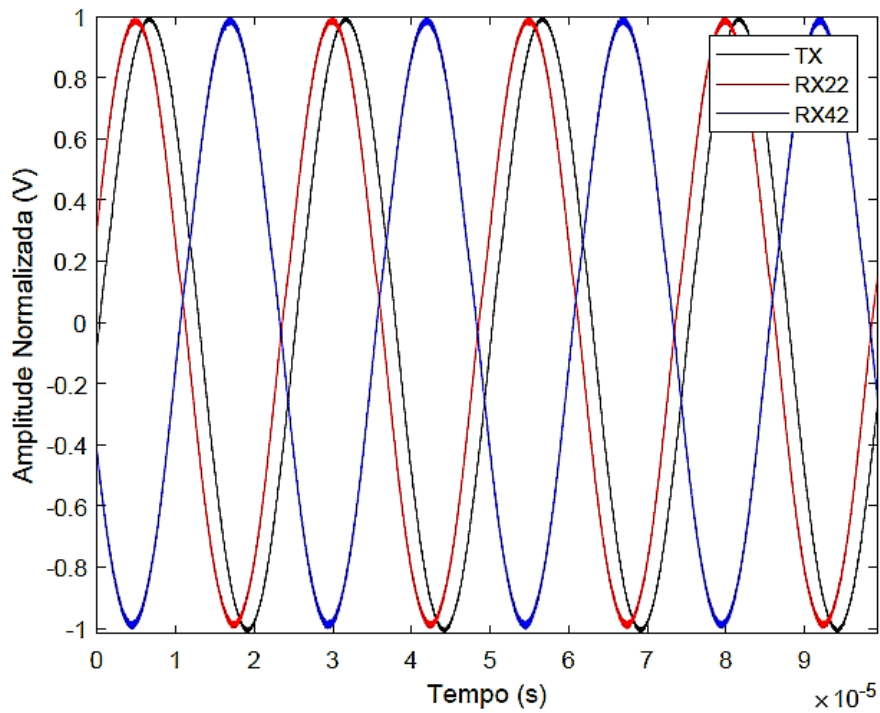


Figura 30: Sinais TX e RX em 22° e 42° C
Fonte: Elaborada pelos autores

Sabendo-se que o sinal plotado em cor preta representa o sinal transmitido, o de cor vermelho o sinal recebido em 22°C e o azul o sinal recebido em 42°, verifica-se que a temperatura causa um aumento na defasagem relativa à onda transmitida, ou seja, diminuindo o ToF.

Os resultados de ToF encontrados por cada técnica na aquisição de sinais estão apresentados na Tabela 8.

Na primeira coluna, T_{LM} representa a temperatura medida pelo sensor LM35, enquanto na segunda coluna estão apresentados os valores de ToF_{LM} encontrados a partir da equação 5. Nas demais colunas estão apresentados os valores de ToF resultantes das técnicas DFT e CC, com suas respectivas incertezas.

Tabela 8: Valores estimados de ToF pelas técnicas de DFT e CC.

T_{LM} (°C)	ToF_{LM} (μs)	σ_{ToFLM} (μs)	ToF_{DFT} (μs)	σ_{DFT} (μs)	ToF_{CC} (μs)	$\sigma_{(CC)}$ (μs)
22,44	319,105	0,151	319,105	0,144	319,111	0,137
32,59	313,721	0,182	313,799	0,153	313,850	0,100
42,44	308,852	0,109	308,874	0,088	308,880	0,098

A partir da Tabela 8, observa-se que os resultados de ToF encontrados pelas técnicas foram bem próximos dos resultados de ToF_{LM} calculados para as temperaturas do LM35. . Ao se comparar as incertezas dos valores adquiridos pela DFT e pela CC, verifica-se que a CC possui menor incerteza e isso se justifica pela alta taxa de amostragem.

Na Tabela 9 são apresentados os valores das temperaturas calculados com o valor do ToF encontrado por cada técnica obtido pela equação 5, e suas respectivas incertezas.

Tabela 9: Valores estimados de Temperatura pelas técnicas DFT e CC.

$T_{LM} (^{\circ}C)$	$\sigma_{TLM} (^{\circ}C)$	$T_{DFT} (^{\circ}C)$	σ_{TDFT}	$T_{CC} (^{\circ}C)$	$\sigma_{(T_{CC})}$
22,44	0,28	22,44	0,27	22,41	0,25
32,59	0,19	32,47	0,17	32,44	0,18
42,44	0,21	42,35	0,18	42,32	0,21

Com a análise dos resultados referentes à temperatura, verifica-se que as temperaturas decorrentes do cálculo pelo ToF da técnica DFT são mais próximos dos valores medidos pelo LM35. Além disso, pode-se observar que as incertezas dos valores de temperatura encontrados pelas técnicas são menores que as incertezas de temperatura do sensor. No entanto, percebe-se que essas se relacionam com a variação das incertezas do LM35, mas com um valor menor.

4.3 ATENUAÇÃO

Por meio da Equação 3 foi verificada a amplitude nos sinais ultrassônicos analisados neste trabalho. A frequência e a distância foram mantidas fixas e variou-se a temperatura. Foi constatado que essa variação da temperatura faz com que o sinal recebido pelo transdutor ultrassônico seja atenuado, de forma que quanto maior for a temperatura, maior será o coeficiente de atenuação.

A Figura 28 mostra as amplitudes dos sinais transmitido e recebido submetidos à temperatura de 22,30 °C. A amplitude do sinal transmitido corresponde a 4,642 V, enquanto a amplitude do sinal recebido é 0,642 V.

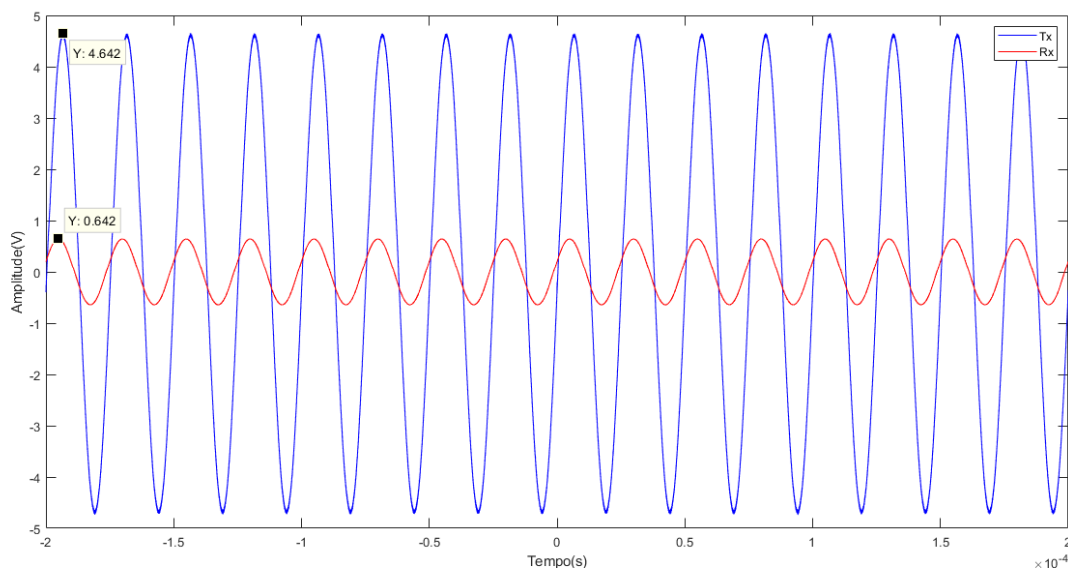


Figura 31: Atenuação para temperatura 22,30 °C
Fonte: Elaborada pelos autores

À temperatura de 32,65 °C, a amplitude do sinal transmitido se mantém próxima do sinal apresentado anteriormente (4,684 V), ao passo que a amplitude do sinal recebido foi reduzida a 0,5538 V (Figura 29).

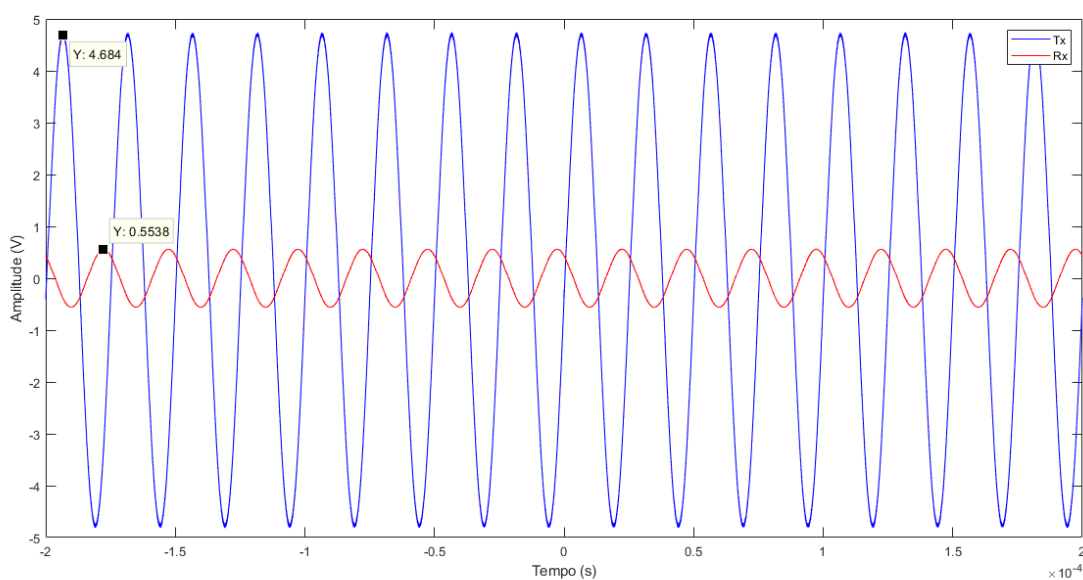


Figura 32: Atenuação para temperatura 32,65 °C
Fonte: Elaborada pelos autores

Já para a temperatura de 42,30 °C a amplitude do sinal transmitido foi 4,702 V, em contrapartida a amplitude do sinal recebido foi consideravelmente reduzida a 0,2313 V (Figura 30).

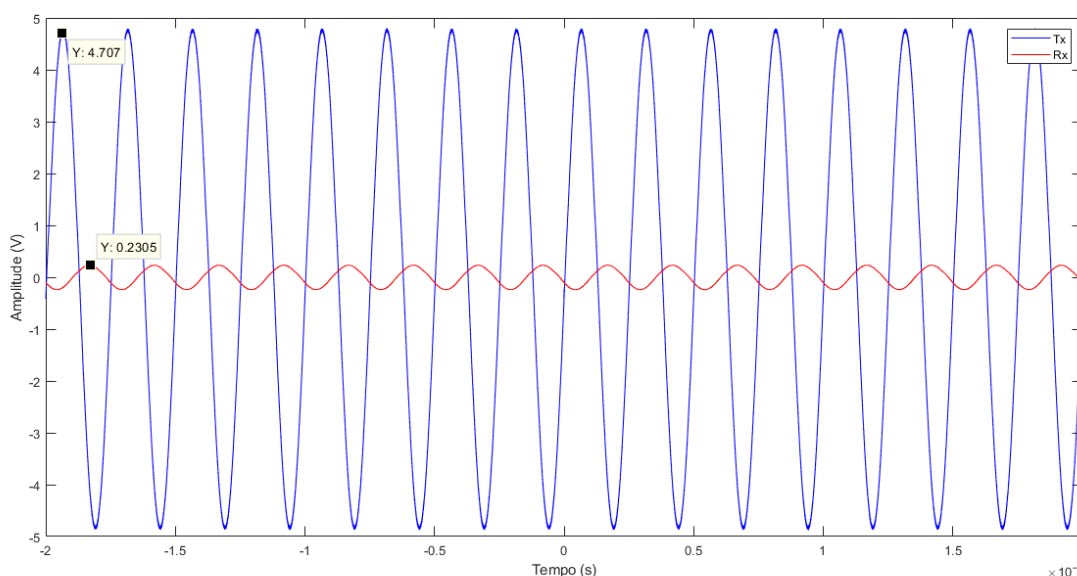


Figura 33: Atenuação para temperatura 42,30 °C
Fonte: Elaborada pelos autores

A Tabela 10 apresenta as amplitudes dos sinais transmitido e recebido (A_{Tx} e A_{Rx}) para as temperaturas indicadas pelo sensor LM35 (T_{LM}) e o coeficiente de atenuação (K) resultante.

Tabela 10: Atenuação dos sinais transmitidos e recebidos

$T_{LM} (^{\circ}C)$	$A_{Tx} (V)$	σ_{ATx}	$A_{Rx} (V)$	σ_{ARx}	K	σ_K
22,44	4,6506	0,00549	0,6652	0,00781	17,6801	0,10581
32,59	4,7333	0,01279	0,5942	0,02934	18,8753	0,46247
42,44	4,8035	0,00514	0,2500	0,00343	26,8700	0,12790

Os valores do coeficiente de atenuação foram obtidos da amplitude do sinal recebido dividido pela amplitude do sinal transmitido, cuja distância entre os transdutores é 0,11m. Ao variar a temperatura sobre o sistema, foi possível obter o gráfico da amplitude dos sinais do par ultrassônico pela temperatura, sendo apresentado na Figura 31.

Assim a partir do ajuste de curva foi obtida a seguinte expressão:

$$y = -0,0014x^2 + 0,0693x - 0,1922 \quad (17)$$

Sendo y a amplitude e x a temperatura.

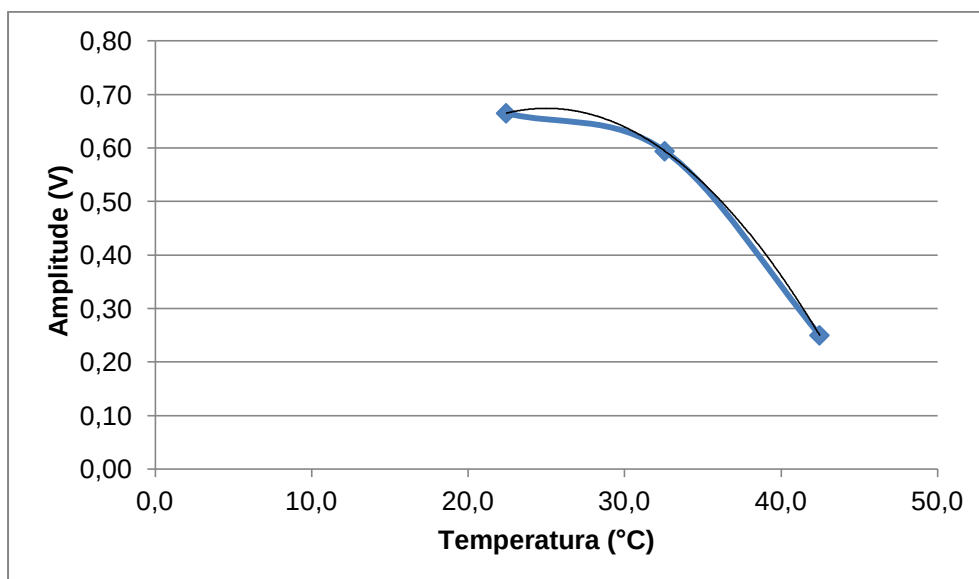


Figura 34: Curva de atenuação
Fonte: Elaborada pelos autores

Diante dos resultados apresentados, é possível afirmar que a atenuação é influenciada pela temperatura. Deve-se considerar que os resultados foram obtidos de apenas três faixas de temperatura, mas trabalhos futuros podem ser realizados com maior abrangência de valores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura sobre os sinais obtidos de transdutores ultrassônicos por meio do desenvolvimento de um protótipo em que fosse possível analisar experimentalmente essa interferência.

Ao se modelar um sistema tenta-se ao máximo aproximar o modelo matemático do processo físico objeto de observação. Neste processo não foi possível analisar outras grandezas físicas como a gravidade, umidade, pressão atmosférica, etc, que podem alterar a agitação das moléculas de ar propiciando alterações no sistema que podem afetar o modelo do sistema proposto.

Contudo, sabe-se que o aumento da temperatura do ambiente causa maior agitação das moléculas do ar. Observou-se experimentalmente que o nível de degradação da onda também aumentou, fato esse comprovado pelo nível de amplitude da onda ultrassônica recebida (atenuação do sinal).

Os resultados apresentados por meio de simulação e procedimento experimental evidenciam que os valores obtidos para as variáveis em estudo são

semelhantes ao modelo matemático utilizado decorrente das técnicas utilizadas no processo de verificação de tais resultados. O equacionamento matemático possibilitou encontrar a diferença de fase entre os sinais ultrassônicos transmitido e recebido utilizando para tanto a DFT e ainda medir a similaridade que existe entre eles, por meio da correlação cruzada. Além disso, foi constatado na simulação do sistema que as componentes da DFT e CC possuem incertezas devido à contribuição de ruído aditivo.

Portanto, verificou-se que os resultados comprovam a eficácia do uso de transdutores de ultrassom com base na DFT e CC para medição de ToF e temperatura.

Concluiu-se que a temperatura afeta diretamente na atenuação do sinal, no entanto, como este não era o foco do trabalho, não foram realizadas medições suficientes para avaliar se essa relação pode ser eficiente o bastante para medição de temperatura. Este fica como sugestão para novos trabalhos, assim como o estudo experimental de análise do ruído sobre os sinais ultrassônicos e outros métodos de medição de ToF e temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEUCCI, R. Aplicação Industrial: Ensaio por ultrassom. Maio, 2014. Disponível em: <www.abendi.org.br>. Acesso em: 15/01/2019.

AHMED, Ashfaq. Eletrônica de Potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. Instrumentação e fundamentos de medidas, v.1. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

COSTA, Maxwell Moura. Medição de velocidade de vento utilizando transdutores ultrassônicos baseada na Transformada de Fourier. Tese – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: 2015.

FILIPPIN, Carlo Giuseppe; [et al.]. Emissão acústica: conceitos e aplicações. Curitiba: Institutos Lactec; Araucária: UEG. 2017.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 8 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2009.

KRAUTKRAMER, J. KRAUTKRAMER, H. Ultrasonic Testing of Materials. 4.ed. Tradução: HISLOP, J.D. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag, 2002.

LEÃO, R. J.; Simulação da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais em materiais estruturais espaciais. Dissertação - UNICAMP, Campinas, 2012.

LUCENA, D. C. et al. Algoritmo híbrido para a rejeição do ruído e estimação do tempo de trânsito ultrassônico usando filtro de Kalman e diferença de fase. [2018?]. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CBA2018-1333.pdf>> Acesso em: 10/01/2019.

LARSSON, C. Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation, Vol. 50. Applied Acoustics, 1997.

MARTINHON, G. Avaliação e implementação de métodos de estimação de tempo de atraso de sinais de ultra-som. 2007. Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira-SP, 2007.

MAYA, Paulo Alvaro;LEONARDI, Fabrizio. Controle Essencial. São Paulo: Pearson, 2003.

MAYWORM, R. C. Desenvolvimento e Implementação da Técnica Tempo de Voo da Onda Difrata (ToFD) para utilização em ensaios não destrutivos. Universidade Católica de Petrópolis, Petrópolis, 2012.

MURATA. Ultrasonic Sensor: Application Manual. 2010.

OPPENHEIM. A. V.; WILLSKY. A. S.; Sinais e Sistemas. 2.ed. Tradução: VIEIRA, D.; BETTONI, Rogério. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MURTY, D.V.S. Transducers and instrumentation. 2 ed. PHI Learning Pvt. Ltd, 2010.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. Digital Signal Processing: principles, algorithms and applications. 3. ed. New Jersey, EUA: Prentice Hall, Inc., 1996.

VIM. Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. INMETRO 1ª edição Luso - Brasileira, 2012.