



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



Trabalho de Conclusão de Curso

Desenvolvimento de um circuito pulsador eletrônico para aplicações na área de ultrassom

Rafael Júnio Cota Cekiera

João Monlevade, MG
2020

Rafael Júnio Cota Cekiera

Desenvolvimento de um circuito pulsador eletrônico para aplicações na área de ultrassom

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: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C387d Cekiera, Rafael Junio Cota .
Desenvolvimento de um circuito pulsador eletrônico para aplicações
na área de ultrassom. [manuscrito] / Rafael Junio Cota Cekiera. - 2020.
55 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Circuitos eletrônicos. 2. Diagnóstico por imagem - Acústica. 3.
Transdutores ultrassônicos . 4. Ultrassom. I. Tiago, Marcelo Moreira. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3

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 ELETRICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO****Rafael Júnio Cota Cekiera****DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PULSADOR ELETRÔNICO
PARA APLICAÇÕES NA ÁREA DE ULTRASSOM**

Membros da banca

Marcelo Moreira Tiago - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto
Márcio Feliciano Braga - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto
Renan Fernandes Bastos - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final

Aprovado em 14 de setembro de 2020

De acordo

Marcelo Moreira Tiago



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/09/2020, às 21:59, 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 **0088550** e o código CRC **1A1C02E9**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.007158/2020-50

SEI nº 0088550

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

*"Se dizem que é impossível, eu digo é necessário."
– Humberto Gessinger*

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um pulsador eletrônico, utilizado para excitar transdutores ultrassônicos com frequência central de 42 kHz por meio de um pulso estreito com duração de 8 us e tensão de -100 V. Durante o trabalho, foram empregados dois transdutores, através da configuração transmissão-recepção. Um circuito amplificador foi utilizado para fornecer um ganho de aproximadamente 45 dB ao sinal acústico recebido. A fim de caracterizar o sistema, foram realizados ensaios para analisar as características do pulso de excitação, o formato do sinal recebido pelo transdutor receptor e a resposta em frequência do circuito amplificador de recepção. A aquisição dos sinais foi realizada por meio de um osciloscópio digital com resolução de 8 bits. Como exemplo de aplicação, o sistema foi configurado para gerar uma imagem acústica do tipo B-Scan. Para isso, inicialmente foram feitos testes de calibração, onde mediu-se o tempo de voo entre os sinais acústicos e as distâncias entre os dois transdutores. A partir desses resultados, calculou-se a velocidade de propagação do som no ar, e o erro obtido foi de aproximadamente 1 m/s. Após a calibração, um sistema móvel composto por um motor de passo controlado por um microcontrolador, foi utilizado para variar a posição dos transdutores em passos de 2°, numa faixa entre -45° e +45°. Objetos refletores foram posicionados em frente ao sistema, e os sinais adquiridos foram utilizados para gerar imagens acústicas.

Palavras-chave: Ultrassom, Pulsador ultrassônico, Imagem Acústica, B-SCAN.

Abstract

This work presents the development of an electronic pulsator, used to excite ultrasonic transducers with a central frequency of 42 kHz through a narrow pulse lasting 8 μ s and voltage of -100 V. During the work, two transducers were used, through the transmission-reception configuration. An amplifier circuit was used to provide a gain of approximately 45 dB to the received acoustic signal. In order to characterize the system, tests were performed to analyze the characteristics of the excitation pulse, the shape of the signal received by the receiving transducer and the frequency response of the receiving amplifier circuit. The acquisition of the signals was carried out by means of a digital oscilloscope with 8-bit resolution. As an application example, the system was configured to generate an acoustic image of the B-Scan type. For this, calibration tests were initially carried out, where the flight time between the acoustic signals and the distances between the two transducers were measured. From these results, the speed of sound propagation in the air was calculated, and the error obtained was approximately 1 m/s. After calibration, a mobile system consisting of a stepper motor controlled by a microcontroller, was used to vary the position of the transducers in steps of 2°, in a range between -45° and + 45°. Reflective objects were positioned in front of the system, and the acquired signals were used to generate acoustic images.

Keywords: Ultrasound, Ultrasonic pulser, Acoustic image, B-SCAN.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Onda transversal.	7
Figura 2 – Onda longitudinal.	7
Figura 3 – Transdutor normal ou reto.	11
Figura 4 – Transdutor angular.	12
Figura 5 – Transdutor duplo-cristal.	12
Figura 6 – Transdutor <i>phased-array</i>	13
Figura 7 – Sistema de transmissão e recepção.	14
Figura 8 – Sistema de pulso-eco.	14
Figura 9 – Representação A-scan.	15
Figura 10 – Representação B-scan.	15
Figura 11 – Representação C-scan.	16
Figura 12 – Sinais para análise da correlação cruzada.	17
Figura 13 – Sinal resultante após o cálculo da correlação cruzada.	18
Figura 14 – Esquemático do circuito pulsador ultrassônico.	19
Figura 15 – Circuito dobrador de tensão.	20
Figura 16 – Circuito multiplicador de tensão.	20
Figura 17 – MOSFET canal tipo P.	21
Figura 18 – Gráfico de regiões do MOSFET.	21
Figura 19 – Circuito Oscilador.	23
Figura 20 – Resistores de potência.	23
Figura 21 – Amplificador do circuito pulsador.	24
Figura 22 – Imagem 3D da placa do circuito.	24
Figura 23 – Circuito receptor.	25
Figura 24 – Circuito receptor.	26
Figura 25 – Suporte em PVC.	27
Figura 26 – Estrutura para transdutores.	29
Figura 27 – Esquema de funcionamento da estrutura.	29
Figura 28 – Saída da simulação do multiplicador de tensão.	31
Figura 29 – Simulação de ondas da saída do microcontrolador e da saída do circuito pulsador.	32
Figura 30 – Simulação do primeiro estágio do circuito amplificador.	33
Figura 31 – Simulação do segundo estágio do circuito amplificador.	33
Figura 32 – Simulação do terceiro estágio do circuito amplificador.	34
Figura 33 – Simulação do circuito completo, considerando os três estágios em cascata.	34
Figura 34 – Pulso de saída do microcontrolador.	36
Figura 35 – Pulso de saída do circuito sem carga.	36

Figura 36 – Pulso de saída do circuito com carga.	37
Figura 37 – Ganho do primeiro estágio em relação ao sinal do entrada.	37
Figura 38 – Ganho do segundo estágio em relação ao primeiro.	38
Figura 39 – Ganho do terceiro estágio em relação ao segundo.	38
Figura 40 – Ganho total do amplificador.	39
Figura 41 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição de um sinal de referência. b) Resposta do transdutor a uma distância de referência. . .	40
Figura 42 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição do sinal a uma distância intermediária de 10 cm. b) Resposta do transdutor a uma distância intermediária de 10 cm.	41
Figura 43 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição do sinal a uma distância de 20 cm. b) Resposta do transdutor a uma distância de 20 cm.	41
Figura 44 – a) Sinal de referência sem amplificação. b) Sinal de referência amplificado.	42
Figura 45 – a) Sinal a 20 cm de distância sem amplificação. b) Sinal a 20 cm de distância amplificado.	42
Figura 46 – Distância x Velocidade utilizando pico máximo da correlação cruzada.	44
Figura 47 – Distância x Velocidade utilizando pico máximo dos sinais.	44
Figura 48 – Estrutura para transdutores.	45
Figura 49 – Arranjo com 1 copo à 20 cm de distância dos transdutores.	46
Figura 50 – Arranjo com 2 garrafas à 15 cm de distância dos transdutores.	46
Figura 51 – Arranjo com 1 copo e 1 garrafa a 15 cm e 20 cm de distância dos transdutores, respectivamente.	47
Figura 52 – Arranjo com 1 copo e 1 garrafa a 20 cm e 27 cm de distância dos transdutores, respectivamente.	48
Figura 53 – Sinal de eco a uma distância de 80 cm e uma frequência de repetição de 3 kHz.	48
Figura 54 – Sinal de eco s uma distância de 10 cm e uma frequência de repetição de pulso de 5 kHz.	49
Figura 55 – Sinal de eco utilizando os 2 primeiros estágios de amplificação.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Velocidade do som em diferentes meios em m/s.	8
Tabela 2 – Descrição do orçamento do protótipo.	28
Tabela 3 – Ganho em dB dos estágios de amplificação em cada frequência utilizada no teste.	39

Lista de abreviaturas e siglas

A	Área
A/D	Analógico para digital
D/A	Digital para analógico
dB	Decibel
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
f	Frequência
GND	<i>Ground</i>
K	Número de onda
$P_{méd}$	Potência média
T	Período
V	Velocidade de propagação da onda
V_{dc}	Tensão em corrente continua
V_{gd}	Tensão <i>gate-drain</i> do MOSFET
V_{gs}	Tensão <i>gate-source</i> do MOSFET
V_m	Tensão de entrada do multiplicador de tensão
V_{out}	Tensão de saída
V_{th}	Tensão de limiar do MOSFET
Z	Impedância acústica
ω	Frequência angular
λ	Comprimento de onda

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos específicos	2
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	Ondas	6
2.2	Ondas sonoras	8
2.2.1	Impedância acústica	9
2.3	Piezoelasticidade	9
2.4	Transdutores	10
2.5	Funcionamento básico de um sistema de medição ultrassônico	13
2.6	Comentários	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	Circuito de excitação	19
3.2	Circuito receptor	24
3.3	Aquisição de dados	26
3.4	Testes iniciais	26
3.5	Orçamento do projeto	27
3.6	Geração de imagens acústicas	28
3.6.1	Posicionador	28
3.6.2	B-Scan	29
3.7	Comentários	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Caracterização do sistema eletrônico	31
4.1.1	Simulação dos circuitos propostos	31
4.1.2	Sistema de excitação	35
4.1.3	Ganhos do amplificador	37
4.2	Respostas dos transdutores	39
4.3	Cálculo da velocidade de propagação do som no ar	42
4.4	Geração de imagem B-scan	45
4.5	Problemas observados ao longo do trabalho	47
4.6	Comentários	50

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

Os ensaios não destrutivos por ultrassom têm sido largamente utilizados em aplicações industriais por permitirem a realização de uma análise multiparamétrica com possibilidade de aplicações não invasivas. Dentre as principais aplicações industriais, destacam-se a detecção de defeitos em peças metálicas, medição de distâncias e geração de imagens acústicas.

As primeiras aplicações envolvendo sistemas ultrassônicos datam de 1929 e foram desenvolvidas pelo cientista Sokolov. Seus ensaios envolviam materiais metálicos e o objetivo era propagar uma onda de pressão através dos materiais em análise (ANDREUCCI, 2014). Em 1942, o físico Floyd Firestone utilizou um sistema ultrassônico para identificar defeitos em materiais metálicos (ANDREUCCI, 2014). Com a segunda guerra mundial, o ultrassom ganhou forte importância devido ao desenvolvimento de sonares e, após 1945, técnicas acústicas ganharam importância industrial por permitirem uma análise não destrutiva e não invasiva em materiais que estavam sendo produzidos.

Hoje em dia, são frequentemente utilizados os ensaios ultrassônicos nas áreas industriais, como caldeiraria e estruturas marítimas para garantir a qualidade de peças de grandes espessuras, a qualidade nas juntas das soldas e também a integridade de chapas metálicas, na grande maioria em aço-carbono e em aço inoxidáveis. A análise de materiais não metálicos também pode ser feita através de ensaios por ultrassom. Como exemplo, temos aplicações médicas e fisioterápicas, onde o meio em questão é o tecido humano ou um líquido. Entretanto, convém ressaltar que alguns tipos de materiais são mais difíceis de se analisar, seja devido a presença de bolhas de ar em sua composição ou devido à dificuldades para realizar o acoplamento entre o sinal acústico gerado pelos transdutores e o meio de interesse (BILANIUK; WONG, 1993).

Durante os ensaios por ultrassons, pode-se obter algumas medidas diretas, tais como a velocidade de propagação e a atenuação do som no meio e também algumas medidas indiretas como impedância acústica, viscosidade, densidade e compressibilidade adiabática.

A caracterização do meio em análise é feita a partir da variação das propriedades acústicas medidas. Como exemplo, pode-se citar a detecção de adulterações em etanol combustível. O objetivo deste tipo de aplicação é identificar variações em concentrações de misturas de etanol e água. Essas variações em concentração provocam variações na velocidade de propagação e atenuação do som no líquido, e estas informações podem ser utilizadas para poder caracterizar a amostra de interesse.

A temperatura é de suma importância para caracterização dos materiais, pois ela afeta diretamente os parâmetros acústicos que se deseja medir. Como exemplo, na água destilada, uma variação em temperatura de $0,01^\circ\text{C}$ corresponde a uma variação em

velocidade de aproximadamente 2 cm/s (TONG; POVEY, 2002).

Dois métodos de medição distintos podem ser utilizados durante as análises: pulso-eco e transmissão. O método de transmissão utiliza dois transdutores independentes, um para transmitir e outro para receber as ondas ultrassônicas. Nesse método, um sinal elétrico é aplicado no transdutor emissor gerando uma onda ultrassônica que se propaga através do meio é captada no transdutor receptor. No método pulso-eco, um único transdutor trabalha como emissor e como receptor. Nesse caso, um sinal elétrico é aplicado ao transdutor gerando uma onda ultrassônica, a onda se propaga pelo meio e assim que encontra uma interface parte da onda é refletida e parte transmitida. A parcela refletida retorna para o transdutor, que converte o sinal de pressão recebido em um sinal elétrico.

A caracterização dos materiais em geral é feita relacionando a velocidade de propagação da onda e a atenuação acústica que se propaga pelo meio. Para realizar as medições das propriedades podem ser utilizadas ondas contínuas e ondas pulsadas.

O método de ondas contínuas pode ser utilizado para análises em diferentes faixas de frequência, podendo alcançar frequências muito elevadas quando se utilizam câmeras ressonantes. Sistemas de onda pulsada são mais utilizados em casos em que as frequências desejadas variam entre alguns kHz até centenas de MHz.

Este trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento de um circuito eletrônico para gerar sinais pulsados (aproximadamente 100 V). O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico pulsado para aplicações com ultrassom de baixo custo, que possa ser utilizado em ambiente laboratorial com condições controladas.

Durante o trabalho, foram utilizados transdutores de 40 kHz específicos para medições em ar. Através do circuito desenvolvido, foram realizadas medições de distância e também foram geradas imagens acústicas do tipo B-Scan.

1.1 Objetivos

Desenvolver um circuito pulsador ultrassônico de baixo custo para aplicações com transdutores piezoelétricos para ar, utilizados na medição de distâncias e geração de imagens.

1.1.1 Objetivos específicos

Projetar um sistema eletrônico de excitação pulsado com uma tensão de pulso de saída de -100 V e largura de pulso de saída de 8 us. Projetar um amplificador de recepção com largura de banda entre 0-44 kHz e ganho ajustável dentro dessa faixa de frequência, caracterizar o sistema de excitação e amplificação, realizar testes preliminares medindo a velocidade de propagação do som no ar para uma temperatura constante e , por fim, utilizar o sistema desenvolvido para gerar imagens acústicas do tipo B-Scan.

1.2 Revisão Bibliográfica

O trabalho apresentado por Silva et al. (2008) mostra o desenvolvimento de um circuito utilizado para excitação e recepção de transdutores ultrassônicos, para ondas guiadas em cilindros ocos e detecção de incrustação em oleodutos. Os testes no circuito pulsador sem carga apresentaram uma tensão com amplitude de 200 V a uma frequência de 500 kHz, com o acréscimo de uma substância no interior do tubo com 2 mm de espessura, houve uma redução na amplitude do sinal recebido.

O circuito utilizado para excitação do transdutor emissor utilizava duas fontes de tensão, sendo uma para alimentar os componentes e outra para gerar a tensão dos pulsos. Um multivibrador astável foi empregado para gerar os pulsos de excitação do transistor MOSFET utilizado para entregar aos transdutores os pulsos de alta tensão. O circuito receptor utiliza amplificador logarítmico para melhorar a relação sinal-ruído do sinal recebido e um conjunto de filtros para que sinais fora da banda de interesse sejam atenuados.

Uma outra proposta de circuito para implementação do pulsador foi apresentada por Brown e Lockwood (2002), em que é proposto um gerador de pulsos de baixo custo para ultrassonografia por imagem. O pulsador fornece pulsos curtos que variam de 10 a 500 ns, com uma amplitude de -350 V. Em seu trabalho, os autores mostram que quanto menor a largura do pulso, menor é a tensão de saída do pulso. O circuito projetado foi dividido em 3 partes, de modo que em cada estágio a capacidade de corrente de saída aumenta. O primeiro estágio é um amplificador que dobra a tensão de entrada do circuito. O segundo estágio emprega 6 MOSFETS divididos em pares, onde cada par opera com alta velocidade ao longo do chaveamento dos componentes. Por meio desse circuito, os autores conseguiram duplicar a corrente de saída do estágio para acionar MOSFET do último estágio. O estágio final usa um MOSFET de potência rápido, com banda de até 60 MHz responsável por controlar a largura do pulso de excitação.

Chaney e Sundararajan (2004) elaboraram um projeto em que o circuito pulsador possui um pulso de 400 V e uma largura ajustável de 75 ns a 10 ms. Nesse sistema, para conseguir um pulso com menor amplitude, basta diminuir a tensão de entrada do circuito.

No projeto apresentado por Salazar et al. (2003), foi desenvolvido um pulsador de alta resolução e alta potência, capaz de fornecer pulsos com tensões entre 300 V e 800 V. Além disso, o sistema pode operar em 3 modos diferentes: pulso único, pulso duplo e sinal externo, que pode ser uma sequência de pulsos. Durante os ensaios, dois transdutores de 1 MHz (projetados para operar no ar) operando em transmissão foram alinhados a uma distância de 5 mm. O sistema apresentado foi utilizado para detectar danos em placas de fibra de vidro.

Athanasopoulos, Carey e Hatfield (2004) apresentam um circuito integrado de alta tensão, utilizado para excitação de um *array* de transdutores de PVdF (Fluoreto de Polivinilideno). O circuito integrado para aplicações específicas possui uma matriz de 16

canais de saída, e cada canal fornece pulsos de -100 V com largura de 25 ns.

O trabalho desenvolvido por Assef et al. (2009), apresenta um sistema para excitação, aquisição e processamento de sinais de ultrassom para caracterização de materiais. Os testes foram realizados com água e acrílico. O sistema trabalha no modo de transmissão-recepção e também no modo de pulso-eco, com taxa de amostragem entre 5 MHz e 80 MHz. O circuito de transmissão emite pulsos entre 111 Hz e 333 Hz, com largura de pulso de 100 ns e uma tensão de 200 V. O circuito de recepção trabalha na faixa de 20 kHz e 30kHz com controle de ganho entre -40 dB e +40 dB.

O projeto realizado por Luciano et al. (2010) propõe um circuito pulsador que utiliza um *drive* excitador de MOSFET alimentado por 5 Vdc. A largura de pulso é controlada por um FPGA e apresenta duração de 20 ns. Esse pulso é aplicado a um circuito integrado de transistores MOSFET de alta velocidade e rápida comutação. Utilizando um transformador e transistores MOSFET, o circuito alcança níveis de tensão que variam de 0 a -200 V. Um teste, realizado com o transdutor conectado ao circuito, mostrou que o pulso de saída passa a apresentar uma tensão de -80 V e uma duração de 100 ns.

O circuito apresentado por Cheney et al. (1973) é projetado para excitar transdutores ultrassônicos por meio de transistores de avalanche. A saída de tensão utiliza um circuito isolador (*buffer*) e produz uma tensão de 250 V, com duração de 10 ns.

Xu, Yen e Shung (2007) apresentam um projeto de um gerador de pulso bipolar de baixo custo para aplicações de ultrassom. O gerador produz vários ciclos de pulso bipolares, com frequência acima de 60 MHz. O pulsador pode ser usado em aplicações de imagens por *doppler*. O circuito de controle de tempo consiste em um gerador de *clock* programável e um circuito digital com portas lógicas. A frequência de repetição do pulso varia de 100 Hz a 100 kHz e a tensão máxima adquirida por testes é de 160 Vpp.

Zhao et al. (2011) propõe um circuito pulsador para aplicações médicas, como imagens de ultrassom. O circuito foi apenas simulado usando o simulador Cadence Specter. Na simulação, o circuito é excitado com uma fonte de tensão quadrada de 5 Vdc e uma largura de pulso de 20 ns, obtendo uma tensão de saída de 29 V e a mesma largura de pulso utilizada para excitar o circuito.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho está dividida em 5 capítulos, organizados da seguinte forma.

O capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos e motivações para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, também apresenta uma revisão bibliográfica, com um conjunto de referências utilizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos necessários para o estudo que é desenvolvido ao longo deste trabalho.

O capítulo 3 aborda a metodologia utilizada neste projeto, descrevendo todos os componentes utilizados para montar o circuito eletrônico e as justificativas para a sua escolha.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos em testes com um transdutor de baixa frequência para medições em ar, utilizado neste trabalho para medir distâncias e gerar imagens acústicas do tipo B-Scan.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as considerações finais e propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

Nessa seção serão apresentados os conceitos teóricos utilizados ao longo do desenvolvimento do trabalho. Serão abordados alguns conceitos relacionados à propagação de ondas, características e tipos de transdutores, instrumentação de sistemas ultrassônicos, técnicas para medição de velocidade de propagação do som e geração de imagens acústicas.

2.1 Ondas

De acordo com Nussenzveig (2018), uma onda pode ser definida como qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio, com velocidade definida. Um exemplo são as vibrações das cordas de violão e um segundo exemplo são as ondas circulares que se propagam pela superfície da água quando se joga uma pedra em um lago.

As ondas podem ser classificadas segundo sua natureza e segundo a sua forma de propagação. Segundo a natureza elas podem ser classificadas como ondas mecânicas, eletromagnéticas e de matéria.

Ondas mecânicas são mais comuns e mais conhecidas como, por exemplo, as ondas sonoras e ondas do mar que se propagam em um meio material. Como características dessas ondas, pode-se citar que existem apenas em um meio material como a água e ar e são regidas pelas leis de Newton (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008).

Ondas eletromagnéticas são resultados da relação do campo elétrico e do campo magnético e não dependem da vibração do meio. Elas podem se propagar em diversos meios e até mesmo no vácuo. Exemplos de alguns tipos de ondas eletromagnéticas : micro-ondas, luz visível, infravermelho e radares (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008).

Ondas de matéria são menos conhecidas, mas não menos importantes. Elas são usadas em laboratórios e estão associadas a elétrons, prótons e outras partículas elementares (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008).

Segundo a sua forma de propagação as ondas podem ser classificadas em longitudinais e transversais.

Nas ondas transversais, o movimento do meio é perpendicular (transversal) à direção de propagação da perturbação (TIPLER; MOSCA, 2000). Um exemplo é a oscilação de uma corda fixada na parede. Quando ela é excitada para baixo e para cima são geradas ondas que se propagam para frente e para trás. A Figura 1 mostra uma onda transversal indicando a direção de vibração e a direção de propagação da onda.

As ondas longitudinais ocorrem quando o movimento do meio se dá ao longo da (paralelo) direção de propagação da perturbação (TIPLER; MOSCA, 2000). Um exemplo é uma mola, que oscila na mesma direção da força aplicada para comprimi-la. Outro exemplo

Figura 1 – Onda transversal.



Fonte: retirado de GOUVEIA (2018).

são as ondas sonoras que se propagam pelo ar. A Figura 2 mostra uma onda longitudinal de partículas de ar, indicando a direção de vibração e a direção de propagação da onda.

Figura 2 – Onda longitudinal.



Fonte: retirado de GOUVEIA (2018).

As ondas possuem um período, que é o tempo necessário para a fonte produzir uma onda completa, normalmente representado pela letra T e medida em segundos. A frequência é representada pela letra f e medido em Hertz e pode ser definida como o número de oscilações realizadas em um determinado instante de tempo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008). A frequência angular e o período podem ser relacionados por

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (2.1)$$

sendo:

f : frequência em Hertz (Hz).

T : período em segundos (s).

ω : frequência angular em rad/s .

O comprimento de onda pode ser medido por meio da distância entre dois picos (crista) da onda. O número de onda pode ser relacionado com o comprimento de onda por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.2)$$

sendo:

k : número de onda em rad/m .

λ : comprimento de onda em metros (m).

A velocidade de propagação das ondas está relacionada com os meios pelos quais elas se propagam, podendo haver interferências. A velocidade pode ser relacionada com o comprimento de onda, a frequência e número de onda de acordo com (2.3) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008):

$$V = \frac{\omega}{k} = \lambda f, \quad (2.3)$$

2.2 Ondas sonoras

As ondas sonoras são ondas mecânicas, pois precisam de um meio para se propagar e são longitudinais pois a vibração ocorre na mesma direção de propagação da onda. O som pode se propagar em diferentes meios materiais, como líquidos, sólidos e gases. A Tabela 1 mostra algumas velocidades do som em diferentes meios.

Tabela 1 – Velocidade do som em diferentes meios em m/s.

<i>Gases</i>	Velocidade	<i>Líquidos</i>	Velocidade	<i>Sólidos</i>	Velocidade
Ar(0°C)	331	Água (0°C)	1402	Aço	5941
Ar(20°C)	344	Água (20°C)	1482	Alumínio	6420
Hélio	965	Água salgada	1522	Granito	6000
Hidrogênio	284				

Fonte: adaptado de Halliday, Resnick e Walker (2008).

Analisando a Tabela 1, pode-se observar que quanto mais denso é o meio, maior a velocidade do som. Logo a velocidade nos sólidos é maior que a dos líquidos que é maior que a dos gases.

Quando uma onda sonora encontra uma barreira, parte da onda é transmitida, ou seja, passa a barreira e parte da onda é refletida. A reflexão da onda é quando uma onda encontra um obstáculo e volta para o meio de origem e é causada por uma variação da impedância acústica dos meios. Esse fenômeno pode dar origem a outro que é chamado de eco e acontece quando o som refletido volta após o som original ter se extinguido.

O ouvido humano não consegue captar todas as frequências de ondas sonoras, mas há um intervalo entre 20 Hz e 20 kHz de acordo com Young e Freedman (2008) que é audível. Abaixo de 20 Hz as ondas são denominadas infrassom e acima de 20 kHz são chamadas de ultrassom.

2.2.1 Impedância acústica

A impedância acústica é o produto da densidade do material pela velocidade de propagação do som no material. Quando o feixe sonoro atravessa uma interface entre dois meios com a mesma impedância acústica, não há reflexão e a onda é toda transmitida ao segundo meio. A diferença de impedância acústica entre dois meios define a parcela de onda que será refletida na interface. Quanto maior a diferença de impedância entre duas estruturas, maior será a parcela de onda refletida. Matematicamente a impedância acústica pode ser definida por:

$$Z = \rho V, \quad (2.4)$$

sendo:

Z : impedância acústica em kg/m^2s .

ρ : densidade do material kg/m^3 .

V : Velocidade de propagação da onda no som em m/s .

2.3 Piezoeletricidade

A piezoeletricidade é uma propriedade apresentada por alguns materiais que são capazes de converter energia elétrica em mecânica, ou vice-versa. Existem alguns materiais piezoelétricos citados por Biscegli (2004) que são mais utilizados, como o quartzo, turmalina, Sal de Rochelle, titanato de bário e o titanato zirconato de chumbo (PZT). O quartzo é o material piezoelétrico mais antigo, ao passo que o titanato de bário e zirconato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezoelétrico através de polarização (ANDREUCCI, 2014). Os cristais são utilizados para a construção de transdutores levando em conta a capacidade piezoelétrica de cada um deles.

Em qualquer escala de frequência ou potência, o elemento ativo e núcleo da maioria dos transdutores ultrassônicos é piezoelétrico, podendo ser classificado em um dos seguintes grupos (GALLEGO-JUAREZ, 1989):

- cerâmicas piezoelétricas;
- cristais de quartzo;
- compósitos piezoelétricos;

- cristais hidrossolúveis;
- monocristais piezoelétricos;
- semicondutores piezoelétricos;
- polímeros piezoelétricos.

O efeito piezoelétrico é considerado reversível, conseguindo voltar a sua forma original depois de ter passado por uma deformação. As cerâmicas piezoelétricas são corpos maciços semelhantes às utilizadas em isoladores elétricos, são constituídas de inúmeros cristais ferroelétricos microscópicos, sendo inclusive denominadas como policristalinas (PEREIRA, 2010).

2.4 Transdutores

Transdutores são dispositivos capazes de converter uma forma de energia em outra. Na maioria dos casos, eles convertem energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa (AGUIRRE, 2013). Esse tipo de dispositivo é diferente de um sensor, que é capaz de detectar uma grandeza mas não a converte em outro tipo de energia.

Os transdutores podem ser classificados em dois grupos: ativos e passivos. Um componente cuja energia de saída é fornecida pelo seu sinal de entrada é comumente chamado de transdutor passivo (DOEBELIN, 1990). De uma forma mais simples, são aqueles que geram um sinal elétrico em resposta a um estímulo. Um transdutor ativo, no entanto, tem uma fonte auxiliar de energia que fornece uma parte importante da potência de saída (DOEBELIN, 1990). São equipamentos que necessitam de uma fonte externa para operar.

Os transdutores também podem ser classificados como simples ou compostos. O transdutor simples é caracterizado por possuir apenas um estágio de transdução entre entrada e saída (AGUIRRE, 2013). Um exemplo é o detector de proximidade indutivo que produz uma variação de tensão elétrica quando algum material ferromagnético se movimenta próximo dele.

O transdutor composto se caracteriza por possuir mais de um estágio de transdução entre entrada e saída (AGUIRRE, 2013). Um exemplo seria uma célula de carga onde o primeiro estágio é o elemento elástico que converte força em deformação mecânica, o segundo é o extensômetro de resistência que converte deformação mecânica em variação de resistência elétrica e o terceiro converte variação de resistência em variação de tensão elétrica.

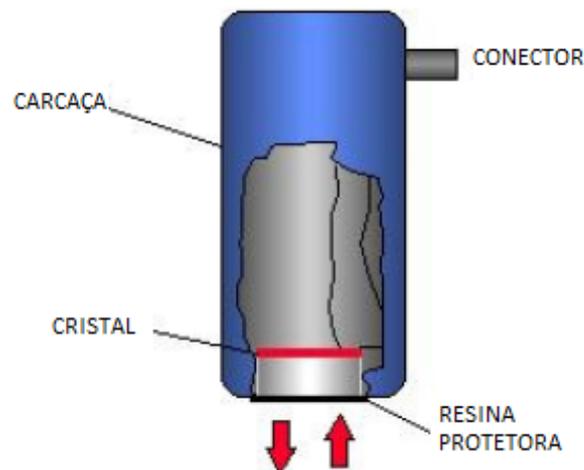
Em relação aos transdutores de ultrassom, existem quatro tipos mais usuais de transdutores: Reto ou normal, angular, duplo-cristal e o *phased-array*.

- Reto ou normal

Esse tipo de transdutor trabalha com apenas um cristal. Eles emitem ondas ultrassônicas de feixe reto no material de análise. Ao encontrar uma interface com impedância acústica diferente, uma parte da energia das ondas é refletida, gerando um sinal de eco. Esse eco é recebido pelo transdutor, que converte essa onda mecânica num sinal elétrico, que passa a ser analisado com o auxílio de um sistema de aquisição e processamento de sinais.

A face de contato do transdutor com a peça deve ser protegida contra desgastes mecânicos, podendo utilizar membranas de borracha finas e resistentes ou camadas fixas de epóxi enriquecido com óxido de alumínio (ANDREUCCI, 2014). A Figura 3 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

Figura 3 – Transdutor normal ou reto.



Fonte: retirado de ANDREUCCI (2014).

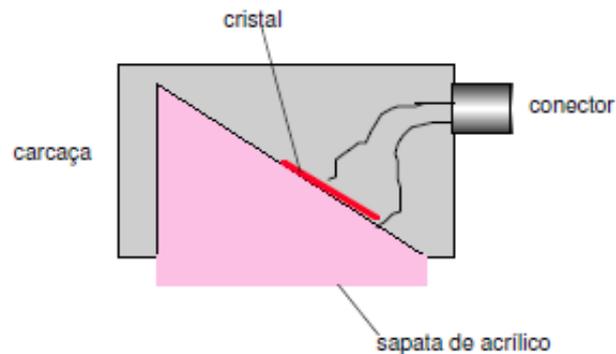
- Angular

A diferença entre transdutores do tipo reto e transdutores angulares é que o cristal do angular forma um determinado ângulo com a superfície analisada. O ângulo é obtido, inserindo uma cunha entre o cristal piezoelétrico e a superfície. A cunha pode ser fixa, sendo então englobada pela carcaça ou intercambiável (ANDREUCCI, 2014). A Figura 4 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

- Duplo-cristal

Os transdutores duplo-cristal, também chamados de transdutores duplo-elemento, utilizam dois cristais, um como emissor e outro como receptor e possuem um isolante acústico entre eles. Qualquer um dos dois cristais pode trabalhar como emissor ou receptor. Esse tipo de transdutor costuma ser utilizado nos procedimentos de

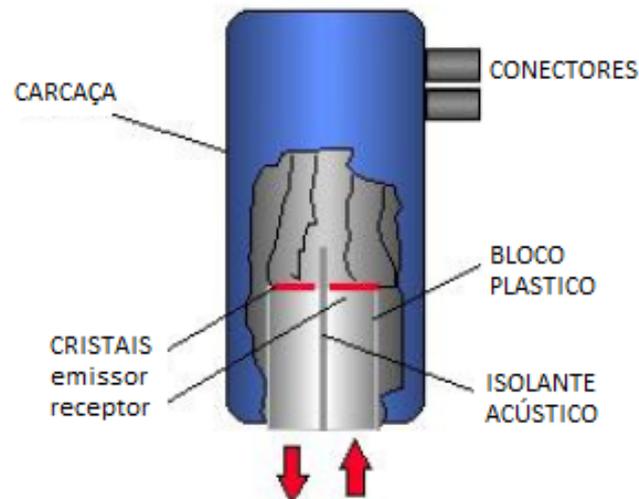
Figura 4 – Transdutor angular.



Fonte: retirado de (ANDREUCCI, 2014).

medição de espessura por ultrassom (ANDREUCCI, 2014). A Figura 5 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

Figura 5 – Transdutor duplo-cristal.



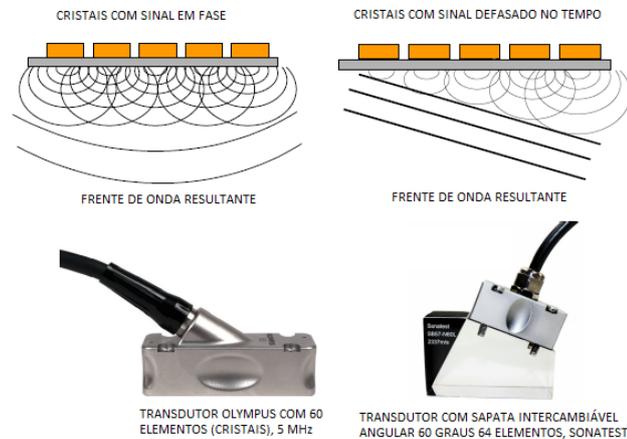
Fonte: retirado de ANDREUCCI (2014).

- *Phased-array*

O transdutor *phased-array* possui vários elementos em uma mesma estrutura como se houvesse vários transdutores retos um do lado do outro. A Figura 6 do lado esquerdo mostra os cristais operando em fase, ou seja, a excitação dos transdutores ocorrem no mesmo instante de tempo resultando em ondas perpendiculares ao plano e do lado direito mostra a excitação dos transdutores de forma defasada, ou seja, cada cristal é excitado retardado no tempo, resultando em uma onda angular à superfície. Esses elementos podem ser pulsados separadamente ou controlados por um circuito programado. Num mesmo transdutor desse tipo podem operar dezenas

de pequenos cristais (ANDREUCCI, 2014), e a frequência de trabalho da maioria dos transdutores *array* varia entre 2 MHz e 20 MHz.

Figura 6 – Transdutor *phased-array*.



Fonte: adaptado de OLYMPUS (2018).

Como possui dezenas de elementos, é possível analisar um material com vários ângulos diferentes. A principal vantagem de se utilizar esse tipo de sistema é que pode-se controlar a direção do feixe acústico eletronicamente a partir da excitação de cada elemento do *array*. Além disso, utilizando-se técnicas de processamento digital de sinais, é possível melhorar a focalização de defeitos em peças, por exemplo.

2.5 Funcionamento básico de um sistema de medição ultrassônico

Um sistema ultrassônico é constituído por circuitos eletrônicos que excitam os cristais piezoelétricos, por meio de sinais elétricos. O sinal elétrico é convertido em uma onda de pressão, que se propaga pelo meio até encontrar um material com impedância acústica diferente.

O sistema pode trabalhar em modo de transmissão e recepção como mostrado na Figura 7 ou em modo de pulso-eco como mostrado na Figura 8. Se estiver trabalhando em modo de transmissão e recepção o sinal emitido alcança o transdutor receptor, que o converte de volta para um sinal elétrico. A principal vantagem desse método é que pode-se obter um maior alcance, uma vez que o sinal acústico se propaga apenas uma vez pelo meio em análise até atingir o transdutor receptor. As desvantagens do método é que usa 2 transdutores, um como emissor e outro como receptor, aumentando o custo. Outra desvantagem está relacionada ao alinhamento dos transdutores. Quando os transdutores estão alinhados, a energia transmitida do emissor para o receptor é máxima. Entretanto, com o desalinhamento, a parcela de energia que alcança o receptor é menor. Essa variação

na energia pode influenciar os resultados dos cálculos de velocidade e atenuação do som no meio pelo qual se propaga.

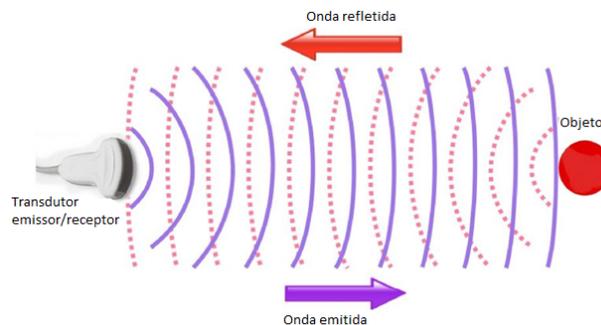
Se o sistema estiver trabalhando em modo pulso-eco, o sinal refletido se propaga de volta para o transdutor que o converte novamente em um sinal elétrico. A principal vantagem desse método é a utilização de apenas 1 transdutor deixando o método mais barato. Uma desvantagem é que a onda percorre a distância 2 vezes, a primeira quando ela é emitida e a segunda quando ela é refletida e isso tem como consequência uma maior atenuação do sinal recebido.

Figura 7 – Sistema de transmissão e recepção.



Fonte: adaptado de JUNIOR ().

Figura 8 – Sistema de pulso-eco.



Fonte: adaptado de JUNIOR ().

O sinal elétrico recebido é amplificado e filtrado. A etapa de amplificação e filtragem é importante pois os sinais recebidos diretamente dos transdutores costumam apresentar baixa amplitude e, conseqüentemente, baixa relação sinal-ruído. Observa-se que ao amplificar o sinal, amplifica-se também o ruído. Para minimizar os efeitos dos ruídos de alta frequência, utilizam-se filtros analógicos antes da etapa de aquisição.

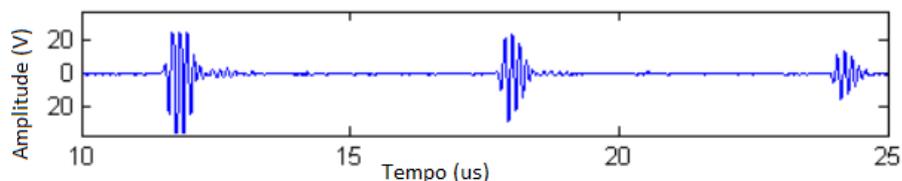
Após as etapas de amplificação e filtragem, o sinal pode ser adquirido por meio de um sistema de aquisição de dados, que pode ser composto por um osciloscópio, placa de aquisição, conversores analógico digitais de alta frequência, entre outros.

Após a etapa de aquisição, as formas de onda obtidas no domínio do tempo são armazenadas e utilizadas nas etapas de processamento. Essas informações podem ser empregadas para cálculos de parâmetros relacionados ao meio em análise, como

velocidade de propagação e atenuação acústica, ou podem ser utilizadas para gerar imagens ultrassônicas.

A representação mais básica, chamada A-Scan, apresenta os sinais adquiridos no domínio do tempo. Na representação A-scan, os ecos que aparecem nos gráficos representam a reflexão do som na interface do material. A Figura 9 mostra o primeiro, segundo e terceiro ecos que foram apresentados na tela de um aparelho.

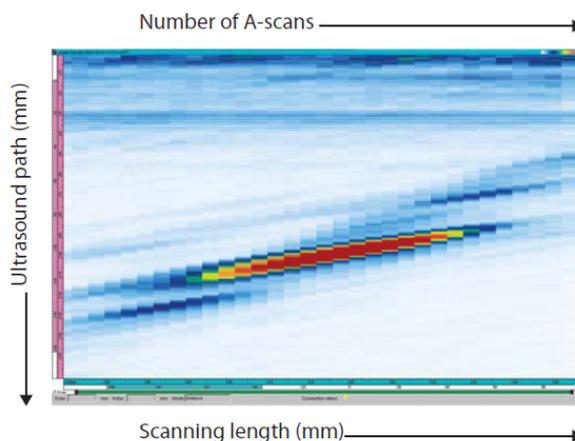
Figura 9 – Representação A-scan.



Fonte: retirado de Aragão et al. (2012).

A representação B-scan representa uma imagem em corte de um meio em análise. Ness representação, o eixo vertical pode ser utilizado para representar o tempo de voo da onda ou sua distância de propagação, enquanto o eixo horizontal representa a posição da varredura. Um B-scan é uma série de sinais A-scan em que cada A-scan é mostrado em função de sua posição da amostragem. A Figura 10 mostra um exemplo de uma representação B-scan.

Figura 10 – Representação B-scan.

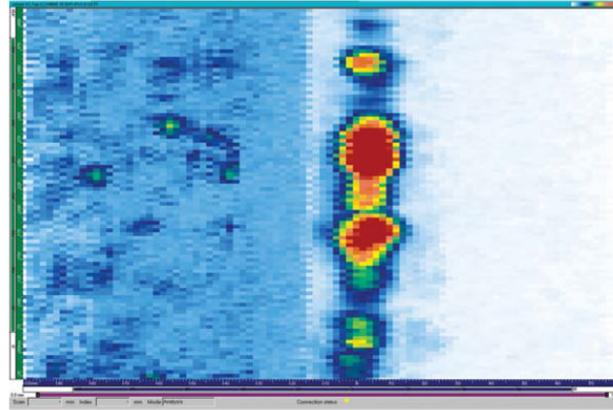


Fonte: retirado de OLYMPUS (2018).

A representação C-Scan é utilizada em situações em que se deseja obter uma imagem acústica em três dimensões. Uma imagem C-Scan é composta por um conjunto de imagens B-Scan, e o material inspecionado será representado a partir de uma das vistas de uma perspectiva isométrica. Com o transdutor *phased-array* a inspeção é mais

rápida devido à quantidade de cristais presentes. A Figura 11 mostra um exemplo de uma representação C-scan.

Figura 11 – Representação C-scan.



Fonte: retirado de OLYMPUS (2018).

Para realizar o cálculo da velocidade de propagação ou distâncias, devem ser calculados os tempos de atrasos dos sinais de ultrassom (tempo de voo) e, a partir, desse tempo, conhecendo a velocidade do meio ou a distância, pode-se calcular o parâmetro desejado. Uma das formas de se encontrar esse valor é através da utilização da correlação cruzada.

A técnica da correlação cruzada é um método que verifica o grau de similaridade entre dois sinais distintos. Essa técnica relaciona os sinais de eco e pode ser utilizada para a estimação do tempo de atraso entre os sinais. A diferença de tempo entre os dois sinais está relacionada ao ponto máximo da função de correlação cruzada entre eles.

Para calcular a correlação cruzada é necessário um sinal de referência e um sinal do eco. Na Figura 12 são mostrados o sinal de referência $x[n]$, que é o primeiro sinal que o transdutor receptor recebe, e o sinal eco $y[n]$, que o segundo sinal recebido pelo transdutor receptor.

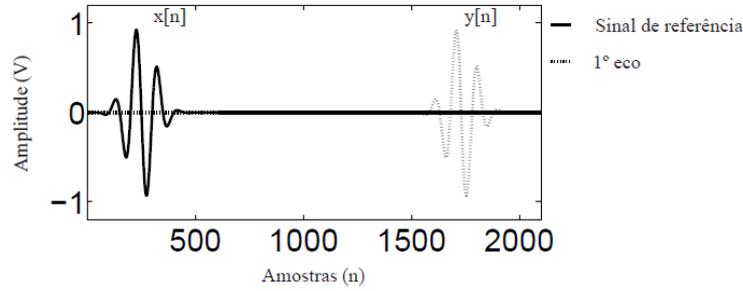
De acordo com Oppenheim e Schaffer (2012), a correlação cruzada pode ser definida como

$$C_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n+l], \quad (2.5)$$

onde l indica o defasamento do sinal $y[n]$ em relação ao sinal $x[n]$. Se l é positivo $y[n]$ está adiantado e se l é negativo $y[n]$ está atrasado em relação $x[n]$.

Sendo $x[n]$ o sinal de referência e $y[n]$ o sinal do primeiro eco, é possível alterar (2.5) para o sistema utilizado neste trabalho. Supondo que o sinal do primeiro eco não apresenta distorção, tem-se

Figura 12 – Sinais para análise da correlação cruzada.



Fonte: do autor.

$$y[n] = \alpha x[n - D], \quad (2.6)$$

e ainda fazendo $n = n + l$

$$y[n + l] = \alpha x[n + l - D], \quad (2.7)$$

Substituindo (2.7) em (2.5), e definindo o tamanho de $x[n]$ e $y[n]$ como N , obtém-se a expressão da correlação cruzada entre duas sequências de duração finita:

$$C_{xy}(l) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \alpha x[n + l - D] = \alpha c_{xx}[l - D], \quad 0 \leq l < 2N - 2, \quad (2.8)$$

onde c_{xx} é a autocorrelação de $x[n]$, que nada mais é do que a correlação cruzada de $x[n]$ com ele mesmo.

A função de autocorrelação apresenta duas propriedades para estimação do tempo de atraso (PROAKIS, 2001):

- O ponto máximo do sinal de autocorrelação se localiza na origem, ou seja, o máximo de $c_{xx}[l] = c_{xx}[0]$;
- A função de autocorrelação é par, ou seja, $c_{xx}[l] = c_{xx}[-l]$.

Essas informações indicam que o máximo da função de autocorrelação ocorre justamente quando $l = D$. Para determinar esse valor a partir do sinal de correlação, cujo comprimento é dado por $2N - 1$ e tem início em $l = 0$, deve-se subtrair o comprimento N dos sinais de entrada e somar 1 amostra.

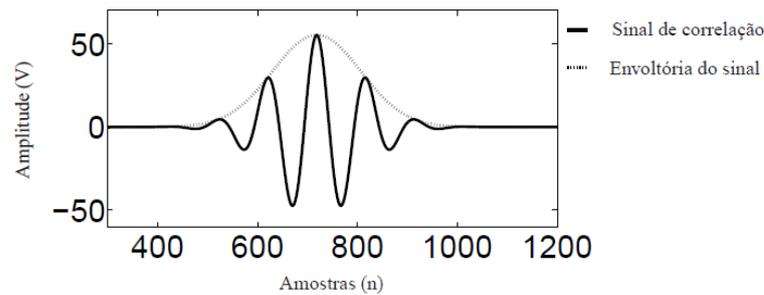
Aplicando o cálculo do máximo para o exemplo da Figura 12, na qual os dois sinais possuem 2200 amostras cada e a defasagem entre eles é de 1481 amostras, tem-se a seguinte expressão:

$$l = 2 \times 2200 - 1 - 2200 - 1481 + 1 = 719 \quad (2.9)$$

O resultado da correlação cruzada entre os sinais $x[n]$ e $y[n]$ é mostrado na Figura 13, onde é utilizado a transformada de Hilbert para obter a envoltória do sinal facilitando a determinação do pico máximo do sinal, que se encontra em 719.

Essa técnica apresenta bons resultados na estimação do tempo de atraso entre os sinais, e pode ser usada também com sinais ruidosos, como os sinais obtidos nesse trabalho.

Figura 13 – Sinal resultante após o cálculo da correlação cruzada.



Fonte: do autor.

2.6 Comentários

No capítulo, foram apresentados conceitos teóricos para o desenvolvimento do trabalho, como, o que são ondas, quais ondas existem e dando ênfase ao conceito de ondas sonoras que são as utilizadas no trabalho. Foi apresentado também os conceitos de transdutores e seus variados tipos, a explicação do funcionamento do sistema de medição ultrassônica, onde, explicou-se os modos de operação de transmissão e o de pulso eco, quais suas vantagens e desvantagens e apresentou-se os tipos de representação de imagem na tela de um aparelho de ultrassom. Por fim, é apresentado o método de cálculo de velocidade da onda por meio do método de correlação cruzada utilizando uma gaussiana.

3 Metodologia

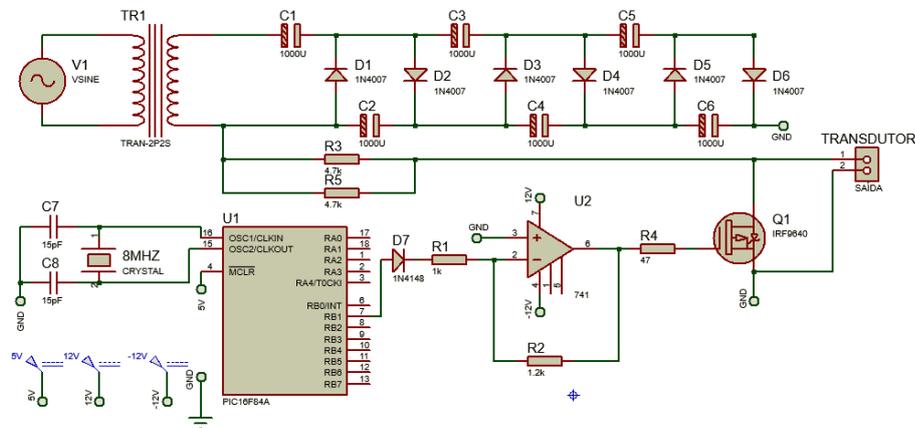
Neste capítulo, apresentam-se a metodologia de projeto dos circuitos de excitação e recepção, bem como os detalhes referentes ao sistema de aquisição e processamento digital de sinais.

3.1 Circuito de excitação

O circuito desenvolvido é diferente dos circuitos mencionados ao longo da revisão bibliográfica, pois muitos dos componentes citados pelos demais autores não estavam a disposição no mercado local. Com isso, foi necessário realizar um projeto autoral e montar o circuito com componentes fáceis de encontrar no mercado, e assim, utilizar eletrônica analógica e digital para alcançar os objetivos do trabalho.

O objetivo do trabalho é desenvolver um circuito pulsador para excitar transdutores ultrassônicos para ar, com frequência central de 40 kHz utilizados para medições de distâncias. A Figura 14 mostra o esquemático do circuito proposto.

Figura 14 – Esquemático do circuito pulsador ultrassônico.



Fonte: do autor.

O circuito foi projetado para excitar um transdutor com um pulso negativo de 100 V. A largura do pulso deve ser controlada e para isso é utilizado um microcontrolador que pode ser usado para enviar sinais codificados para um MOSFET forçando-o a trabalhar como chave para controle do pulso.

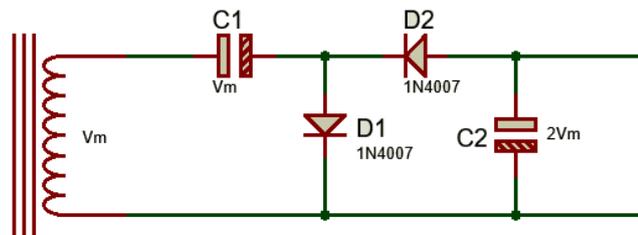
Partindo de uma fonte de tensão de 12 Vca, a tensão é multiplicada até que seja obtido um valor de tensão de 100 V. A tensão de 12 V é obtida por meio de um transformador abaixador 127/12 V representado na Figura 14 por TR1. Para a escolha do componente foi levado em consideração principalmente a sua relação de transformação.

O circuito necessita de uma fonte de tensão negativa contínua com um valor de aproximadamente -100 V na saída. Para fornecer uma tensão de -100 V ao circuito, utilizou-se o multiplicador de tensão, no qual, invertendo a polarização, se consegue a tensão negativa. A tensão é utilizada para excitar o transdutor piezoelétrico.

A Figura 15 mostra um estágio do circuito dobrador de tensão. Durante o semiciclo de tensão positiva o diodo D1 conduz carregando o capacitor C1 até a tensão V_m do transformador e o diodo D2 trabalha como chave aberta. Durante o semiciclo de tensão negativa o diodo D2 conduz carregando o capacitor C2 com $2V_m$ e diodo D1 trabalha como chave aberta, produzindo na saída $2V_m$.

O circuito dobrador de tensão de meia onda foi utilizado como base para obtenção da tensão desejada. Foram utilizados vários estágios em cascata para se obter a tensão de saída esperada.

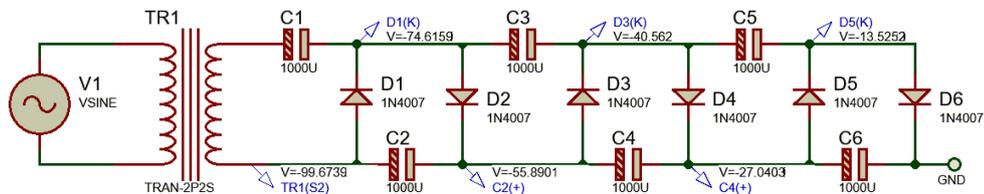
Figura 15 – Circuito dobrador de tensão.



Fonte: modificada de Boylestad e Louis (2004).

A adição de mais dois estágios dobradores de tensão conforme a Figura 16, faz com que a saída seja $8V_m$, multiplicando tensão de entrada e gerando a tensão desejada de aproximadamente -100 V. A escolha desse valor de tensão na saída do circuito se deve as recomendações do fabricante dos transdutores, que indicam que a tensão máxima de excitação recomendada é de -100 V.

Figura 16 – Circuito multiplicador de tensão.

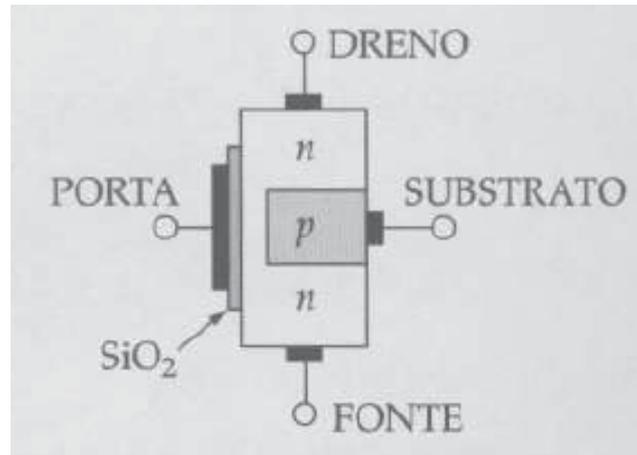


Fonte: do autor.

A fim de gerar os pulsos estreitos a partir dos sinais de tensão obtidos após a implementação dos circuitos multiplicadores de tensão, utilizou-se um transistor do tipo MOSFET.

De acordo com Malvino e Bates (2016), o MOSFET de canal p é composto por dois substratos tipo n e um canal tipo p mostrado na Figura 17. Nesse dispositivo, os elétrons livres fluem da fonte para o dreno por meio de um canal induzido pela porta no substrato tipo p.

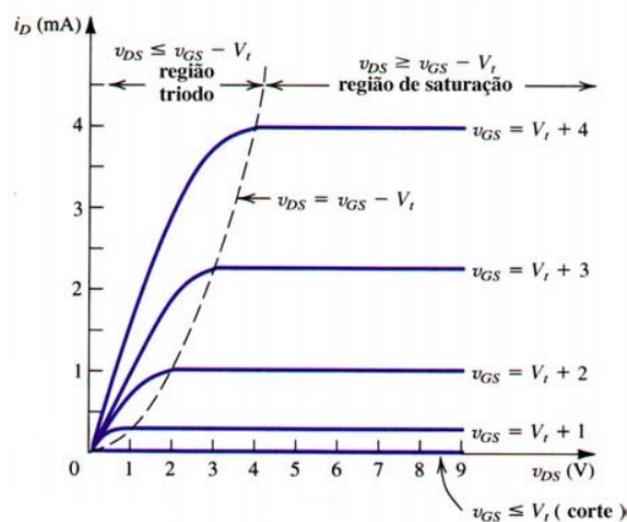
Figura 17 – MOSFET canal tipo P.



Fonte: retirado de (MALVINO; BATES, 2016).

O transistor de efeito de campo possui vários tipos de operações e os principais são no modo de corte, triodo e saturação. Neste trabalho, foram utilizados os modos corte e triodo, que fazem com que o MOSFET opere como chave aberta e chave fechada. A Figura 18 apresenta um gráfico mostrando as regiões em função das tensões.

Figura 18 – Gráfico de regiões do MOSFET.



Fonte: retirado de Sedra e Smith (2007).

O modo de operação de corte funciona como chave aberta e a tensão V_{gs} tem que ser menor que a tensão limiar $V_{gs} < V_t$ (SEDRÁ; SMITH, 2007).

O modo de operação triodo funciona como chave fechada, mas para operar nessa região é preciso primeiro induzir o canal do substrato, ou seja, $V_{gs} \geq V_t$ e então manter V_{ds} pequeno o suficiente de modo que o canal permaneça contínuo, $V_{gd} > V_t$ ou também podemos escrever em termos de V_{ds} , $V_{ds} \leq V_{gs} - V_t$ (SEDRA; SMITH, 2007).

O modo de operação de saturação é usado se o MOSFET for utilizado como amplificador.

Para o MOSFET trabalhar nos modos de operação necessários, foi utilizado um amplificador operacional na configuração inversora, onde a saída do amplificador faz a tensão de saída do circuito ser negativa em relação a tensão de entrada, podendo ou não ter um ganho.

Para o projeto foi escolhido o MOSFET IRF9640, que suporta uma tensão de dreno de -200 V, uma corrente de até -11 A e tem um tempo de comutação rápido, onde o tempo de subida é 43 ns e o de descida é 38 ns. Para funcionar como chave fechada, a tensão de excitação do *gate* deve ser maior que a tensão V_{gs} e, para chave aberta, a tensão de excitação do *gate* deve ser menor que a tensão V_{gs} . A tensão V_{gs} pode ser obtida no *datasheet* do componente com valor mínimo de -2 V e máximo de -4 V.

Com o MOSFET rápido comutando entre chave aberta e fechada, ora o GND estará na saída e ora a tensão negativa do circuito multiplicador de tensão, obtendo o pulso necessário para excitar um transdutor piezoelétrico.

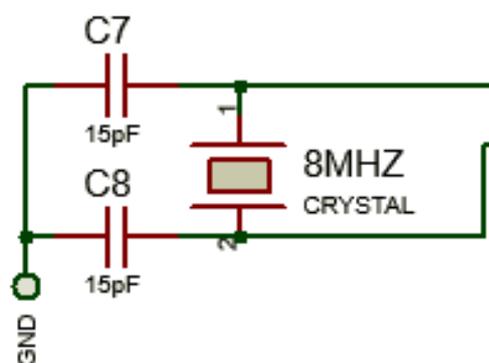
O circuito de controle do pulso utiliza um microcontrolador PIC16F84 da Microchip para controlar a largura de pulso. Inicialmente, o pulso deveria ser na ordem de ns (nanosegundos) mas devido a limitações do microcontrolador, optou-se por trabalhar com pulsos com maior duração na faixa de microsegundos. Para controlar a largura do pulso, utilizou-se uma saída digital do microcontrolador. Dessa forma, para controlar a largura do pulso, basta controlar o tempo em que a saída do microcontrolador permanece em nível alto ou baixo.

O microcontrolador usado no projeto possui 18 pinos e uma alimentação de 5 Vdc e algumas das principais especificações para uso no projeto são:

- 13 pinos de entrada/saída com controle de direção individual;
- Utiliza arquitetura RISC;
- Barramento de dados de 8 bits;
- Utiliza memória EEPROM de dados;
- Frequência máxima de operação de 10 MHz;
- 64 bytes de dados de EEPROM;
- 68 bytes de dados de memória.

Alguns detalhes do projeto são necessários para melhor entendimento da execução. No microcontrolador, é necessário usar um circuito oscilador externo, conforme sugerido no *datasheet* do componente. O oscilador é composto pelos capacitores C7, C8 e pelo cristal de 8 MHz, conforme mostrado na Figura 19.

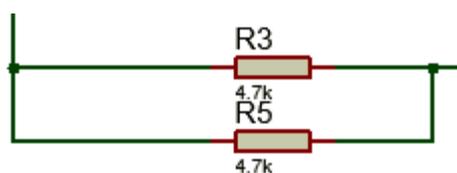
Figura 19 – Circuito Oscilador.



Fonte: do autor.

Os resistores R3 e R5 de 4,7 k Ω mostrados na Figura 20 são utilizados para que, no momento em que o MOSFET estiver trabalhando como chave fechada, não haja um curto circuito. Foram utilizados resistores de potência (3 W), pois uma corrente de 20 mA irá circular por eles durante o funcionamento do circuito.

Figura 20 – Resistores de potência.

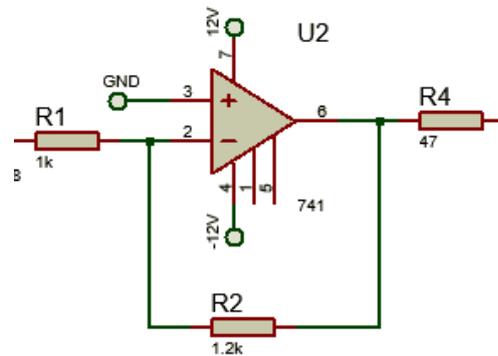


Fonte: do autor.

O resistor R4 de 47 Ω na saída do amplificador mostrado na Figura 21 é utilizado para isolar a capacitância do *gate* do MOSFET. A Figura 22 mostra uma imagem da placa 3D do circuito completo.

O circuito pode ser modificado para ser utilizado em outros tipos de transdutores apenas modificando sua tensão de saída. Para aumentar a tensão de saída, pode-se acrescentar mais estágios dobradores de tensão. Para que não seja necessário ficar projetando circuitos a cada tensão desejada, basta colocar uma chave seletora para selecionar o nível de tensão desejada. Essa chave selecionaria a quantidade de estágios dobradores. Um cuidado que deve ser tomado é que a cerâmica piezoelétrica dos transdutores é muito fina, logo uma tensão muito alta acarretaria em sua ruptura, causando danos aos transdutores.

Figura 21 – Amplificador do circuito pulsador.



Fonte: do autor.

Figura 22 – Imagem 3D da placa do circuito.



Fonte: do autor.

3.2 Circuito receptor

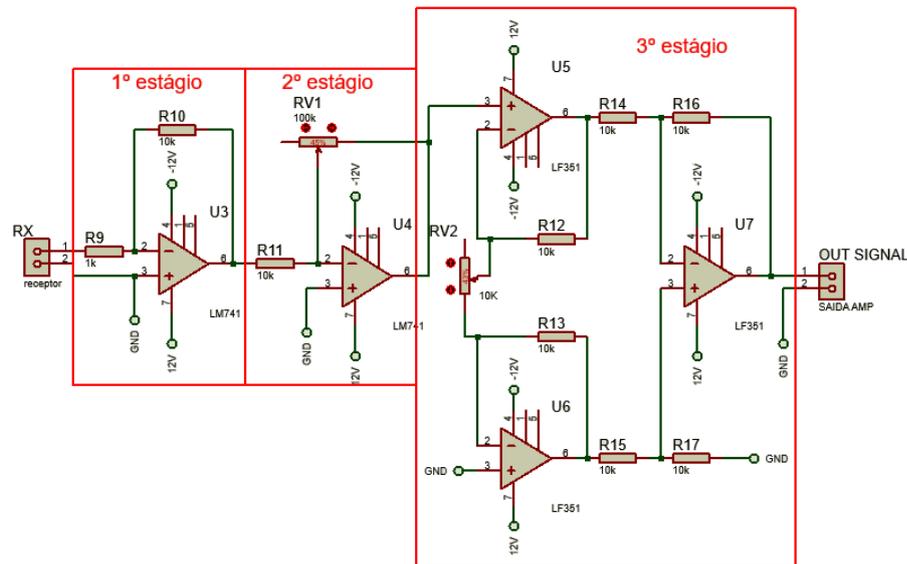
O objetivo do circuito receptor é amplificar os sinais recebidos pelo transdutor receptor, melhorando a relação sinal-ruído dos sinais adquiridos e simplificando as etapas de pós-processamento.

O circuito de amplificação é composto por 3 estágios. O primeiro é um amplificador operacional na configuração inversora com ganho fixo, o segundo estágio é outro amplificador operacional na configuração inversora mas com ganho variável e, por fim, no terceiro estágio foi projetado um amplificador de instrumentação utilizando três amplificadores operacionais.

A Figura 23 mostra o circuito receptor completo, onde a entrada RX é ligado o transdutor receptor.

O primeiro estágio é composto pelo amplificador operacional U3 e os resistores R9 e R10 mostrados na Figura 23, e possui um ganho de -10 (V/V) que pode ser calculado

Figura 23 – Circuito receptor.



Fonte: do autor.

utilizando

$$G = -\frac{R10}{91}. \quad (3.1)$$

O segundo estágio é composto pelo amplificador operacional U4, o resistor R11 e o potenciômetro RV1 utilizado para variar o ganho do sistema. O circuito foi projetado de modo que o ganho possa ser ajustado entre 0 (RV1=0) e -10 (V/V) (RV1=100 k Ω). Como os dois primeiros estágios estão em cascata, o ganho total é igual a multiplicação dos ganhos do primeiro e segundo estágios, ou seja, pode variar de 0 até 100 (V/V) .

O terceiro estágio é um amplificador de instrumentação construído com 3 amplificadores operacionais, U5, U6 e U7 mostrados na Figura 23. Ele foi usado por possuir uma alta impedância de entrada, por apresentar alta taxa de rejeição de modo comum e por permitir um ajuste de ganho através da variação de apenas um resistor. De acordo com Boylestad e Louis (2004), o ganho desse tipo de circuito pode ser calculado por

$$G = 1 + \frac{2R}{R_p}. \quad (3.2)$$

Para o circuito apresentado, $R = 10 \text{ k}\Omega$ e $R_p = RV2$.

O ganho do amplificador de instrumentação pode ser ajustado com o potenciômetro RV2 mostrado na Figura 23. O amplificador utilizado possui um ganho mínimo de 2 (V/V) e o ganho máximo deve ser ajustado até que a tensão de saída do amplificador seja levemente menor que a tensão de alimentação, para que o amplificador não sature.

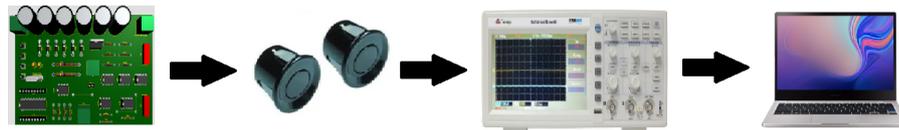
Os três estágios de amplificação encontram-se em cascata, logo, para atingir o ganho máximo é necessário multiplicar os ganhos de cada estágio entre si. Para controlar

o ganho do circuito receptor, é preciso regular os potenciômetros RV1 e RV2 mostrados na Figura 23, a fim de que o total não seja zero e nem alto o suficiente para provocar saturação.

3.3 Aquisição de dados

A aquisição dos sinais elétricos obtidos após a etapa de amplificação foi realizada utilizando um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS2022). O osciloscópio foi conectado a um computador através de um cabo USB e o *software* MATLAB foi utilizado para armazenar os sinais digitais. A Figura 24 mostra o sistema de aquisição de dados completa com o circuito, transdutor, osciloscópio e computador.

Figura 24 – Circuito receptor.



Fonte: do autor.

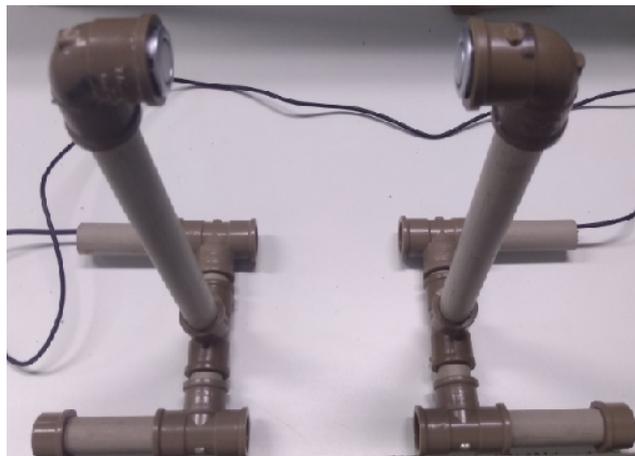
O circuito emite um pulso excitando o transdutor emissor, que gera uma onda ultrassônica que percorre o meio até encontrar um obstáculo, parte da onda é transmitida e parte refletida, a parte refletida retorna para o transdutor receptor que converte a onda em um sinal elétrico. O sinal passa pelo circuito amplificador que está ligado ao osciloscópio onde pode-se visualizar o sinal em sua tela. O osciloscópio é ligado ao notebook que com o auxílio do Matlab armazena os dados dos sinais.

3.4 Testes iniciais

Para verificar o funcionamento do circuito, foram realizadas medições para se determinar o valor da velocidade de propagação do som no ar. Para isso, os transdutores foram dispostos um de frente para o outro (emissor e receptor), o emissor ligado ao circuito eletrônico e receptor ligado ao osciloscópio. Os dados foram adquiridos e processados utilizando o Matlab.

A disposição dos transdutores foi realizada utilizando um suporte fabricado em PVC mostrado na Figura 25 e alinhado utilizando a extremidade reta de uma mesa e afastando os transdutores em passos de 10 cm até contabilizar 8 medidas diferentes e adquirindo os vetores de tempo e amplitude de cada sinal medido por meio do Matlab interligado com o osciloscópio.

Figura 25 – Suporte em PVC.



Fonte: do autor.

Foram utilizados dois métodos para realização do cálculo da velocidade do som no ar. O primeiro método foi o da correlação cruzada. Utilizando os dados adquiridos durante a medição, realizou-se a correlação cruzada entre o sinal de referência e o sinal de eco de cada distância para utilizar o número da amostra do pico da envoltória da correção cruzada e calcular o tempo de voo da onda no meio para cada medida individualmente e analisar os resultados.

O segundo método foi utilizado o pico máximo do sinal de referência e o pico máximo do sinal de eco, onde, para encontrar o tempo percorrido pela onda é preciso subtrair os picos dos sinais e multiplicar pelo tempo de amostragem. Como feito no método de correlação cruzada, também foi realizado os cálculos do tempo de voo da onda no meio para cada medida individualmente e assim analisar os resultados.

Para os dois métodos utilizado, a distância era conhecida e com o cálculo do tempo de voo da onda, pode-se calcular a velocidade de propagação do som no meio utilizando a primeira lei de Newton e comparar com os valores teóricos.

3.5 Orçamento do projeto

Como citado anteriormente, um dos objetivos do projeto era que o protótipo deveria ser projetado com um baixo custo. Na Tabela 2 é apresentado o orçamento total.

O custo do projeto pode ser comparado a um projeto com objetivo semelhante realizado por Brown e Lockwood (2002), que apresentou um custo de 50 dólares. Pulsadores comerciais costuma apresentar valores mais elevados, como é o caso do DPR300 da JSR Ultrasonic que custa em média 3500 dólares e um Olympus Epoch 650 Ultrasonic Flaw Detector custa em média 6500 dólares. Esses equipamentos operam com frequências mais altas e possuem ganho mais elevado.

Tabela 2 – Descrição do orçamento do protótipo.

Quantidade	Descrição	Valor unitário	Valor total
01	Transformador 127/12 V 1 A	R\$35,00	R\$35,00
06	Capacitor eletrolítico 1000 uF x 50V	R\$0,68	R\$4,08
06	Diodo 1N4007 2	R\$0,09	R\$0,54
02	Resistor 4.7 k Ω 3Watts	R\$1,00	R\$2,00
01	Microcontrolador PIC16f84	R\$9,00	R\$9,00
01	Cristal oscilador 8 MHz 2	R\$0,71	R\$0,71
02	Capacitor cerâmico 15pF	R\$0,50	R\$1,00
01	Diodo rápido 1N4148	R\$0,08	R\$0,08
01	Amplificador operacional LM741	R\$1,04	R\$1,04
02	Resistor 1 k Ω	R\$0,10	R\$0,20
01	Resistor 1.2 k Ω	R\$0,10	R\$0,10
01	Resistor 47 Ω	R\$0,10	R\$0,10
08	Resistor 10 k Ω	R\$0,10	R\$0,80
01	MOSFET canal P IRF9640	R\$5,66	R\$5,66
01	Potenciômetro 10 k Ω	R\$1,40	R\$1,40
01	Potenciômetro 100 k Ω	R\$1,40	R\$1,40
02	Knob para potenciômetro	R\$1,00	R\$2,00
05	Amplificador operacional LF351	R\$1,20	R\$6,00
01	Porta fusível 5x20	R\$1,10	R\$1,10
01	Chave liga/desliga	R\$2,20	R\$2,20
01	Placa de fenolite 10x10	R\$6,00	R\$6,00
		Valor total	R\$80,41

Fonte: do autor.

A vantagem do circuito projetado nesse trabalho é que os componentes eletrônicos utilizados são fáceis de se encontrar no mercado local.

3.6 Geração de imagens acústicas

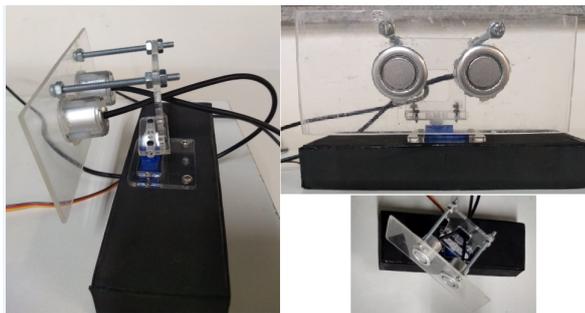
3.6.1 Posicionador

Para adquirir os dados e gerar a imagem, foi construída a estrutura mostrada na Figura 26, onde para rotacionar os transdutores foi utilizado um servo motor e um arduino para fazer o controle de rotação do servo.

A Figura 27 mostra o esquema de funcionamento da estrutura para movimentação dos transdutores.

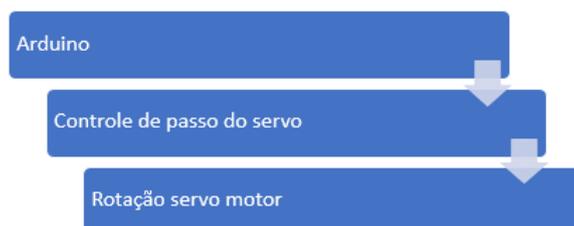
O sistema realiza a rotação do servo motor com um passo de 2° variando de -45° até 45°. Para controlar a rotação do sistema, foi desenvolvido um algoritmo para arduino em que, a cada 2 segundos, ele envia um pulso de controle para que o servo motor realize a rotação.

Figura 26 – Estrutura para transdutores.



Fonte: Do autor.

Figura 27 – Esquema de funcionamento da estrutura.



Fonte: Do autor.

O arduino é ligado em um computador e alimentado pelos 5 Vdc da porta USB, o algoritmo envia o pulso para o servo motor que é alimentado pelos 5 Vdc do arduino fazendo o servo rotacionar. Para que não haja interferência humana, o pulso de controle do servo motor foi controlado via controle serial utilizando o computador por meio do ambiente de simulação MATLAB. O algoritmo possui um *loop* para excitar o servo motor fazendo rotacionar e, a cada iteração, os dados de tempo e velocidade são salvos em uma matriz para posteriormente realizar o tratamento de dados.

3.6.2 B-Scan

Para gerar as imagens, foram adquiridos dados utilizando a estrutura para os transdutores, o osciloscópio e um computador com o ambiente de simulação MATLAB. Com o sistema completo em funcionamento, foram dispostos objetos em diferentes distâncias e com o transdutor receptor ligado ao osciloscópio que foi ligado ao ambiente MATLAB por meio do computador.

Um algoritmo foi desenvolvido para tratar os sinais de ecos e transformá-los em imagem ultrassônica. O algoritmo carrega os dados obtidos dos arranjos utilizados para os testes e separa os valores de tempo e amplitude para facilitar a manipulação das variáveis, filtra a amplitude do sinal para evitar interferência de ruídos, interpola os sinais, calcula a distância em metros e define a abertura de fecho que a imagem será gerada. O sistema foi

projetado para escanear um setor circular de 90° (-45° a 45°) com raio de 45 cm.

Assumindo que a velocidade de propagação do som é conhecida, pode-se converter o eixo de tempo em distância percorrida a partir da relação $R = t \cdot c/2$. A distância de propagação é dividido por um fator de 2 pelo fato do sinal se propagar duas vezes pelo meio.

É necessário decompor os sinais adquiridos usando um sistema cartesiano ortogonal para formar um *grid*. Para isso, deve-se levar em consideração o ângulo formado entre os transdutores e o anteparo

$$Y = r \cdot \cos(\theta), \quad (3.3)$$

$$X = r \cdot \sin(\theta). \quad (3.4)$$

sendo:

r : distância de propagação da onda (m);

θ : ângulo formado entre os transdutores e anteparo (em graus).

Para melhor a resolução das imagens geradas, optou-se por interpolar os sinais X e Y. Para isso, utilizou-se uma interpolação linear de fator 5. Para gerar as imagens, utilizou-se a função `PolarpColor` criada por Cheynet (), que tem como objetivo representar um gráfico de pseudo-cor nas coordenadas polares.

3.7 Comentários

Nesse capítulo foi apresentado o circuito de excitação com entrada de 127 V, pulso de saída de -100 V gerado por um circuito multiplicador de tensão e largura de pulso de 8 us controlado por um microprocessador. O circuito receptor apresenta 3 estágios de amplificação sendo que, em dois, utiliza-se o amplificador operacional na configuração inversora e o terceiro utiliza um amplificador de instrumentação implementado com 3 amplificadores operacionais.

O capítulo mostra também o sistema de aquisição de dados composto pela placa eletrônica, transdutores, osciloscópio e o *notebook* para utilização do Matlab. A aquisição dos dados conta com suporte criado para rotacionar os transdutores com um passo de 2° e variando de -45° até 45° . Após aquisição dos dados, eles são tratados para gerar imagens acústicas do tipo B-Scan utilizando a função `PolarpColor`.

4 Resultados e Discussão

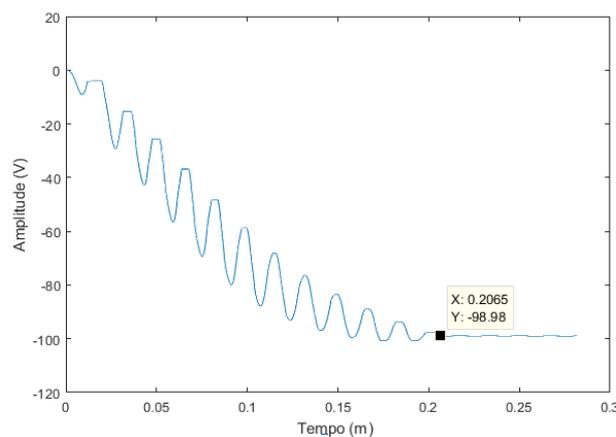
Nessa seção serão apresentados as características do sistema eletrônico, as respostas dos transdutores utilizados para medição de distâncias e o comportamento do ganho do sistema de amplificação. Além disso, os resultados das simulações dos circuitos projetados são comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Foram realizados ensaios de calibração, onde calculou-se a velocidade de propagação do som no ar e, ao final, foram geradas imagens acústicas através do método B-Scan.

4.1 Caracterização do sistema eletrônico

4.1.1 Simulação dos circuitos propostos

Utilizando o *software* SPICE, realizou-se uma simulação do circuito apresentado na Figura 16. A forma de onda da tensão de saída obtida é mostrada na Figura 28, onde após 206 ms a tensão se estabiliza em aproximadamente -98,98 V.

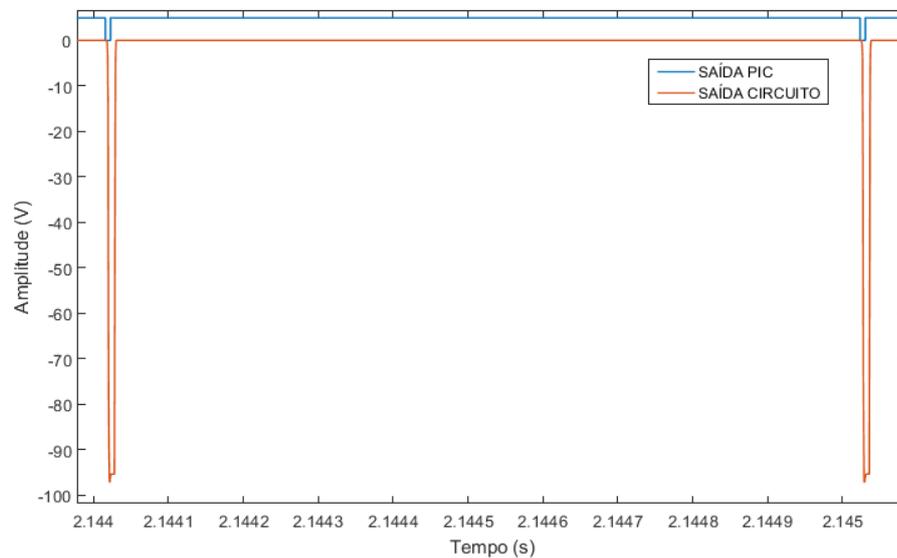
Figura 28 – Saída da simulação do multiplicador de tensão.



Fonte: do autor.

A forma de onda obtida após o chaveamento do MOSFET canal p pode ser vista na Figura 29, onde a onda azul representa o pulso de saída do microcontrolador de 5 V e a onda vermelha a saída do circuito pulsador mostrando -96 V. Essa queda de tensão apresentada deve-se a configuração da largura de pulso do microcontrolador ser ajustada em 8 μ s e também devido ao tempo de carregamento do MOSFET. A frequência de repetição do pulso foi ajustada em 1 kHz. A definição correta desse valor é importante, pois se essa frequência for muito alta, pode haver sobreposição de sinais dos transdutores, já que, a excitação do transdutor é controlada a partir do pulso do microcontrolador.

Figura 29 – Simulação de ondas da saída do microcontrolador e da saída do circuito pulsador.



Fonte: do autor.

O circuito possui algumas limitações, como o tempo de chaveamento do microcontrolador. O microcontrolador divide o *clock* internamente por 4. Dessa forma, como é utilizado um cristal oscilador de 8 MHz, o ciclo de máquina é 0,5 μ s limitando a largura de pulso. Em teoria, o objetivo do circuito seria enviar um impulso ao transdutor, mas devido às limitações do microcontrolador, foi utilizado um pulso estreito para excitação.

Ao conectar o transdutor na saída do circuito que emite um pulso de -100 V, a tensão tem uma queda devido ao descasamento entre a impedância de saída do circuito e a impedância do transdutor. Para o circuito proposto neste trabalho, considerando os transdutores de 40 kHz para ar, essa queda de tensão foi de, aproximadamente, 30 V.

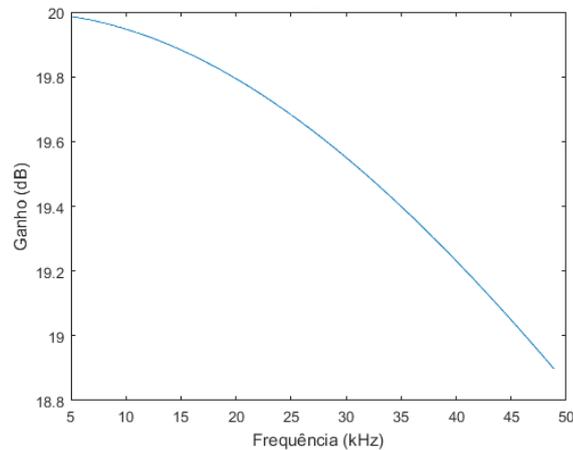
A impedância da cerâmica pode ser estimada, já que, temos a tensão aplicada no transdutor. Pode-se considerar que os resistores R3 e R5 estão em série com o transdutor, logo a impedância pode ser calculada utilizando um divisor de tensão, encontrando uma impedância de aproximadamente 5 k Ω .

Optou-se por utilizar um microcontrolador para que fosse possível controlar a largura de pulso utilizando apenas programação simples. Além disso, pode-se utilizar não só apenas um pulso para excitar o transdutor mas também vários pulsos seguidos com diferentes tempos de atraso (trem de pulsos). Por meio do microcontrolador, pode-se controlar quantos pulsos quer enviar e qual o intervalo de tempo entre eles.

Para avaliar a resposta em frequência do circuito amplificador proposto, foram realizadas simulações utilizando um *software* SPICE. Durante a simulação, utilizou-se um sinal senoidal de 1 Vpp na entrada do circuito e variando sua frequência em passos de 5 kHz, iniciando em 5 kHz e terminando em 50 kHz. As Figuras 30, 31 e 32 mostram as

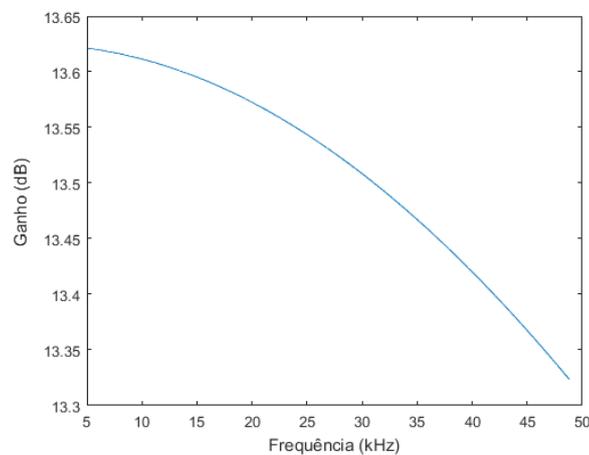
curvas dos ganhos dos estágios em relação ao sinal de entrada de cada estágio e a Figura 33 mostra o ganho da saída em relação à entrada.

Figura 30 – Simulação do primeiro estágio do circuito amplificador.



Fonte: do autor.

Figura 31 – Simulação do segundo estágio do circuito amplificador..

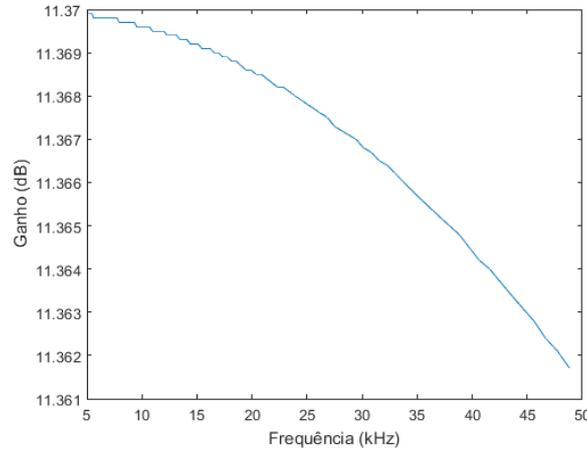


Fonte: do autor.

As Figuras 30 e 31 mostram as curvas do ganho de dois amplificadores na configuração inversora. É possível observar uma atenuação no espectro de magnitude à medida que a frequência de excitação aumenta. Essa queda está relacionada à limitação do componente eletrônico utilizado nos dois primeiros estágios, que não se comportam bem trabalhando em altas frequências.

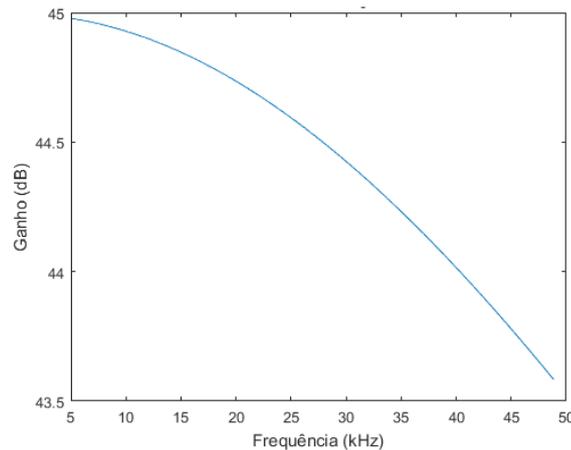
A Figura 32 mostra o ganho do amplificador de instrumentação em relação ao ganho do segundo estágio. Pode-se observar que como o ganho de tensão ajustado nesse estágio foi menor, a resposta de magnitude permanece praticamente estável.

Figura 32 – Simulação do terceiro estágio do circuito amplificador.



Fonte: do autor.

Figura 33 – Simulação do circuito completo, considerando os três estágios em cascata..



Fonte: do autor.

Observando o resultado apresentado na Figura 33, pode-se perceber que o ganho tem um decréscimo na medida em que a frequência aumenta. Trata-se de uma característica dos amplificadores operacionais utilizados durante o projeto do circuito, que apresentam uma redução da largura de banda à medida que o ganho ajustado aumenta.

Para mostrar que o amplificador operacional utilizado nesse projeto não se comporta bem para altas frequências, é possível calcular a largura de banda para o amplificador inversor. Sedra e Smith (2007) mostram que o ganho em malha fechada do amplificador inversor em função do ganho interno pode ser calculado a partir da expressão

$$G_{cl} = -\frac{R2}{R1} \frac{A\beta}{1 + A\beta}, \quad (4.1)$$

Onde β é o fator de realimentação. Se $A \gg \frac{R1+R2}{R1}$, o ganho em malha fechada pode

ser definido como

$$G_{cl} = -\frac{R2}{R1}. \quad (4.2)$$

A largura de banda do amplificador pode ser calculada a partir da expressão (SEDRA; SMITH, 2007)

$$f_c = \frac{fu}{G_N}, \quad (4.3)$$

sendo:

f_c : Frequência de corte do circuito.

fu : Largura de banda do amplificador operacional considerando ganho unitário (informado no datasheet do componente eletrônico).

G_N : Ganho projetado ($\frac{1}{\beta}$).

Para exemplo, podemos calcular a largura de banda do circuito do primeiro estágio de amplificação. A largura de banda do ganho unitário do LM741 pode variar de 0,437 à 1,5 MHz de acordo com seu datasheet. Dessa forma, considerando, $R1 = 1 \text{ k}\Omega$ e $R2 = 10 \text{ k}\Omega$ tem-se

$$f_{cmax} = \frac{1,5MHz}{11} = 136,36kHz, \quad (4.4)$$

$$f_{cmin} = \frac{0,437MHz}{11} = 39,73kHz. \quad (4.5)$$

Os resultados mostram o problema de se utilizar um amplificador de baixo custo para realizar amplificação de sinais de alta frequência, pois a largura de banda diminui a medida que o ganho do circuito aumenta. Outra informação interessante é que os sinais são amplificados pela proporção $\frac{R2}{R1}$, mas a largura de banda é reduzida pelo fator de $\frac{1}{\beta}$ para a frequência de corte (-3 dB).

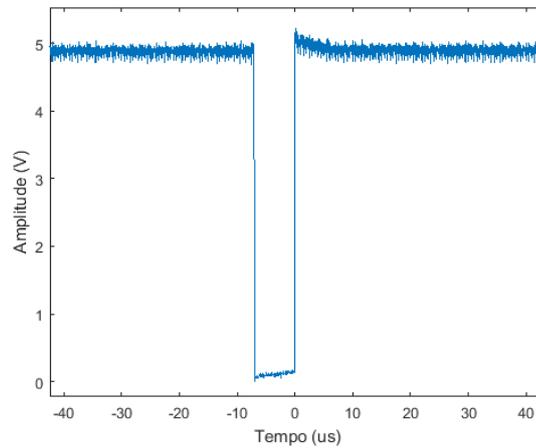
4.1.2 Sistema de excitação

O funcionamento do circuito foi testado por partes, e formas de onda foram captadas em pontos estratégicos do circuito. O pulso de saída do microcontrolador foi obtido na porta RB1 do microcontrolador mostrado na Figura 14, com uma frequência de repetição de 1 kHz.

A largura do pulso de tensão negativo na saída do circuito de excitação é ajustada a partir do tempo em que o sinal de saída do pino RB1 permanece em nível baixo. A forma de onda obtida durante esta etapa é mostrada na Figura 34, onde a largura do pulso foi ajustada para aproximadamente aproximadamente 8 us.

Um ponto crucial para o funcionamento do circuito é o pulso negativo de saída, que deve ter uma tensão mínima para excitar os transdutores conectados a ele. A forma

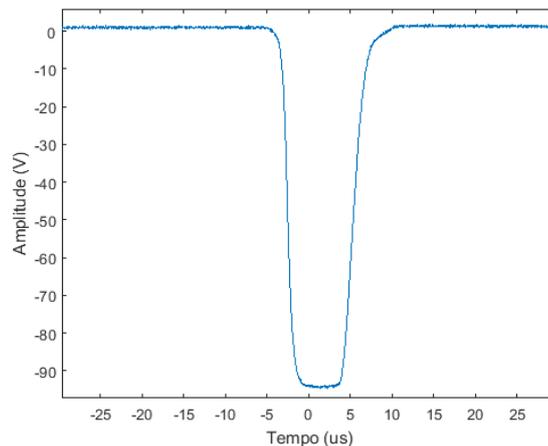
Figura 34 – Pulso de saída do microcontrolador.



Fonte: do autor.

de onda é obtida no dreno do MOSFET que também é a saída do circuito. O pulso negativo, de aproximadamente -100 V e tempo de duração de aproximadamente 10 us, é um pouco mais largo que o pulso do microcontrolador devido ao tempo de carregamento do MOSFET. Na Figura 35 é mostrado o pulso de saída sem carga, ou seja, o transdutor não está conectado ao circuito.

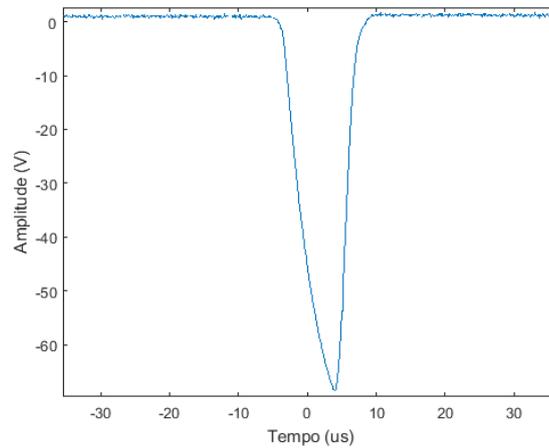
Figura 35 – Pulso de saída do circuito sem carga.



Fonte: do autor.

O pulso de saída do circuito com carga, ou seja, com um transdutor ligado a ele é mostrado na Figura 36. Comparando a Figura 35 com a Figura 36, pode-se observar que há uma queda de tensão devido ao descasamento de impedâncias entre a saída do circuito de excitação e a cerâmica do transdutor.

Figura 36 – Pulso de saída do circuito com carga.



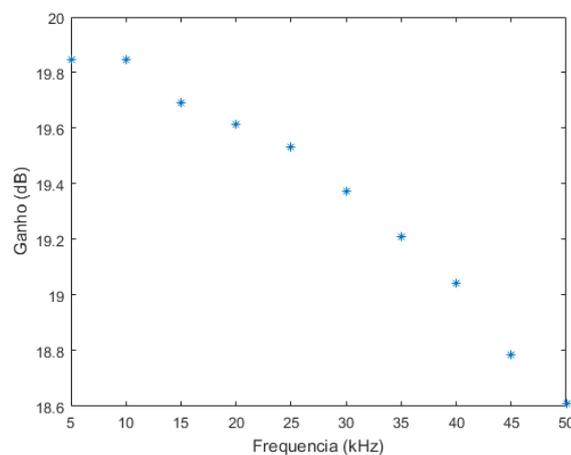
Fonte: do autor.

4.1.3 Ganhos do amplificador

Para analisar como o circuito de amplificação se comporta, aplicou-se um sinal senoidal de 1 Vpp na entrada do circuito e variou-se a frequência em passos de 5 kHz, iniciando em 5 kHz e terminando em 50 kHz. A faixa de frequências da análise levou em consideração a frequência central e largura de banda do transdutor utilizado nos ensaios. Como o ganho é variável no segundo e terceiro estágios, os testes dessas etapas foram realizados com ganho fixo. Os potenciômetros do segundo e terceiro estágios foram ajustados de forma a garantir ganho máximo sem que ocorresse distorção do sinal de saída.

Para a análise do comportamento do circuito de amplificação, foram obtidos 10 pontos a cada estágio de amplificação. O ganho de cada estágio (em dB) é mostrado nas Figuras 37, 38, 39 e 40.

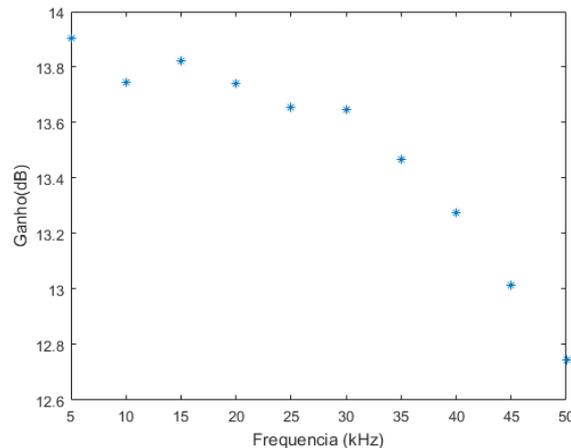
Figura 37 – Ganho do primeiro estágio em relação ao sinal do entrada.



Fonte: do autor.

A Figura 37 mostra o comportamento do primeiro estágio de amplificação em relação ao sinal de entrada, onde pode-se observar que o ganho do primeiro estágio de amplificação diminui à medida que se eleva a frequência. Esse decréscimo no ganho se deve à limitação do amplificador operacional LM741 utilizado no primeiro estágio, que não se comporta bem em altas frequências.

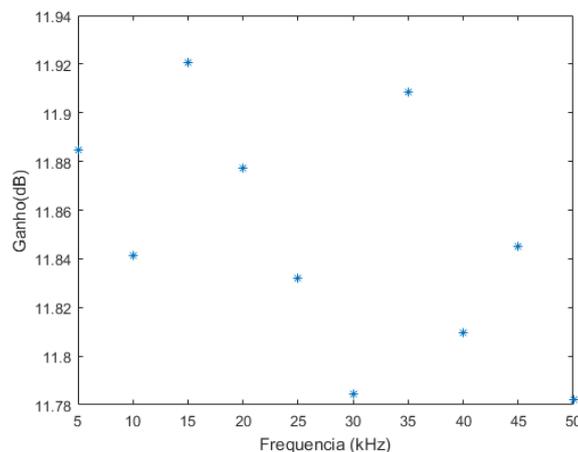
Figura 38 – Ganho do segundo estágio em relação ao primeiro.



Fonte: do autor.

A Figura 38 mostra o comportamento do segundo estágio em relação ao primeiro estágio de amplificação. Pode-se observar o mesmo comportamento do primeiro estágio, o que era de se esperar pois é utilizado o mesmo amplificador operacional.

Figura 39 – Ganho do terceiro estágio em relação ao segundo.



Fonte: do autor.

A Figura 39 mostra o comportamento do terceiro e último estágio de amplificação em relação ao segundo. É possível observar que a variação do ganho de acordo com o

aumento da frequência é bem pequeno, ou seja, o amplificador de instrumentação desse estágio se comportou de forma eficaz, mantendo um ganho quase constante para qualquer frequência utilizada.

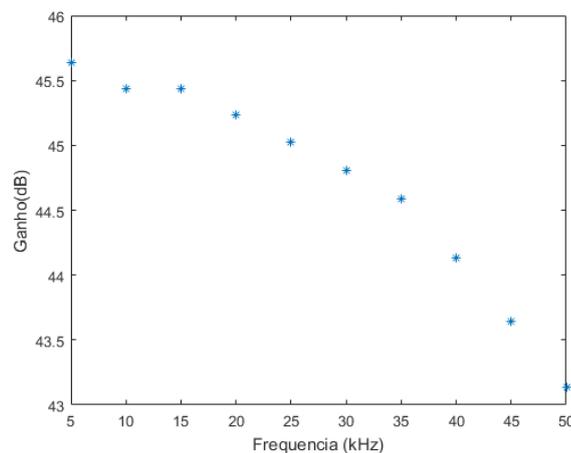
Analisando a Tabela 3 é possível observar a vantagem de se utilizar o amplificador de instrumentação, pois a variação de ganho é mínima.

Tabela 3 – Ganho em dB dos estágios de amplificação em cada frequência utilizada no teste.

Estágio/ Freq(kHz)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Primeiro	19,84	19,84	19,69	19,61	19,53	19,37	19,20	19,04	18,78	18,61
Segundo	13,90	13,74	13,82	13,73	13,65	13,64	13,46	13,27	13,01	12,74
Terceiro	11,88	11,84	11,92	11,87	11,83	11,78	11,90	11,80	11,84	11,78

Fonte: do autor.

Figura 40 – Ganho total do amplificador.



Fonte: do autor.

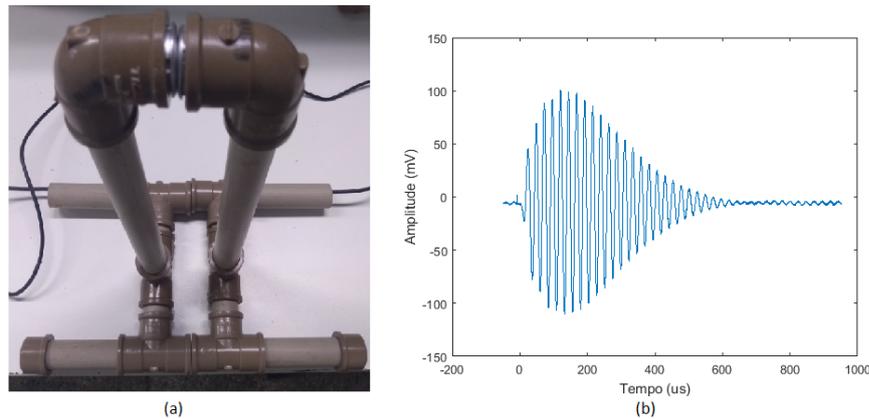
A Figura 40 mostra o ganho total do amplificador em relação ao sinal de entrada de 1 Vpp. Nota-se que o comportamento do sinal de saída acompanha o comportamento dos dois primeiros estágios de amplificação em cascata. Para comprovar basta multiplicar os ganhos de cada estágio para encontrar o valor do ganho total na frequência escolhida e assim concluir que o comportamento do ganho total é um reflexo do que acontece nos dois primeiros estágios.

4.2 Respostas dos transdutores

As respostas dos transdutores são obtidas em modo de transmissão-recepção, onde um transdutor emite uma onda ultrassônica e o outro recebe o sinal de eco. Um sinal

de referência deve ser utilizado como base para a realização de testes. Para isso foram colocados os transdutores emissor e receptor um de frente para o outro sem que haja um espaço entre eles e esse posicionamento proporciona uma melhor relação sinal-ruído. A Figura 41(a) mostra o posicionamento a uma distância de referência, e a Figura 41(b) mostra o sinal de referência do transdutor obtido pelo osciloscópio com uma resolução vertical de 50 mV e uma frequência de amostragem de 10 MHz.

Figura 41 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição de um sinal de referência.
b) Resposta do transdutor a uma distância de referência.



Fonte: do autor.

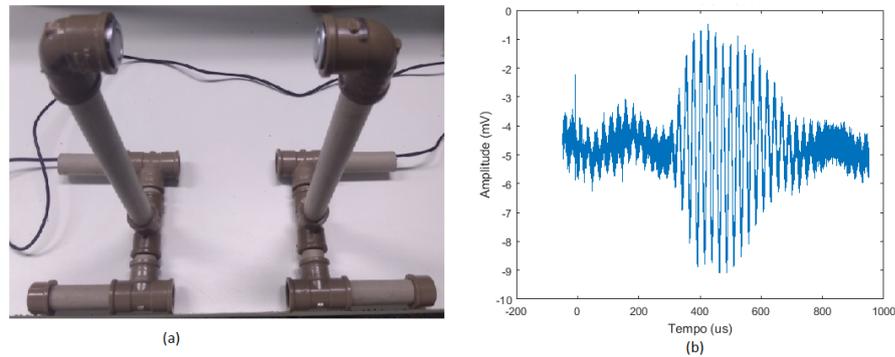
À medida que os transdutores vão se afastando o sinal de resposta vai se atenuando devido à camada de ar entre eles.

Para demonstrar a atenuação de acordo com a distância entre os transdutores, foram realizados mais testes e obtendo a resposta pelo osciloscópio, mas com uma resolução menor. Uma distância intermediária de 10 cm foi escolhida a qual proporciona uma resposta com uma menor amplitude. A Figura 42(a) mostra o posicionamento dos transdutores a uma distância de 10 cm, e a Figura 42(b) mostra o sinal de resposta do transdutor obtido pelo osciloscópio com uma resolução vertical de 10 mV e uma frequência de amostragem de 10 MHz. Analisando o sinal de resposta a uma distância de 10 cm, observa-se uma relação sinal-ruído menor do que apresentado na Figura 41(b).

Os transdutores foram afastados até uma distância de 20 cm, onde ainda é possível analisar o sinal sem que seja necessária uma etapa de amplificação. Foi observado que à medida que os transdutores se afastavam a resposta se atenuava e a relação sinal-ruído também diminuía devido à camada de ar entre os transdutores ser maior.

Para demonstrar a atenuação, foi feito o teste a uma distância de 20 cm entre os transdutores, obtendo a resposta pelo osciloscópio, mas com uma resolução menor. A Figura 43(a) mostra o posicionamento dos transdutores a uma distância de 20 cm, e a Figura 43(b) o sinal de resposta do transdutor obtido pelo osciloscópio com uma resolução vertical de 10 mV e uma frequência de amostragem de 10 MHz. Analisando o sinal de

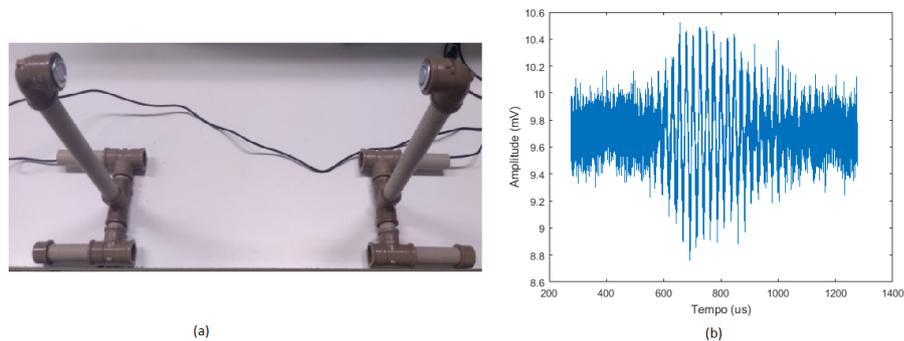
Figura 42 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição do sinal a uma distância intermediária de 10 cm. b) Resposta do transdutor a uma distância intermediária de 10 cm.



Fonte: do autor.

resposta observa-se uma relação sinal-ruído menor do que apresentado na Figura 41(b).

Figura 43 – a) Posicionamento dos transdutores para aquisição do sinal a uma distância de 20 cm. b) Resposta do transdutor a uma distância de 20 cm.



Fonte: do autor.

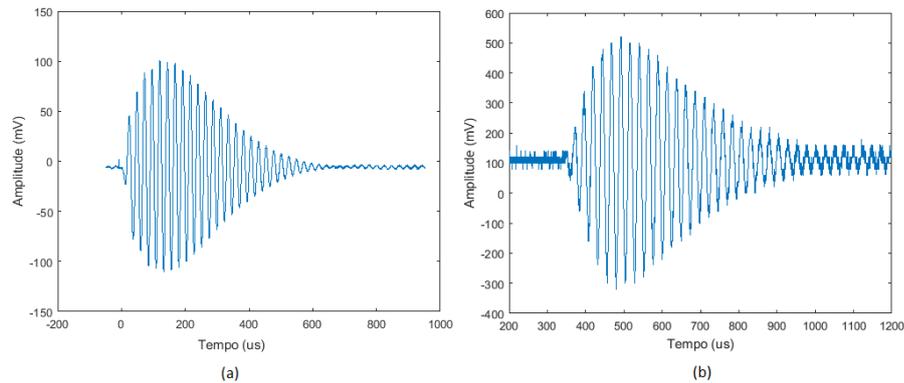
Analisando os testes realizados sem amplificação, é possível observar a necessidade da implementação do circuito de amplificação devido à atenuação que ocorre à medida que os transdutores são afastados. A Figura 44(a) mostra o sinal de referência sem amplificação e a Figura 44(b) mostra o sinal de referência amplificado com um ganho de 11,59 dB.

Para mostrar a importância da amplificação do sinal, pode-se analisar a relação sinal-ruído dos sinais (SNR, do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*), que é definida, pela potência do sinal dividido pela potência do ruído

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right), \quad (4.6)$$

sendo SNR a relação sinal-ruído (dB), A_{sinal} a amplitude do sinal (V) e $A_{ruído}$ a amplitude do ruído (V).

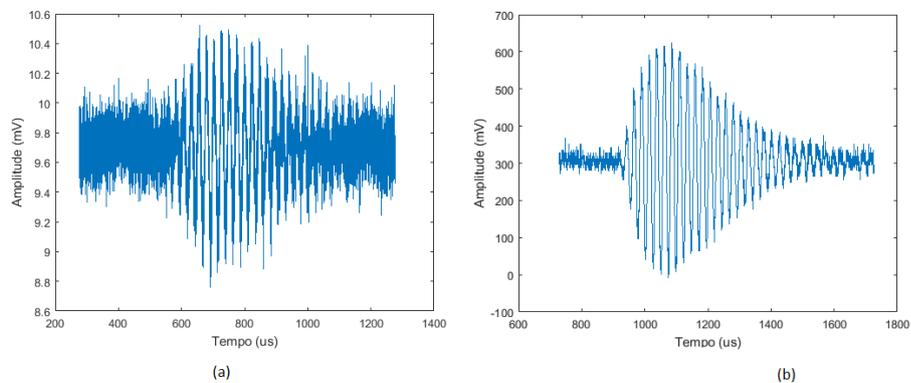
Figura 44 – a) Sinal de referência sem amplificação. b) Sinal de referência amplificado.



Fonte: do autor.

A Figura 45(a) mostra o sinal obtido a partir de uma medição com os transdutores alinhados a uma distância de 20 cm, sem amplificação, e a Figura 45(b) mostra o mesmo amplificado com um ganho de 32,36 dB. Pode-se observar que o circuito amplifica o sinal e filtra o ruído, fazendo a relação sinal-ruído aumentar.

Figura 45 – a) Sinal a 20 cm de distância sem amplificação. b) Sinal a 20 cm de distância amplificado.



Fonte: do autor.

Para os exemplos apresentados, a relação sinal-ruído do sinal sem amplificação é de 6,02 dB e a do sinal amplificado é 36,39 dB, pode-se verificar que quanto maior essa relação menor será ruído presente no sinal.

4.3 Cálculo da velocidade de propagação do som no ar

Os testes realizados para calcular a velocidade do som no ar foram realizados com o circuito completo, ou seja, com circuito receptor implementado. Os cálculos de velocidade foram feitos através do método da correlação cruzada e da detecção de pico.

Os testes foram realizados à uma temperatura de 25°C com uma variação de temperatura de mais ou menos 2°C.

Inicialmente, foi adquirido um sinal de referência, posicionando os dois transdutores face a face, como mostrado na Figura 41. Para isso, o ganho do circuito amplificador foi ajustado de modo a evitar saturação. A aquisição dos sinais foi feita através do osciloscópio digital, e a frequência de amostragem utilizada foi de 10 MHz.

Após a aquisição do sinal de referência, os transdutores foram afastados a uma distância de 10 cm, como pode ser visto na Figura 42. A fim de avaliar o desempenho do sistema para diferentes distâncias de propagação, foram adquiridos sinais para distâncias variando entre 10 cm e 80 cm.

Ao longo de todas as etapas, o procedimento de aquisição foi repetido, e os sinais medidos foram utilizados juntamente com o sinal de referência para a realização do cálculo de velocidade de propagação do som no ar.

Para obter o tempo de voo da onda utilizando o método de correlação cruzada, utilizou-se o tamanho dos sinais e encontrou-se o número da amostra onde se encontra o pico da envoltória da correlação cruzada. Para traçar a envoltória do sinal de correlação cruzada utilizou-se transformada de Hilbert. Para calcular o tempo de voo da onda, basta encontrar a defasagem da amostra do pico da envoltória e o tamanho do sinal, somar uma amostra e multiplicar pelo tempo de amostragem do sinal.

Após o cálculo do tempo de voo usando correlação cruzada ou detecção de pico, utilizando-se a primeira lei de Newton foi possível realizar o cálculo da velocidade de propagação do som no ar.

O resultado do cálculo da velocidade para cada uma das posições adotadas durante o ensaio pode ser visualizado na Figura 46.

Nota-se que o primeiro ponto apresenta uma discrepância em relação aos demais, indicando que pode ter ocorrido algum problema durante a realização dessa medição. Descartando esse ponto e calculando a média dos demais pontos, encontra-se um valor de velocidade de 346,08 m/s.

De acordo Cavalcante e Tavolaro (2003), a relação para a velocidade do som no ar em função da temperatura pode ser expressa pela equação

$$V = 330,4 + 0,59T, \quad (4.7)$$

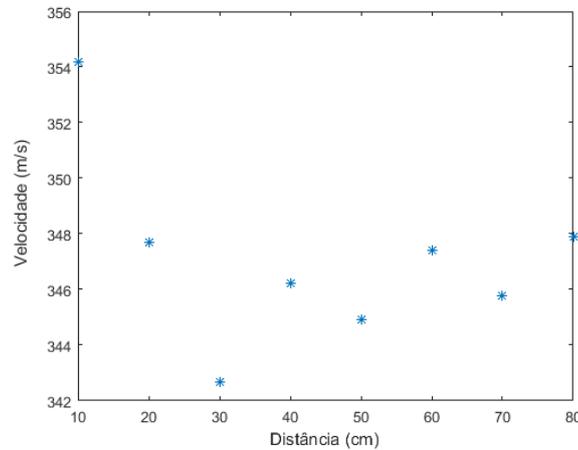
sendo:

V : Velocidade em metros por segundo (m/s).

T : Temperatura em graus Celsius ($^{\circ}C$).

Assumindo que $23^{\circ}C < T < 27^{\circ}C$, a velocidade de propagação do som no ar, de acordo com Cavalcante e Tavolaro (2003), varia dentro do intervalo $343,97 m/s < V < 346,33 m/s$, que foi constatado com o cálculo da velocidade média descartando o primeiro ponto.

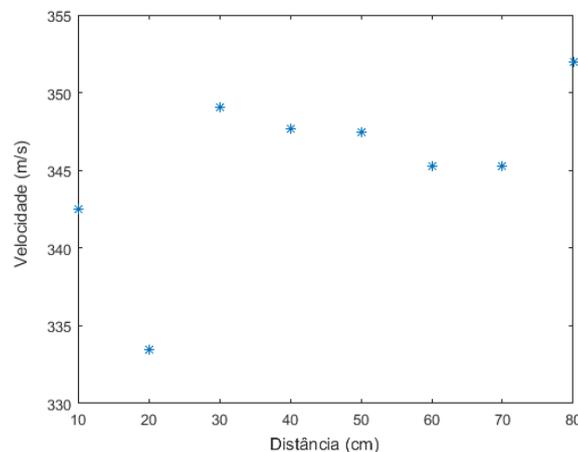
Figura 46 – Distância x Velocidade utilizando pico máximo da correlação cruzada.



Fonte: do autor.

Os mesmos sinais empregados para o cálculo da correlação cruzada foram utilizados para calcular a velocidade de propagação do som por meio do método do pico da envoltória, em que foi realizado a transformada de Hilbert para obter a envoltória dos sinais. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 47.

Figura 47 – Distância x Velocidade utilizando pico máximo dos sinais.



Fonte: do autor.

Observa-se que os dois primeiros pontos estão discrepantes em relação aos demais. Esse problema pode ter ocorrido devido a identificação incorreta do pico dos sinais, afetando dessa forma o cálculo do tempo de voo entre os dois sinais. Considerando apenas os últimos seis sinais, obtém-se um valor médio de velocidade de propagação de 347,79 m/s.

Os resultados obtidos com esse método de cálculo são piores do que os apresentados anteriormente, pois fica claro que o erro de medição aumentou após a mudança da técnica de processamento de sinais.

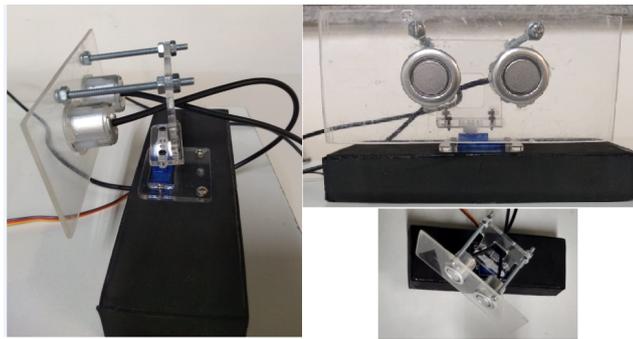
4.4 Geração de imagem B-scan

O teste de geração de imagem utilizando a técnica de ultrassom B-scan foi realizado com o circuito de recepção implementado.

O teste consiste em obter vários sinais de ecos ao longo de uma demarcação limitada pelo movimento dos transdutores. A técnica de ultrassom B-scan são vários sinais A-scan em cascata que geram a vista lateral ou em corte do objeto analisado.

A estrutura mostrada na Figura 48 foi fabricada utilizando o servo motor para arduino e o suporte para o servo, e construída uma base para que a estrutura não se mova quando o sistema estiver ligado. Na estrutura, foram fixados os transdutores de emissão e recepção para que o servo motor possa girar em um ângulo predeterminado em um programa desenvolvido para arduino. À medida em que o motor é parado, os sinais recebidos pelo transdutor receptor são adquiridos e armazenados para pós-processamento.

Figura 48 – Estrutura para transdutores.



Fonte: do autor.

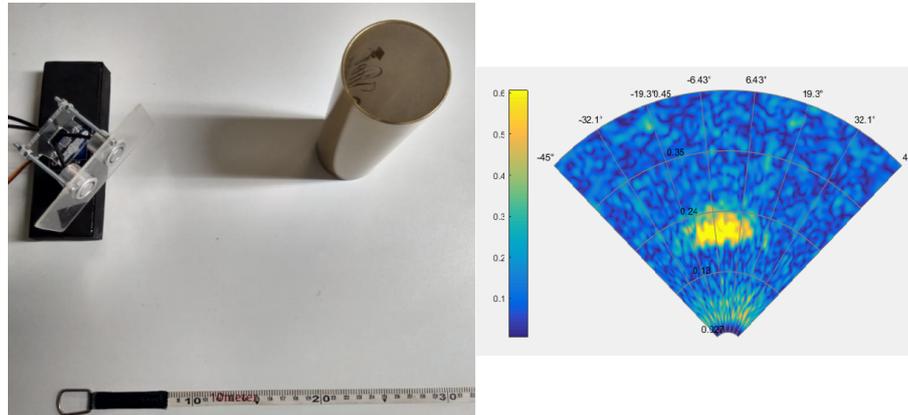
O vetor de tempo se mantém sempre o mesmo em todas as leituras de dados, já que a configuração do sistema receptor e do osciloscópio, não se alteram à medida em que o servo se movimenta. O vetor de amplitude vai se alterando a cada movimento que o servo faz, já que a cada leitura o sinal de eco é diferente. A quantidade de leituras a se fazer é definida no programa desenvolvido para arduino. Considerando o ângulo total que se quer utilizar e a quantidade de passos ou leituras que se quer fazer, quanto maior o número de leituras feitas, maior será a resolução da imagem gerada.

Para gerar a imagem B-scan, foi utilizado o ambiente de simulação MATLAB. Os vetores de tempo foram convertidos em distância, utilizando para isso os valores de referência para a velocidade de propagação do som no ar. Os ângulos ajustados através do servomotor foram utilizados para decompor os sinais adquiridos em suas componentes cartesianas, gerando um *grid*.

Foram realizados 5 testes para gerar a imagem em B-scan com 5 arranjos diferentes para mostrar o funcionamento e as limitações do sistema. Foram utilizados ângulos de -45° até 45° com passo de 2° , resultando assim em 46 leituras dos sinais de eco. A Figura

49 mostra a disposição de um copo em relação aos transdutores e também o resultado da imagem B-scan gerada. Pode-se observar que o copo está a uma distância de 20 cm dos transdutores o que é comprovado pela imagem gerada, onde a parte mapeada em amarelo demonstra a localização do copo no arranjo.

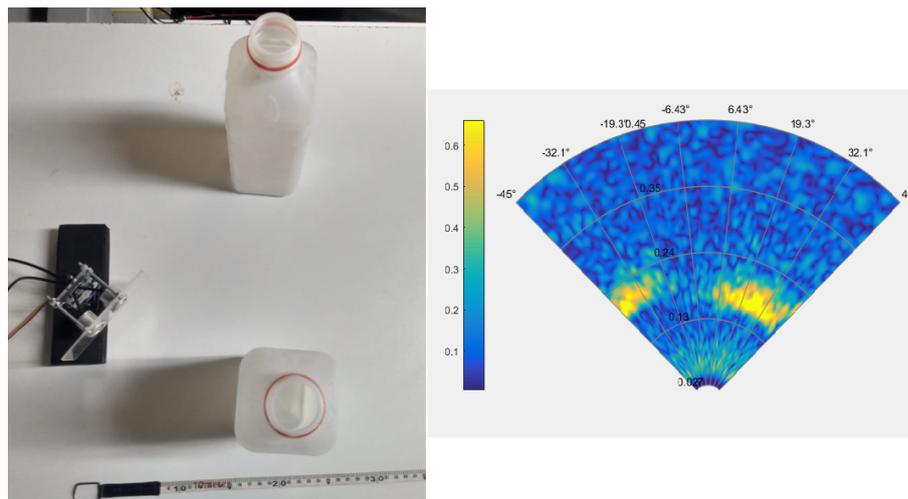
Figura 49 – Arranjo com 1 copo à 20 cm de distância dos transdutores.



Fonte: do autor.

A Figura 50 mostra a disposição de duas garrafas em relação aos transdutores e também o resultado da imagem B-scan gerada. Pode-se observar que as garrafas estão a uma distância de 15 cm dos transdutores e isso é comprovado pela imagem gerada, onde a parte mapeada em amarelo demonstra a localização das garrafas no arranjo.

Figura 50 – Arranjo com 2 garrafas à 15 cm de distância dos transdutores.

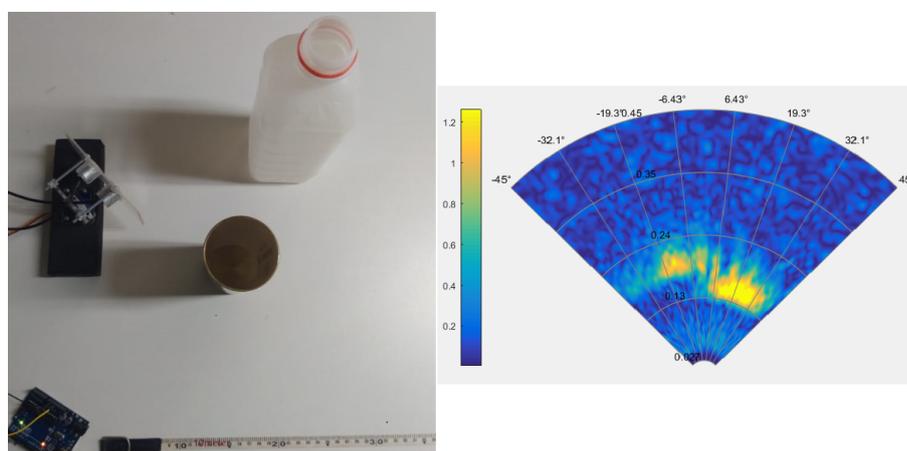


Fonte: do autor.

A Figura 51 mostra a disposição de um copo e uma garrafa em relação aos transdutores e também o resultado da imagem B-scan gerada. É possível observar que o destaque em amarelo no mapeamento da garrafa está mais fraco que o copo. Esse efeito é

causado pela atenuação da onda acústica que se propaga no meio. A atenuação acústica depende do meio pelo qual a onda se propaga, da distância e da frequência de propagação da onda. Como a frequência de propagação e o meio (ar) são os mesmos, o fator que influencia a redução da energia dos sinais utilizados neste ensaio é apenas a distância percorrida pelo sinal. Além disso, verifica-se que o sistema não apresenta boa resolução axial, pois apesar de separados, os objetos parecem estar juntos quando se observa a imagem acústica. Esse problema está relacionado à difração acústica, que ocasiona uma abertura do feixe acústico que é emitido pelo transdutor emissor. À medida que a distância de propagação aumenta, mais o feixe abre, tornando mais difícil identificar os objetos com uma melhor resolução.

Figura 51 – Arranjo com 1 copo e 1 garrafa a 15 cm e 20 cm de distância dos transdutores, respectivamente.



Fonte: do autor.

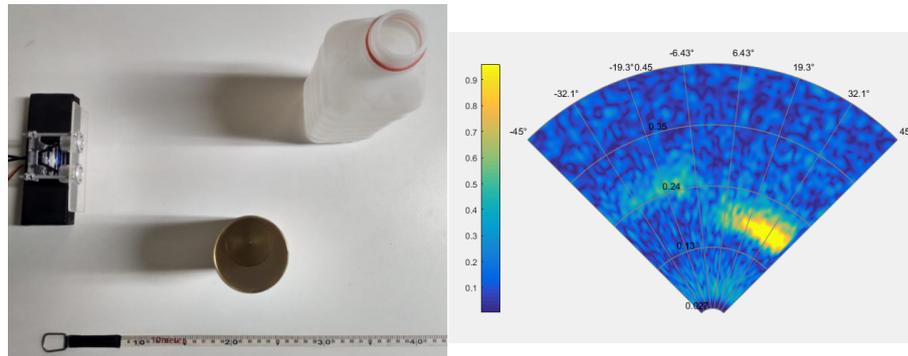
A Figura 52 também mostra a disposição de um copo e um garrafa em relação aos transdutores e também o resultado da imagem B-scan gerada. O copo está à 20 cm dos transdutores e a garrafa está à aproximadamente 27 cm dos transdutores e isso é comprovado pela imagem. É possível observar que o destaque em amarelo no mapeamento da garrafa está mais fraco que o copo, pois como a garrafa está mais distante o sinal de eco possui menos energia, como citado anteriormente. Também é possível notar os efeitos da difração nesta imagem.

4.5 Problemas observados ao longo do trabalho

Nos comentários serão apresentados alguns testes que foram feitos e que não deram certo ou que os resultados não foram satisfatórios.

Um dos testes feitos, foi a seleção de frequência de repetição dos pulsos de saída do circuito emissor podendo escolher entre 1 kHz, 3 kHz ou 5 kHz. O melhor resultado apresentado foi o de 1 kHz. A escolha de 3 kHz é aceitável até 70 cm de distância entre

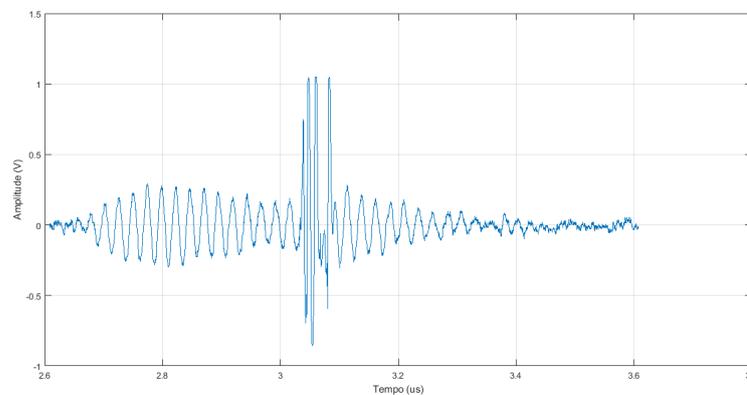
Figura 52 – Arranjo com 1 copo e 1 garrafa a 20 cm e 27 cm de distância dos transdutores, respectivamente.



Fonte: do autor.

os transdutores emissor e receptor. A Figura 53 representa o sinal de recepção a uma distância de 80 cm, onde é possível perceber que antes mesmo do transdutor receptor fazer a leitura completa do sinal de eco, o próximo sinal de eco sobrepõe ao primeiro eco. Isso é visível porque o transdutor possui um ruído assim que é excitado com o pulso negativo, esse ruído se deve ao transdutor possuir uma distância considerada zona morta.

Figura 53 – Sinal de eco a uma distância de 80 cm e uma frequência de repetição de 3 kHz.

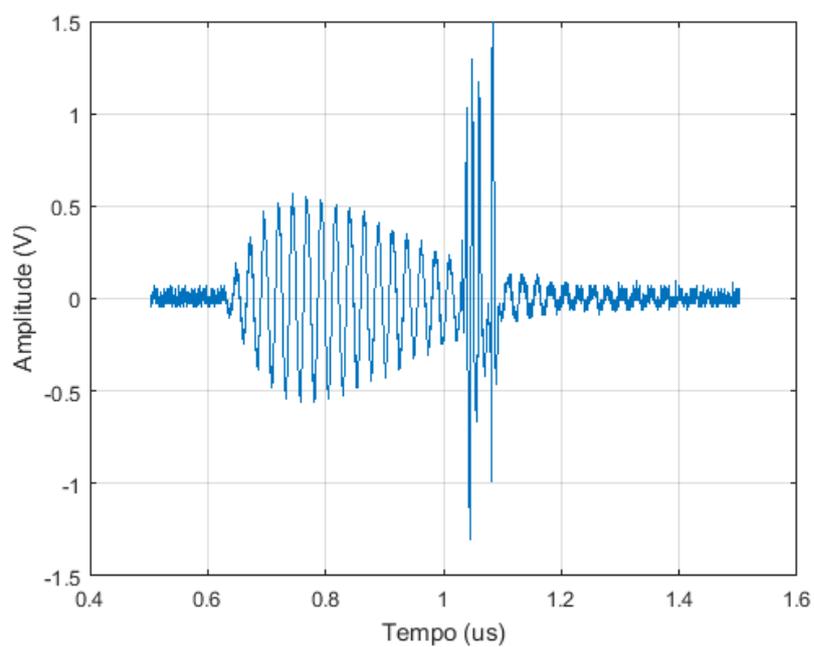


Fonte: do autor.

A escolha de 5 kHz é mais limitada pois como a frequência de recepção é ainda maior, o primeiro eco é sobreposto pelo segundo a uma distância de 10 cm. A Figura 54 mostra o sinal de recepção a uma distância de 10 cm, onde é possível observar a sobreposição do segundo eco em relação ao primeiro.

Outro teste realizado, foi no circuito receptor. Foram utilizados inicialmente apenas os dois primeiros estágios de amplificação, mas os resultados não foram satisfatórios, pois a distância máxima em que se consegue analisar o sinal de eco é de apenas 30 cm. Na Figura 55, é possível observar a atenuação do primeiro eco em relação ao sinal de referência

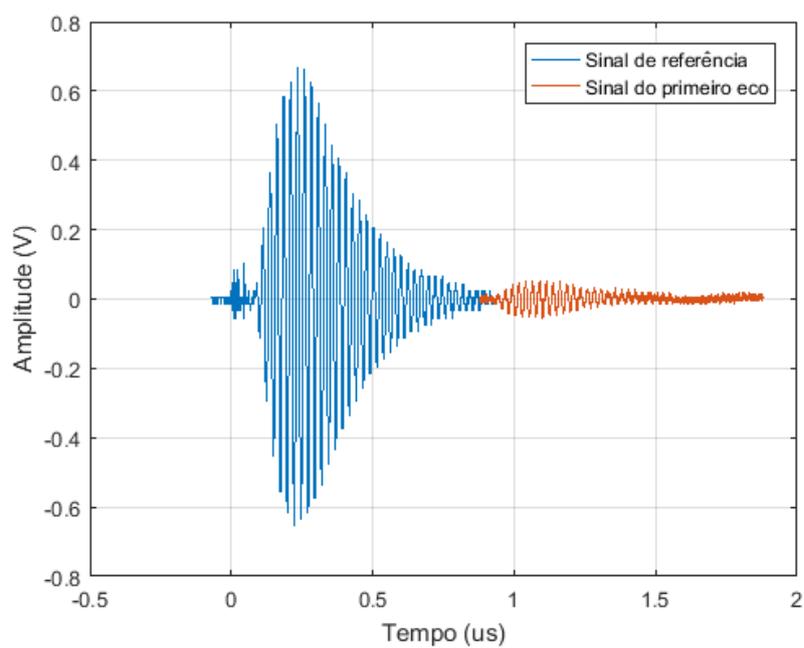
Figura 54 – Sinal de eco s uma distância de 10 cm e uma frequência de repetição de pulso de 5 kHz.



Fonte: do autor.

devido ao pequeno ganho que é conseguido com os dois primeiros estágios de amplificação.

Figura 55 – Sinal de eco utilizando os 2 primeiros estágios de amplificação.



Fonte: do autor.

4.6 Comentários

Nesse capítulo foram apresentando as simulações dos circuitos, os cálculos de velocidade de propagação da onda no meio, a geração de imagens do tipo B-Scan e os problemas que ocorreram durante alguns testes.

As simulações dos circuitos mostram o tempo de 206 ms para que o circuito multiplicador de tensão se estabilizasse em -98,98 V, mostra o pulso do microcontrolador utilizado para controlar a largura do pulso de saída e o pulso de saída de 8 us do circuito de excitação. As simulações também mostram as curvas do ganho de cada estágio durante o teste de caracterização do circuito receptor, onde é ilustrado o problema de utilizar um amplificador operacional de baixo custo.

As respostas dos transdutores são mostradas a uma frequência de amostragem de 10 MHz sem amplificação em uma distância de referência 0 cm, 10 cm e 20 cm, podendo observar que quanto maior a distância, maior o ruído no sinal recebido pelo transdutor receptor.

Os testes de velocidade de propagação da onda no meio, foram realizados a uma temperatura de 25° e foram realizadas 8 medidas. O teste utilizando o método do pico da envoltória da correlação cruzada se mostrou mais eficaz, apresentando uma velocidade de 346,08 m/s enquanto o método de detecção dos picos dos sinais apresentou uma velocidade de 347,79 m/s, um valor fora do intervalo utilizado como referência.

No teste de geração de imagem do tipo B-Scan, foram fixadas diversas disposições de objetos a diferentes distâncias para que o sistema capture os sinais de eco quando a onda ultrassônica encontrar uma interface e retornar ao transdutor receptor. O sinal recebido pelo transdutor ligado ao circuito de recepção foi amplificado e os sinais tratados no MATLAB para gerar um gráfico de pseudo-cor em coordenadas polares.

5 Considerações finais

Neste trabalho foram introduzidos conceitos de eletrônica analógica e digital para a criação de um circuito pulsador eletrônico, utilizado para gerar pulsos e excitar transdutores ultrassônicos. Além disso, foram apresentadas as etapas de projeto de um circuito amplificador de sinais com a finalidade de amplificar e filtrar os sinais recebidos pelos transdutores e utilizados para medir velocidade de propagação da onda no meio em estudo e para criação de imagens ultrassônicas.

Pode-se destacar como pontos positivos, o projeto ser executado com componentes facilmente encontrados no mercado local e o baixo custo. O sistema tem como característica a utilização do método de transmissão-recepção que utiliza dois transdutores. Esse é um dos pontos que pode ser melhorado, já que existem sistemas que utilizam apenas um transdutor como emissor e receptor. Uma das desvantagens de se trabalhar com transdutores operando em transmissão é a necessidade de alinhamento perfeito para realização de medições com precisão. Dependendo da aplicação a ser utilizada, pode-se criar uma estrutura para os transdutores e para simplificar o processo de alinhamento ou garantir que a posição relativa entre os transdutores permaneça constante. Essa proposta foi utilizada durante a implementação do sistema de geração de imagens, onde o sistema rotativo sempre garantia a mesma defasagem entre os dois transdutores.

Dentre as duas técnicas de cálculo de velocidade de propagação de onda no meio, a técnica que utiliza o pico máximo da envoltória da correlação cruzada, obteve um melhor resultado, com melhor aproximação do valor teórico já relatado. Para a técnica de geração de imagem, pode-se concluir que quanto mais próximo o objeto estiver do transdutor, maior é a energia do sinal de eco, conseguindo assim uma imagem mais nítida do objeto em análise. Para objetos mais distantes, a energia é mais fraca, ficando assim uma marcação mais clara na imagem, mostrando que se o objeto estiver muito longe do transdutor não é possível obter sua imagem.

Como a velocidade de propagação da onda no meio em estudo, é diretamente proporcional à temperatura do meio, nota-se uma pequena diferença entre os valores medidos e os valores teóricos. Um fator importante para essa diferença entre valores é a falta de controle de temperatura do meio, a qual variou durante os ensaios.

Alguns testes para otimizar o sistema foram realizados mas sem sucesso, como a implementação da seleção de frequência do pulso de saída do microcontrolador, já que com o aumento dessa frequência havia sobreposição dos sinais de eco, devido ao tempo de voo da onda ser maior que o tempo de repetição do pulso. Outro teste realizado sem sucesso foi a utilização apenas do primeiro estágio de amplificação, onde era possível fazer medições de velocidade do ar apenas à uma distância máxima de 30 cm. Para solucionar esses problemas, a frequência do pulso teve que ser fixada em 1 kHz e foi implementado

mais 2 estágios de amplificação do sinais de eco.

Contudo, para o teste do cálculo de velocidade de propagação da onda no meio utilizando o método de detecção do pico da envoltória da correlação cruzada se mostrou mais eficazes. Para o teste de imagem B-Scan, os testes se mostraram mais eficaz para objetos mais próximos do que objetos mais distantes devido ao efeito de difração quando são utilizados 2 objetos como anteparo.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Por se tratar de uma tema amplo para estudo, para futuras melhorias pode-se listar alguns tópicos que podem ser abordados.

- Implementação do sistema pulso eco para utilização de apenas um transdutor;
- Geração de imagem utilizando um transdutor *Phased-array* ao invés do servo motor.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de instrumentação*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. 332 p. 10
- ANDREUCCI, R. *Ensaio por ultrassom*. São Paulo: Abendi, 2014. 103 p. 1, 9, 11, 12, 13
- ARAGÃO, A. A. C. et al. Detecção de descontinuidades em chapa de aço sae 1020 utilizando técnica ultrassônica. In: *VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação*. Palmas, Brasil: 26, 2012. 15
- ASSEF, A. A. et al. Sistema para geração, aquisição e processamento de sinais de ultra-som. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 20, n. 2, p. 145–155, 2009. 4
- Athanasopoulos, G. I.; Carey, S. J.; Hatfield, J. V. A high voltage pulser asic for driving high frequency ultrasonic arrays. *IEEE Ultrasonics Symposium*, v. 2, p. 1398–1400 Vol.2, 2004. 3
- BILANIUK, N.; WONG, G. S. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 93, n. 3, p. 1609–1612, 1993. 1
- BISCEGLI, C. Conceitos da física do ultra-som. *Embrapa Instrumentação-Documentos (INFOTECA-E)*, São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2003. 18 p., 2004. 9
- BOYLESTAD, R. L.; LOUIS, N. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. São Paulo: Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. 20, 25
- BROWN, J.; LOCKWOOD, G. A Low-Cost, High Performance Pulse Generator for Ultrasound Imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, v. 49, n. 2, p. 848–851, 2002. 3, 27
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. *Medir a velocidade no som pode ser rápido e fácil*. São Paulo: Física na escola, 2003. 43
- CHANEY, A.; SUNDARARAJAN, R. Simple MOSFET-based high-voltage nanosecond pulse circuit. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 32, n. 5 I, p. 1919–1924, 2004. 3
- CHENEY, S. et al. Step excitation source for ultrasonic pulse transducers. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 111–113, 1973. 4
- CHEYNET, E. *Pcolor in polar coordinates*. Disponível em: <<https://github.com/ECheynet/polarPcolor/releases/tag/v3.8>>. Acesso em: 12 Mai. 2020. 30
- DOEBELIN, E. *Measurement Systems: Application and Design*. New York: McGraw-Hill, 1990. 772 p. 10
- GALLEGO-JUAREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 22, p. 804–816, 1989. 9

- GOUVEIA, R. *Ondas*. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/ondas/>>. Acesso em: 22 Out. 2018. 7
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física: volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica*. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 2. 6, 7, 8
- JUNIOR, J. S. D. S. *Sonar*. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/sonar.htm>>. Acesso em: 12 Mai. 2020. 14
- LUCIANO, N.-B. et al. Development of an ultrasonic thickness measurement equipment prototype. In: IEEE. *Electronics, Communications and Computer (CONIELECOMP), 2010 20th International Conference on*. Puebla, Mexico, 2010. p. 124–129. 4
- MALVINO, A. P.; BATES, D. J. *Eletrônica-Vol. 2: 8ª Edição*. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2016. 21
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*. São Paulo: Editora Blucher, 2018. v. 2. 6
- OLYMPUS. *Transdutores de ultrassom*. 2018. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/instrumentation/bscan/>>. Acesso em: 25 Out. 2018. 13, 15, 16
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Processamento em tempo discreto de sinais*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012. 16
- PEREIRA, A. H. A. Cerâmicas Piezoelétricas: Funcionamento e Propriedades. *Atcp*, p. 1–7, 2010. 10
- PROAKIS, J. G. *Digital signal processing: principles algorithms and applications*. [S.l.]: Pearson Education India, 2001. 17
- SALAZAR, J. et al. High-Power High-Resolution Pulser for Air-Coupled. v. 52, n. 6, p. 1792–1798, 2003. 3
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. 21, 22, 34, 35
- SILVA, J. J. da et al. Development of circuits for excitation and reception in ultrasonic transducers for generation of guided waves in hollow cylinders for fouling detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 57, n. 6, p. 1149–1153, jun 2008. 3
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros. Vol. 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2000. 6
- TONG, J.; POVEY, M. J. Pulse echo comparison method with fsuper to measure velocity dispersion in n-tetradecane in water emulsions. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 40, n. 1-8, p. 37–41, 2002. 2
- XU, X.; YEN, J. T.; SHUNG, K. K. A low-cost bipolar pulse generator for high-frequency ultrasound applications. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, IEEE, v. 54, n. 2, 2007. 4
- YOUNG, H.; FREEDMAN, R. *Sears & Zemansky física II: termodinâmica e ondas*. São Paulo: ADDISON WESLEY BRA, 2008. 9

ZHAO, D. et al. High-voltage pulser for ultrasound medical imaging applications. In: IEEE. *Integrated Circuits (ISIC), 2011 13th International Symposium on*. [S.l.], 2011. p. 408–411. 4



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Desenvolvimento de um circuito pulsador eletrônico para aplicações na área de ultrassom” 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, 28 de Setembro de 2020.

Rafael Júnio Costa Cehiera

Nome completo do(a) aluno(a)