

Claudio Ramos Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA
AMPLIFICAÇÃO E PRÉ-AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS, PARA
UTILIZAÇÃO EM UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR
ULTRASSOM ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmitz, Claudio Ramos

Desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicação por ultrassom através de paredes metálicas / Claudio Ramos Schmitz ; orientador, Marco Antonio Martins Cavaco - Florianópolis, SC, 2013.

84 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Transdutor EMAT. 3. Ultrassom. 4. Comunicação através de paredes metálicas. I. Cavaco, Marco Antonio Martins. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Claudio Ramos Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA
AMPLIFICAÇÃO E PRÉ-AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS, PARA
UTILIZAÇÃO EM UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR
ULTRASSOM ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC)

Florianópolis, 13 de novembro de 2013.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi., Ph. D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus amados pais Nilson e Maria de Fátima e aos meus queridos irmãos Rafael, Maicon, Everton e Liliane.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, aos meus pais Nilson e Maria de Fátima pelo amor, carinho e apoio em todas as etapas da minha vida.

Agradeço também aos professores pelos conhecimentos transmitidos e indispensáveis a realização deste trabalho, em especial ao meu orientador Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, pela oportunidade e orientação. À equipe de trabalho composta por Gabriel Maurício Probst e Mauro Eduardo Benedet pelas discussões, incentivo, aprendizado e amizade.

Não posso deixar de agradecer aos professores André Roberto de Sousa e Nelso Gauze Bonacorso pelo incentivo e recomendação ao mestrado do programa de pós-graduação em engenharia mecânica.

De um modo geral a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

À Maria Cristina Sampaio pela paciência, apoio e incentivo ao longo dessa caminhada.

Aos amigos conquistados Gabriel Probst, Viviane Círio, Mauro Benedet, Carolina Livi, Átila Paes, Angelina Uesato, Fabricio Oliveira, Milena Victorette, Jorge e Margareth Cristancho, pelos momentos de descontração e divertimento proporcionados.

Finalmente, agradeço ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC pela oportunidade, ao Laboratório de Metrologia e Automatização - LABMETRO pela excelente estrutura fornecida e as agências de fomento (CNPq e CAPES) que financiaram esse trabalho.

RESUMO

O recente crescimento do segmento de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil impulsionou o desenvolvimento de dispositivos para o monitoramento das condições de operação de dutos. Atualmente são utilizados PIGs (*Pipeline Inspection Gauges*) inseridos na tubulação, cuja função pode variar desde limpeza até a medição de grandezas para avaliar, de forma *off-line*, a integridade dos dutos. Para avaliar as condições de operações de dutos, a utilização de técnicas convencionais de transmissão de dados entre transdutores instalados na parte externa e PIGs utilizando cabos é inviável devido à necessidade de perfuração da parede do duto. Tais procedimentos violam a integridade e podem provocar desastres ecológicos. Em contrapartida, a tecnologia de comunicação sem fio vem apresentando grande utilidade em diversas áreas da metrologia, devido à praticidade de instalação ou à necessidade de desacoplamento do sensor com a unidade de tratamento de sinais. Considerando que a maioria dos materiais de construção mecânica empregados na fabricação de tubos são metálicos, técnicas convencionais de transmissão de dados sem fio que utilizam radiofrequência apresentam limitações, devido à propriedade de blindagem eletromagnética dos materiais metálicos. Visando contornar os problemas provenientes da utilização de radiofrequência, no presente trabalho foram empregados transdutores piezoelétricos e transdutores acústicos eletromagnéticos, EMATs (do inglês, *Electro Magnetic Acoustic Transducer*), para geração de ultrassom em materiais metálicos. O objetivo foi desenvolver dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais para uso em um sistema de comunicação dinâmica de dados por ultrassom através de paredes metálicas. Para a transmissão de sinais foi projetado e construído um módulo de amplificação capaz de fornecer tensão e corrente ao transdutor de emissão. A recepção contou com o desenvolvimento de quatro placas de pré-amplificação. A avaliação e a validação dos dispositivos desenvolvidos foram realizadas empregando diferentes combinações de transdutores EMATs e piezoelétricos para transmissão/recepção. Testes foram realizados, visando avaliar a eficiência das configurações, taxa de transferência (comunicação estática) e o número de pacotes recebidos (comunicação dinâmica).

Palavras-chaves: transdutor EMAT, ultrassom, comunicação através de paredes metálicas.

ABSTRACT

The recent growing of production and exploration of oil and gas in Brazil has boosted the development of devices to monitor the work condition of pipes. Nowadays PIGs (Pipeline Inspection Gauges) that are inserted into the pipes are used for maintenance, whose functions can vary since cleanliness, to the measurement of quantities which can evaluate the integrity of pipes in an offline manner. To monitor the work condition of pipes, the use of conventional techniques for data transmission between transducers installed on the outside of the pipe and PIGs with the usage of cables is infeasible due to the need for drilling the wall of the pipe. Such proceeds violate the integrity of the pipes and may cause ecological disasters. On the other hand, the technology for wireless communication is presenting great feasibility in many metrological areas due to its installation handiness or the unnecessary sensor coupling with the signal treatment facility. Considering that the most used material for pipe construction is the steel, conventional techniques for wireless data transmission have some limitation due to the electromagnetic shielding of metallic materials. In order to avoid problems caused by radio frequency, this paper presents the usage of piezoelectrics transducers and electromagnetic acoustic transducers for ultrasound generation in metallic materials. The purpose is to develop devices for signal amplification and pre-amplification of a dynamic data communication system by ultrasound through metallic walls. It was designed and developed a module of amplification for signal transmission capable to provide enough voltage and current for the transmitter transducer. For reception, four pre-amplification PCB (Printed Circuit Board) were developed. The evaluation and validation of the developed devices were performed applying different combinations between EMAT and piezoelectrics transducers for transmission and reception. Tests were performed to evaluate the efficiency of the configurations, transfer rate (static communication) and the number of the received packages (dynamic communication).

Keywords: EMAT transducer, ultrasound, communication through metallic walls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro sonoro.	25
Figura 2: Transdutores piezoelétricos comerciais.	26
Figura 3: Princípio básico de funcionamento de transdutores EMATs.	28
Figura 4: Configuração do experimento para demonstração do eco.	29
Figura 5: Excitação por pulso simples e resposta primária com ecos. ...	30
Figura 6: Modulação por chaveamento de amplitude (ASK).	31
Figura 7: Modulação por chaveamento de frequência (FSK).	32
Figura 8: Modulação por chaveamento de fase (PSK).	33
Figura 9: Circuito equivalente do amp. op. [31].	36
Figura 10: Degradação da saída devido às limitações da taxa de subida.	38
Figura 11: Configuração não realimentada.	40
Figura 12: Configuração realimentada positivamente.	40
Figura 13: Configuração com realimentação negativa.	41
Figura 14: Configuração típica de um amplificador de instrumentação.	42
Figura 15: Circuito equivalente do amplificador INA128.	43
Figura 16: Filtro passa banda implementado nas topologias, a) Sallen Key e b) Multiple Feedback.	45
Figura 17: Tipos de Filtros: a) filtro passa baixa, b) filtro passa alta, c) filtro passa banda e d) filtro rejeita banda.	46
Figura 18: Resposta em frequência das aproximações.	47
Figura 19: Disposição lógica dos elementos que compõem a bancada experimental.	49
Figura 20: Diagrama elétrico do amplificador.	51
Figura 21: Módulo de amplificação desenvolvido.	52
Figura 22: EMAT de transmissão.	53
Figura 23: Pré-teste de transmissão de sinal.	54
Figura 24: Transmissão de sinal após a adição de capacitâncias.	54
Figura 25: Componentes do EMAT Rx.	55
Figura 26: Sinais de transmissão e recepção dos testes iniciais.	56
Figura 27: Nova implementação com aumento no ganho.	57
Figura 28: Sinal de ultrassom captado.	58
Figura 29: Placas do pré-amplificador confeccionadas.	59
Figura 30: Diagrama elétrico do pré-amplificador, (a) estágio de ganho independente e (b) estágio de ganho integrado ao estágio de filtragem.	60
Figura 31: Diagrama de blocos de uma fonte linear.	61
Figura 32: Diagrama elétrico da fonte simétrica.	62
Figura 33: Fonte simétrica.	62

Figura 34: Seletividade das placas de pré-amplificação.	67
Figura 35: Comportamento da tensão de saída em função do desalinhamento.	68
Figura 36: Bancada experimental	70
Figura 37: Sistema de deslocamento montado na parte interna do tubo.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens entre filtros ativos e passivos.	44
Tabela 2: Níveis máximos de tensão obtidos na avaliação das placas de pré-amplificação.....	65
Tabela 3: Teste de hipóteses para os níveis de tensão.....	66
Tabela 4: Níveis máximos de ruído e a relação sinal ruído (SNR) das placas de pré-amplificação.	66
Tabela 5: Teste de hipóteses para os níveis de ruído.....	66
Tabela 6: Valores de impedância, tensão e potência.	69
Tabela 7: Protocolo de comunicação.....	69
Tabela 8: Resultados obtidos na comunicação estática.....	71
Tabela 9: Resultados obtidos na comunicação dinâmica.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i> Modulação por Chaveamento de Amplitude
BER	<i>Bit Error Rate</i> Taxa de Erro de Bit
BFSK	<i>Binary Frequency Shift Keying</i> Chaveamento Binário de Frequência
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> Chaveamento Binário de Amplitude
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> Processador Digital de Sinal
EMAT	<i>Eletro Magnetic Acoustic Transducer</i> Transdutor Acústico Eletromagnético
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> Modulação por Chaveamento de Frequência
IIS	Interferência Interssimbólica
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
LED	<i>Light Emitting Diode</i> Diodo Emissor de Luz
NDT	<i>Nondestructive Testing</i> Ensaio Não Destrutivo
OOK	<i>On-Off Keying</i> Chaveamento Liga-Desliga
PCI	Placa de Circuito Impresso
PIG	<i>Pipeline Inspection Gauges</i> Medidores para Inspeção de Dutos

PSK	<i>Phase Shift Keying</i> Modulação por Chaveamento de Fase
PXI	<i>Peripheral Component Interconnect Extensions for Instrumentation</i> Extensões de Interconexões de Componentes Periféricos para Instrumentação
RMS	<i>Root Mean Square</i> Valor eficaz
SMD	<i>Superficial Monting Device</i> Componentes de Montagem Superficial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos	23
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	23
2	TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS.....	25
2.1	ULTRASSOM	25
2.1.1	Transdutores Piezoelétricos	26
2.1.2	Transdutor Acústico Eletromagnético - EMAT	27
2.1.3	Interferência Intersimbólica (IIS)	28
2.2	TIPOS DE MODULAÇÃO DO SINAL.....	30
2.2.1	Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK)	31
2.2.2	Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK).....	32
2.2.3	Modulação por Chaveamento de Fase (PSK)	33
2.3	SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO	34
3	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS E FILTROS.....	35
3.1	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS	35
3.1.1	Características dos amplificadores operacionais.....	36
3.1.1.1	Ganho de Tensão.....	37
3.1.1.2	Tensão de <i>Offset</i>	37
3.1.1.3	<i>Slew rate</i>	37
3.1.1.4	Razão de Rejeição de modo comum (CMRR)	38
3.1.2	Tipos de polarização do amplificador	39
3.1.2.1	Configuração não realimentada.....	39
3.1.2.2	Realimentação positiva	40
3.1.2.3	Realimentação negativa	40
3.2	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	41
3.3	FILTROS SELETORES DE SINAIS	43
3.4	SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO.....	47
4	DESENVOLVIMENTO.....	49
4.1	GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE SINAIS.....	49
4.1.1	Gerador de sinal modulado.....	50
4.1.2	Módulo de Amplificação.....	50
4.1.2.1	Projeto do Módulo de Amplificação	51
4.1.3	Fonte de alimentação MPL-3303	52
4.1.4	EMAT Tx.....	52
4.1.5	Transdutor piezoelétrico	53
4.1.6	Avaliação da etapa de transmissão	53
4.2	RECEPÇÃO E TRATAMENTO DE SINAL.....	55

4.2.1	EMAT Rx	55
4.2.2	Pré-amplificador	56
4.2.2.1	Projeto do Pré-Amplificador	56
4.2.2.2	Simulações em <i>softwares</i>	58
4.2.3	Fonte de alimentação simétrica	61
4.2.4	Osciloscópio	62
4.2.5	Demodulador de sinal	63
4.3	SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO	63
5	AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS	65
5.1	AVALIAÇÃO DAS PLACAS DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO	65
5.2	AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES	67
5.3	AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO ESTÁTICA	69
5.4	AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO DINÂMICA	71
5.5	SÍNTESE DO QUINTO CAPÍTULO	73
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6.1	CONCLUSÕES	75
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A redução dos custos de dispositivos eletrônicos e a possibilidade de miniaturização de sensores têm levado a uma demanda crescente no desenvolvimento de sistemas para monitoramento de processos [1]. Atualmente, o desenvolvimento de sensores para aplicações onde o acesso à região de interesse é limitado tem sido frequente objeto de estudo no campo da metrologia científica. Uma alternativa promissora nesse sentido pode ser uso de técnicas de comunicação sem fio.

A tecnologia de comunicação sem fio vem apresentando grande utilidade em diversas áreas da metrologia, devido à praticidade de instalação ou a necessidade de desacoplamento do transdutor com a unidade de tratamento de sinais.

O recente crescimento do segmento de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil impulsionou o desenvolvimento em relação ao monitoramento das condições de operação de dutos. A utilização de transdutores instalados na parede externa do duto, comunicando com PIGs¹ instrumentados no interior é um exemplo da necessidade de desacoplamento. PIGs são dispositivos inseridos na tubulação e impulsionados pelo próprio fluxo do produto, cuja função pode variar desde limpeza até a medição de grandezas para avaliar a integridade dos dutos de forma *offline*. A instalação de sensores em dutos utilizando técnicas convencionais de transmissão de dados via cabos é inviável, devido à necessidade de perfuração da parede desses elementos. Tal procedimento viola a integridade do duto, o que pode levar a perda de carga, comprometer a vedação e até provocar desastres ecológicos como a contaminação de solos [2] e oceanos [3].

Encontram-se na literatura diversas outras aplicações onde a comunicação sem fio é aplicável, e.g., a comunicação entre compartimentos de navios [4], a obtenção de informação de contêineres [5], a medição de níveis em tanques criogênicos [1][6] e o monitoramento de nível e fluxo para troca da água de lastro de embarcações em cumprimento às normas [7].

Considerando que a maioria das aplicações apresentam barreiras metálicas, o emprego de técnicas convencionais de transmissão de dados

¹ Do inglês, *Pipeline Inspection Gauges*.

No decorrer deste documento aparecerão alguns termos em outro idioma, pois são amplamente utilizados nesta área de estudo. Estes termos serão traduzidos na primeira vez em que aparecem no texto. No entanto, sempre que o autor julgar adequado, os termos poderão aparecer no idioma original.

sem fio utilizando radiofrequência apresenta limitações. A barreira metálica possui propriedade de blindagem eletromagnética que causa um decaimento acentuado dos sinais de radiofrequência incidentes devido ao efeito pelicular.

O efeito pelicular é o fenômeno responsável pelo decaimento exponencial da amplitude de uma onda eletromagnética, que ao atravessar o meio metálico induz correntes elétricas que produzem perdas ôhmicas e aquecimento do material [8][9][10][11].

Visando contornar os problemas provenientes da utilização de radiofrequência, uma possível alternativa é a comunicação através de paredes metálicas utilizando ultrassom. Existem diversas formas para geração de ultrassom em materiais metálicos [12], duas delas serão abordadas: transdutores piezoelétricos e transdutores acústicos eletromagnéticos EMATs (do inglês, *Electro Magnetics Acoustics Transducers*). Embora existam aplicações e diversos estudos sobre os transdutores EMAT, tais dispositivos apropriados à comunicação não estão comercialmente disponíveis [13][14].

Diante deste contexto, o foco deste trabalho está no desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais modulados em amplitude, fase ou frequência, para uso em um sistema de comunicação de dados por ultrassom através de paredes metálicas. A avaliação e a validação dos dispositivos serão realizadas empregando diferentes combinações para transmissão/recepção com transdutores EMATs e piezoelétricos.

1.1 OBJETIVOS

Visando facilitar o entendimento deste trabalho, os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicação por ultrassom através de paredes metálicas. Além disso, tais dispositivos serão avaliados em diferentes configurações (“transmissão”-“recepção”):

- EMAT - EMAT;
- Piezo - Piezo;
- Piezo - EMAT;
- EMAT - Piezo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral e realizar os testes com as diferentes configurações, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Projetar e construir um módulo de amplificação de sinal para alimentar transdutores ultrassônicos;
- Projetar e construir um pré-amplificador de sinal para captar sinais provenientes da etapa de transmissão;
- Testar e avaliar os sistemas desenvolvidos com diferentes configurações de transmissão e recepção.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O monitoramento das condições de operação de dutos para o transporte de hidrocarbonetos é de fundamental importância para a prevenção de desastres ecológicos. Atualmente esse monitoramento é feito de forma *offline*, pois os dados são descarregados e processados somente após a remoção do PIG da tubulação. Técnicas convencionais de comunicação sem fio com o emprego da radiofrequência não são viáveis devido ao efeito pelicular. Visando contornar os problemas da utilização da radiofrequência, uma possível alternativa para a comunicação de dados através de paredes metálicas é a utilização de ultrassom. Neste contexto, o capítulo 2 apresenta revisão sobre o ultrassom e duas formas de sua geração em materiais metálicos empregando transdutores piezoelétricos e EMATs.

O capítulo 3 descreve os principais elementos empregados no processamento de sinal utilizados nos dispositivos de amplificação e pré-amplificação.

No capítulo 4 são descritas as etapas de projeto e construção dos dispositivos de amplificação e pré-amplificação, bem como a descrição dos equipamentos indispensáveis à realização dos testes.

A avaliação e a validação de tais dispositivos para comunicação com emprego de diferentes combinações de transmissão/recepção utilizando transdutores EMAT e piezoelétricos são contempladas no capítulo 5.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta conclusões e discussões sobre os resultados obtidos, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Neste capítulo são apresentadas algumas formas para geração de ondas acústicas em materiais metálicos. Além disso, são apresentadas as principais formas de modulação de sinal e a influência de ecos acústicos na transmissão de dados.

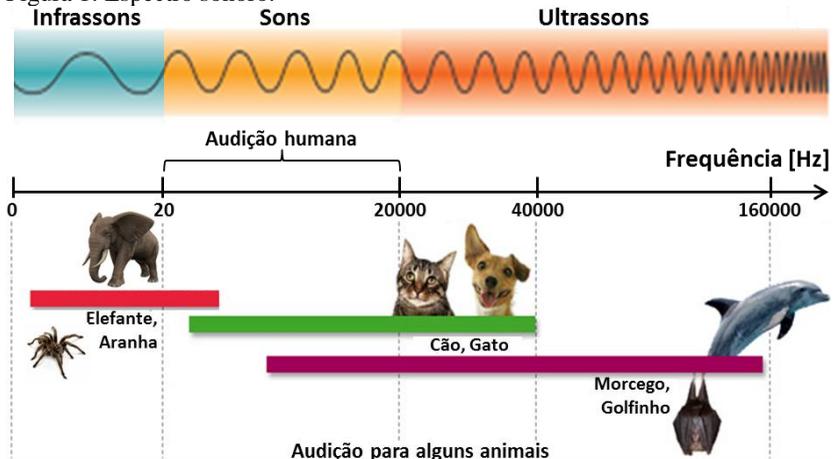
2.1 ULTRASSOM

Embora a maioria dos sistemas de transmissão de dados sem fio utilize radiofrequência, esta tecnologia apresenta limitações quando em presença de interfaces metálicas. As limitações estão relacionadas ao efeito pelicular, que provoca atenuação de ondas eletromagnéticas ao atravessar materiais com características elétricas condutoras [8][9][10].

Além das ondas eletromagnéticas, outra possível forma de comunicação sem fio é por meio de ondas sonoras. A comunicação humana (fala) e a transmissão de sinal de localização realizada pela caixa preta de aeronaves são alguns exemplos.

O som é definido como a propagação de uma frente de compressão mecânica de forma circuncêntrica em meios que contenham massa e elasticidade. Quando a frequência dessas ondas mecânicas atinge um valor superior a vinte mil ciclos por segundo (20 kHz), i.e., limite superior da sensibilidade auditiva humana, esse fenômeno recebe o nome de ultrassom (Figura 1) [15].

Figura 1: Espectro sonoro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ultrassom pode ser gerado por diferentes formas [12]. Aqui são apresentados dois métodos de geração de ultrassom em materiais metálicos: transdutores piezoelétricos e EMATs.

2.1.1 Transdutores Piezoelétricos

Na maioria dos dispositivos e transdutores ultrassônicos, o elemento ativo é piezoelétrico (Figura 2), que pode pertencer aos seguintes grupos: cristais de quartzo, cristais hidrossolúveis, monocristais, semicondutores piezoelétricos, cerâmicas piezoelétricas, polímeros e compósitos piezoelétricos [16].

Figura 2: Transdutores piezoelétricos comerciais.



Fonte: Adaptado de [17].

Materiais piezoelétricos, quando submetidos à deformação mecânica, geram uma diferença de potencial elétrico. Inversamente, quando se aplica uma tensão elétrica às superfícies desses materiais, eles sofrem deformação mecânica, podendo contrair ou expandir, dependendo da polaridade da tensão aplicada [16].

A geração de ondas ultrassônicas em um meio sólido pode ser obtida através da alimentação do transdutor por uma tensão alternada com frequência superior a 20 kHz. Em contraste com os métodos que utilizam radiofrequência, os transdutores piezoelétricos não são sensíveis à profundidade pelicular do material.

Transdutores piezoelétricos são os mais comumente utilizados por serem melhor compreendidos e apresentarem alta eficiência quando comparados aos EMATs. Porém, a necessidade de acoplamento acústico, superfícies de contato irregulares, corrosão do material, revestimentos superficiais, dentre outros fatores, podem influenciar o desempenho dos transdutores piezoelétricos ou até mesmo impedir seu funcionamento [4].

Uma alternativa para contornar esses problemas é a utilização de EMATs, pois utiliza princípios eletromagnéticos para geração e recepção de ondas acústicas sem contato com o material metálico.

2.1.2 Transdutor Acústico Eletromagnético - EMAT

O transdutor EMAT é composto basicamente por um ímã permanente ou um eletroímã e uma bobina elétrica. O ímã é responsável por gerar um campo magnético estático. A bobina, por sua vez, é alimentada com corrente alternada geralmente em frequência ultrassônica (acima de 20 kHz) e gera um campo magnético variante no tempo [18].

A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento do transdutor EMAT, onde a corrente alternada que flui na bobina elétrica gera um campo magnético variável ao redor do condutor induzindo correntes elétricas na amostra metálica, denominadas correntes de Foucault. As correntes de Foucault se opõem às variações do campo magnético aplicado. Portanto, as correntes elétricas na amostra metálica têm sentidos opostos em relação às correntes na bobina do EMAT [19].

As correntes de Foucault que fluem na amostra estão submetidas a um campo magnético imposto pelo ímã do EMAT, dando assim origem a uma componente de força (conhecida como força de Lorentz), (Equação 1) [19]:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v}_p \times \vec{B} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

\vec{F} , é a força de Lorentz;

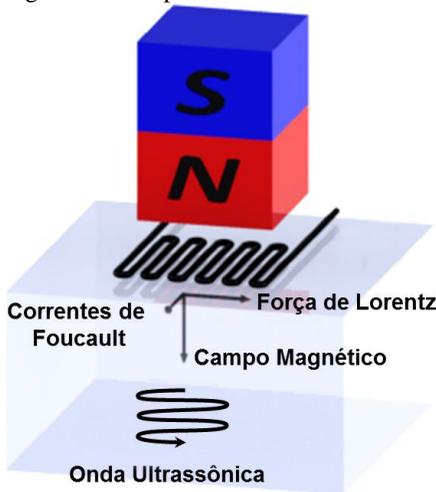
q , é a carga da partícula;

\vec{v}_p , é a velocidade da partícula;

\vec{B} , é o campo magnético imposto pelo ímã.

Como o termo $q \cdot \vec{v}_p$ é gerado pela corrente alternada na bobina do EMAT, \vec{F} também é alternada e atua diretamente na amostra, gerando uma onda acústica que se propaga no material.

Figura 3: Princípio básico de funcionamento de transdutores EMATs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os transdutores EMAT não necessitam de contato com a superfície, porém sua eficiência de transdução é inversamente proporcional à separação com a superfície, conhecida neste contexto como *liftoff* [20][21].

2.1.3 Interferência Intersimbólica (IIS)

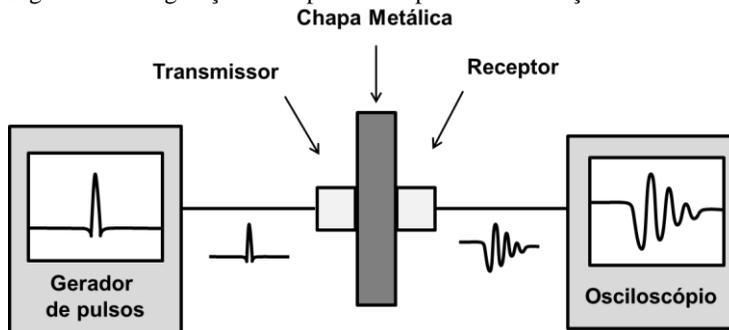
Em canais de comunicação, a ocorrência de interferências entre o sinal acústico transmitido e os ecos é denominada interferência intersimbólica. Embora ecos acústicos tenham papel fundamental em diversas aplicações de ultrassom, (e.g., medições da espessura de materiais e detecção de trincas), na área de comunicação de dados esse fenômeno pode limitar a aplicação da técnica.

Pesquisas prévias sobre o uso de sinais de ultrassom para transmissão de dados através de barreiras metálicas, mostram que ecos de energia acústica dentro do canal de transmissão podem levar a interferências intersimbólicas. Essas interferências são observadas, sobretudo, na transferência de dados a altas taxas de transmissão [22].

A Figura 4 ilustra o arranjo experimental usado por Primerano, Kam e Dandekar [23] no estudo do efeito de ecos no canal de transmissão de dados na utilização de ultrassom. O experimento é composto por dois transdutores piezoelétricos comerciais, utilizados em

ensaios não destrutivos (NDT²) separados por uma chapa de aço com espessura de 6,35 mm [17][24].

Figura 4: Configuração do experimento para demonstração do eco.



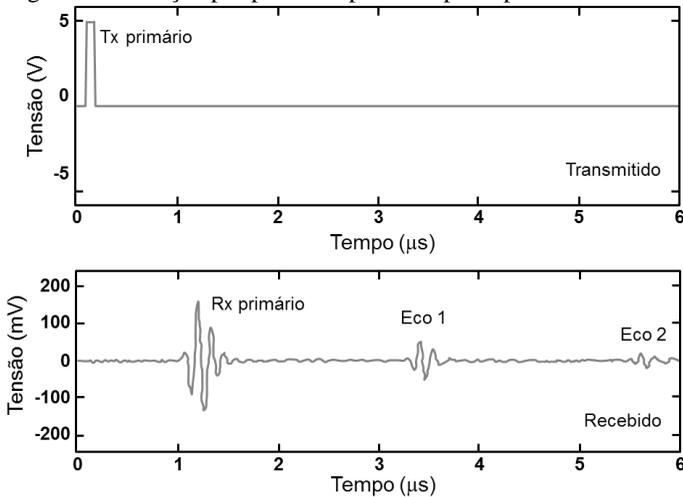
Fonte: Adaptado de [23].

Entre os transdutores e a placa metálica é utilizada uma fina camada de gel acoplante projetada para maximizar a transferência de potência acústica entre os componentes. Nessa configuração, o transmissor é conectado a um gerador de funções e o receptor a um osciloscópio [23].

Para demonstrar o efeito dos ecos acústicos, os dados foram transmitidos utilizando modulação por amplitude. O gráfico superior da Figura 5 ilustra um pulso de 5 V, aplicado para excitar o transdutor de transmissão. Esse pulso representa a informação enviada através do canal de comunicação. A excitação do transdutor de transmissão provoca a geração de uma onda acústica que viaja através do material e é detectada pelo transdutor de recepção. O gráfico inferior da Figura 5 ilustra o sinal detectado pelo receptor. Esse sinal é constituído por um pulso primário seguido por uma série de pulsos, os ecos.

² Do inglês, *Nondestructive Testing*.

Figura 5: Excitação por pulso simples e resposta primária com ecos.



Fonte: Adaptado de [23].

Em baixas taxas de transmissão, os ecos de um símbolo³ são atenuados significativamente antes da recepção dos pulsos correspondentes ao símbolo seguinte, assim sendo a interferência intersimbólica (IIS) não caracteriza um problema. Conforme a taxa de transmissão aumenta, os pulsos de símbolos sucessivos tornam-se menos espaçados e os pulsos provenientes de ecos podem provocar IIS e, conseqüentemente, erros de interpretação [23].

2.2 TIPOS DE MODULAÇÃO DO SINAL

Tanto em radiofrequência como em ultrassom, a informação a ser transmitida deve passar por um processo de tratamento de sinais, que facilite a interpretação dos dados pelo receptor. Esse processo de tratamento de sinais é realizado por meio do processo de modulação.

A modulação consiste na alteração sistemática de um parâmetro da onda portadora de acordo com a mensagem que se deseja transmitir. Essa mensagem é conhecida como sinal modulante.

Esquemas de modulação digital podem ser classificados em modulação binária (com apenas dois símbolos) e M-ária (com M símbolos) [25][26].

Li, Hutchins e Green [27] demonstraram algumas das características das principais técnicas de modulação binária. Tais

³ Neste contexto, os símbolos referem-se aos *bits* transmitidos.

características foram concluídas por meio de simulação e experimentos com ondas ultrassônicas. A seguir são apresentadas as três técnicas essenciais de modulação binárias abordadas:

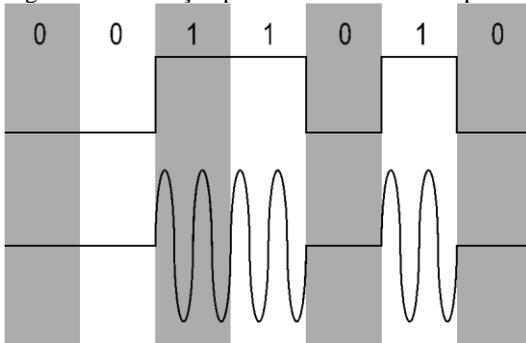
- Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK);
- Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK);
- Modulação por Chaveamento de Fase (PSK).

2.2.1 Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK)

Modulação por Chaveamento de Amplitude ou ASK (do inglês, *Amplitude Shift Keying*) é a forma mais simples de modulação digital, onde símbolos são representados como várias amplitudes discretas em uma portadora com frequência constante [25][26][27].

Na modulação ASK binária são necessários dois símbolos, onde a portadora pode ser simplesmente ligada ou desligada, gerando o sinal modulado. Nesse caso, a modulação é conhecida como OOK (do inglês, *On-Off Keying*), (Figura 6).

Figura 6: Modulação por chaveamento de amplitude (ASK).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Matematicamente, a forma geral de uma portadora do sinal modulado $s(t)$ pode ser escrita conforme a Equação 2 [25][26][27]:

$$s(t) = a(t) \cdot \text{sen}(\omega_c \cdot t + \varphi) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$s(t)$, é o sinal modulado no tempo;

$a(t)$, é a variável amplitude no tempo;

t , é a variável tempo;

ω_c , é a frequência angular da portadora;

φ , é a fase.

2.2.2 Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK)

A modulação FSK (do inglês, *Frequency Shift Keying*) é uma alternativa à modulação ASK, sendo significativamente menos sensível à flutuações de amplitude sofridas pela portadora no canal de comunicação [27].

A FSK transmite os dados usando frequências distintas para representar cada símbolo, (Figura 7). Na modulação binária por chaveamento de frequência BFSK (do inglês, *Binary Frequency Shift Keying*), os estados “um” e “zero” são modulados, por duas portadoras $s_1(t)$ e $s_2(t)$ em diferentes frequências (ω_c1 e ω_c2). Estas portadoras podem ser escritas conforme as Equações 3 e 4 [25][26][27]:

$$s_1(t) = A \cdot \text{sen}(\omega_c1 \cdot t + \varphi) \quad \text{Equação 3}$$

$$s_2(t) = A \cdot \text{sen}(\omega_c2 \cdot t + \varphi) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$s_1(t)$, é o sinal da portadora 1 no tempo;

$s_2(t)$, é o sinal da portadora 2 no tempo;

A é a variável amplitude;

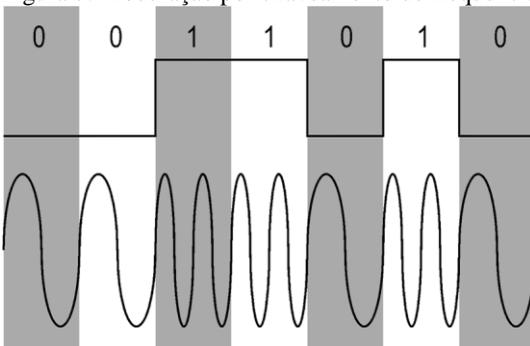
ω_c1 é a frequência angular da portadora 1;

ω_c2 é a frequência angular da portadora 2;

t , é a variável tempo;

φ é a fase.

Figura 7: Modulação por chaveamento de frequência (FSK).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A modulação FSK geralmente apresenta operabilidade complexa se comparado com a OOK, pois a alternância de amplitude é mais simples de se obter do que a mudança de frequência. Além disso, a

largura de banda total ocupada pelo sinal FSK depende da separação entre as frequências que representam os símbolos da mensagem transmitida. A taxa de erro de bit, BER (do inglês, *bit error rate*) diminui com uma maior separação entre as frequências [27].

2.2.3 Modulação por Chaveamento de Fase (PSK)

Na modulação PSK (do inglês, *Phase Shift Keying*), a fase da portadora é alterada a cada símbolo da mensagem. Matematicamente, a modulação PSK pode ser descrita pela Equação 5 [25][26][27]:

$$s(t) = \text{sen}(\omega_c \cdot t + \varphi(t)) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$s(t)$, é o sinal da portadora no tempo;

ω_c , é a frequência angular da portadora;

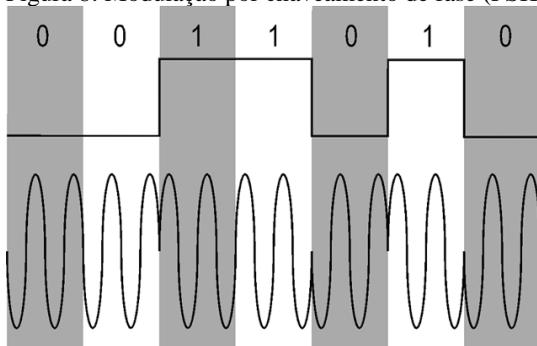
t , é a variável tempo;

$\varphi(t)$, é a variação da fase no tempo.

Na modulação PSK, a informação está contida na fase instantânea da portadora modulada. Geralmente a fase é imposta e medida em relação a uma portadora de sinal constante com fase conhecida, também chamada de PSK coerente.

A modulação PSK mais simples é a modulação binária por chaveamento de fase BPSK (do inglês, *Binary Phase Shift Keying*), a qual possui apenas duas fases, “zero” e “ π ” (Figura 8) [25][26][27].

Figura 8: Modulação por chaveamento de fase (PSK).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste tipo de modulação as mudanças de fase são abruptas nos limites dos símbolos, conseqüentemente a largura de banda ocupada é

maior do que em mudanças suaves entre estados de fase. Para essa suavização são utilizados filtros de conformação de pulso [28].

2.3 SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO

Embora a grande maioria dos sistemas de transmissão de dados utilize radiofrequência, esta tecnologia apresenta forte limitação quando na presença de barreiras metálicas, devido ao efeito pelicular.

Neste contexto, a transmissão de dados sem fio empregando ondas sonoras (ultrassom) se mostra bastante promissora. Duas foram as formas apresentadas para geração de ultrassom no material: a) transdutores piezelétricos e b) transdutores EMAT. O primeiro é mais bem compreendido e eficiente quando comparados com transdutores EMAT, porém, necessitam de acoplamento com a superfície. Por outro lado, os transdutores EMATs possuem baixa eficiência de transdução que, no entanto, permitem a transmissão de dados de forma dinâmica (sem a necessidade de acoplamento).

Atrelado ao som emitido por estes dois tipos de transdutores, ecos são gerados quando ocorrem reflexões entre as interfaces do material. Apesar dos ecos serem a base do princípio de medição para diversas aplicações, no âmbito deste trabalho são prejudiciais, pois podem provocar erros de leitura dos sinais.

Toda e qualquer informação antes de ser transmitida deve passar por uma etapa de tratamento de sinal, podendo assim, posteriormente ser interpretada pelo elemento receptor. Tratamento de sinal este que recebe o nome de modulação. Três foram os tipos principais de modulação binária apresentados: modulação por chaveamento de amplitude, fase e frequência.

Tão importante quanto modular o sinal é possuir um sistema eficiente de transmissão que não provoque anomalias no sinal transmitido. Diante desta possibilidade, um estudo aprofundado sobre os elementos que constituirão os módulos de amplificação e pré-amplificação é necessário.

3 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS E FILTROS

Neste capítulo, são apresentadas características importantes para seleção de amplificadores operacionais bem como seus modos de operação. Além disso, são apresentadas configurações em que esses componentes são empregados na construção de amplificadores de instrumentação e filtros seletores de sinais, indispensáveis na construção do módulo de amplificação e pré-amplificação.

3.1 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

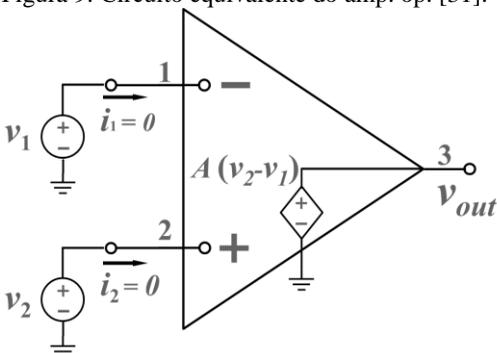
Amplificadores operacionais (amp. op.) foram inicialmente projetados para realizar operações matemáticas, e.g., adição, subtração, integração, diferenciação, entre outras, servindo de base para os computadores analógicos.

Atualmente, os amplificadores operacionais, além de executar operações matemáticas realizam uma variedade de funções relacionadas ao processamento de sinais. Essas implementações incluem o uso em amplificadores de instrumentação diferenciais, filtros ativos, detectores de pico, conversores de registro, etc. [29]. Devido à sua versatilidade, o amp. op. é um dos dispositivos mais utilizados na área de circuitos eletrônicos analógicos.

A padronização na fabricação dos amplificadores operacionais permite a substituição de um determinado tipo por outro equivalente (i.e., apresentam as mesmas características construtivas) garantindo a intercambiabilidade. Alguns circuitos integrados podem apresentar um único amplificador, dois ou quatro amplificadores em um único encapsulamento, facilitando o projeto quando há a necessidade de efetuar mais de uma operação.

Basicamente, o amp. op. é um amplificador de tensão diferencial que contém uma única saída (Figura 9). Pode ser interpretado como uma caixa preta com duas entradas (parte esquerda da Figura 9), uma negativa (1) e outra positiva (2), chamadas de “entrada inversora” e “entrada não inversora”, respectivamente, e uma saída (3) (parte direita da Figura 9) [30] [31].

Figura 9: Circuito equivalente do amp. op. [31].



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos matemáticos, o ganho em tensão A é obtido através da relação entre a tensão de saída v_{out} pelas tensões de entrada v_1 e v_2 (Equação 6) [31]:

$$A = \frac{v_{out}}{(v_2 - v_1)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A , é o ganho em tensão;

v_1 , é a tensão presente na entrada inversora;

v_2 , é a tensão presente na entrada não inversora;

v_{out} , é a tensão de saída.

São muitas as características de um amp. op. A seleção deste componente é baseada na aplicação, por exemplo, a faixa de operação em frequência e o nível de ruído são importantes na implementação de filtros seletores de sinais, por outro lado, o baixo consumo de potência é fundamental na construção de circuitos eletrônicos alimentados por baterias.

3.1.1 Características dos amplificadores operacionais

Amplificadores operacionais são caracterizados por um conjunto de parâmetros que descrevem a deriva da tensão contínua de saída e ruído e as propriedades relacionadas ao condicionamento de sinal, tais como faixa dinâmica, resposta em frequência e taxa de variação (*slew rate*). Estes parâmetros são geralmente apresentados pelos fabricantes em folhas de dados, que incluem:

- Ganho em malha aberta;
- Tensão de *offset*;
- *Slew rate*;
- Impedância de saída e entrada;
- Razão de rejeição de modo comum (CMRR).

3.1.1.1 Ganho de Tensão

O ganho de tensão, normalmente conhecido como ganho em malha aberta, é definido pela relação entre a tensão de saída para uma dada variação da tensão de entrada. O ganho de tensão é denotado por A com valores reais variando de alguns milhares até cerca de cem milhões de vezes [32].

3.1.1.2 Tensão de *Offset*

Por definição, a tensão de *offset* é a tensão que deve ser aplicada aos terminais de entrada do amplificador tornando a tensão de saída nula [33]. A tensão de *offset* aparece na saída do amp. op. mesmo quando não há sinal conectado as suas entradas (inversora e não inversora), devido ao desequilíbrio das impedâncias presentes no estágio diferencial de entrada (interno ao amp. op.). Valores de *offset* para amplificadores comerciais estão situados geralmente na faixa de (1 a 100) mV, sendo que a grande maioria possui entradas para o seu ajuste [32].

3.1.1.3 *Slew rate*

O *slew rate*, ou taxa de subida como também é conhecido, é definido como a máxima variação da tensão de saída por unidade de tempo, expresso em $[V/\mu s]$ e calculado pela Equação 7 [34]:

$$SR = 2\pi \cdot f \cdot V_p \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

SR , é a taxa de subida;

f , é a frequência;

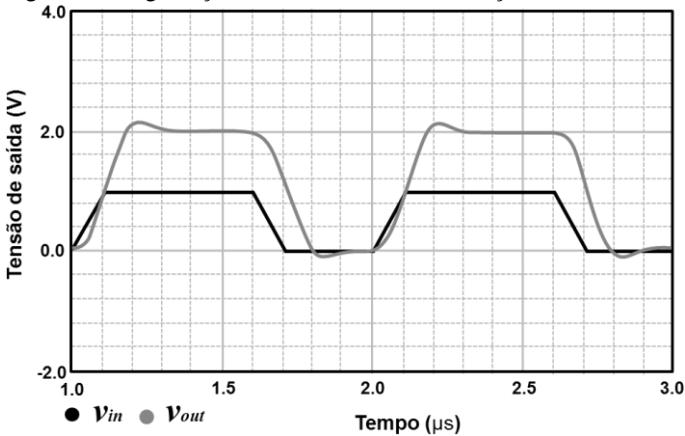
V_p , é a tensão de pico de saída.

Em termos gerais, o valor de *slew rate* define a “velocidade” de resposta do amplificador. Nesse sentido, quanto mais rápido melhor será o amplificador. Pela Equação 7, observa-se que há um comprometimento entre a frequência f e a tensão V_p máxima de saída,

onde o atraso gerado pelo *slew rate* pode provocar uma distorção no sinal de saída [34].

Observando a Figura 10, percebe-se claramente o efeito causado pelo *slew rate*, onde o sinal de saída v_{out} não acompanha o sinal de entrada v_{in} (1 V de amplitude), i.e., a saída v_{out} (com um ganho de duas vezes) deveria atingir o limite de 2 V em 1,1 μ s mas isto não acontece.

Figura 10: Degradação da saída devido às limitações da taxa de subida.



Fonte: Adaptado de [34].

3.1.1.4 Razão de Rejeição de modo comum (CMRR)

Os amplificadores operacionais são também chamados de amplificadores diferenciais, pois a tensão de saída é proporcional à diferença de tensão aplicada entre os dois terminais de entrada. Significa que quando dois sinais de mesma amplitude, frequência e fase são aplicados às entradas (inversora e não inversora) de um amplificador operacional, o sinal de tensão na saída deve ser nulo. Esta propriedade é conhecida como rejeição de modo comum.

Na realidade, os amplificadores operacionais apresentam um pequeno sinal de tensão na saída em resposta a sinais de modo comum. A razão da tensão de saída v_{out} pela tensão de entrada v_{cm} é chamada de ganho em modo comum A_{cm} , (Equação 8) [34]:

$$A_{cm} = \left| \frac{v_{out}}{v_{cm}} \right| \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

A_{cm} , é o ganho em modo comum;

v_{out} , é a tensão de saída;

v_{cm} , é a tensão de modo comum.

A “habilidade” dos amplificadores operacionais em rejeitar sinais de modo comum é conhecida como razão de rejeição de modo comum ou CMRR (do inglês, *common mode rejection ratio*), (Equação 9) [34]:

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

CMRR, é a razão de rejeição de modo comum;

A_d , é o ganho de tensão diferencial;

A_{cm} , é o ganho em modo comum.

E usualmente, expressa em decibéis [dB] (Equação 10):

$$CMRR = 20 \log_{10} \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| \quad \text{Equação 10}$$

A CMRR diminui com o aumento da frequência, valores típicos vão de (80 a 100) dB em baixas frequências.

3.1.2 Tipos de polarização do amplificador

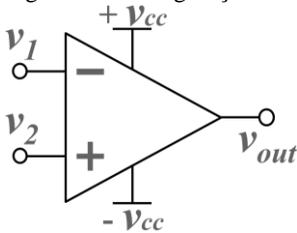
Existem três modos de operação com amplificadores operacionais: configuração não realimentada, realimentação positiva e realimentação negativa.

3.1.2.1 Configuração não realimentada

Amplificadores operacionais podem ser usados com ou sem realimentação. Quando o amplificador não possui realimentação (Figura 11), é comum dizer que opera em malha aberta, i.e., não possui um resistor de *feedback* conectando a saída v_{out} a uma das entradas v_1 ou v_2 .

Nessa configuração, o ganho do amplificador é estipulado pelo fabricante e o projetista não tem controle algum sobre ele. Configurações deste tipo são largamente empregadas quando há necessidade de se comparar níveis de tensão [35].

Figura 11: Configuração não realimentada.



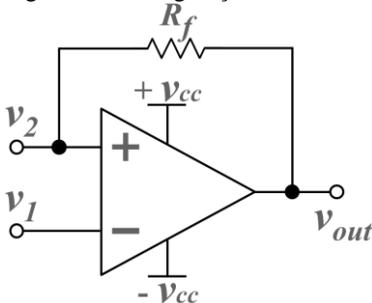
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2.2 Realimentação positiva

Outro modo de operação, diferente do primeiro apresentado, trabalha em malha fechada, pois possui um resistor de *feedback* entre os terminais de saída e entrada não inversora (+). Por este motivo, recebe o nome de realimentação positiva (Figura 12).

A vantagem deste modo de operação é que o ganho é definido pelo projetista, entretanto, o circuito não trabalha como amplificador de sinais, pois não apresenta resposta linear. Circuitos osciladores são comumente construídos com base neste modo de operação [35][36].

Figura 12: Configuração realimentada positivamente.



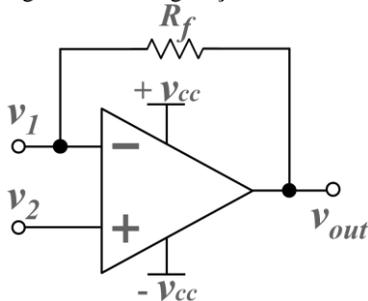
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2.3 Realimentação negativa

Uma terceira configuração é a configuração com realimentação negativa (Figura 13). Um resistor entre os terminais de entrada inversora (-) e a saída é responsável pela realimentação. É considerada uma das configurações mais importantes e utilizadas com emprego de amp. op. Semelhante ao anterior, o ganho pode ser definido pelo projetista. Dentre as varias aplicações com o uso dessa configuração, destacam-se

as de amplificador inversor, não inversor, somador, diferenciador, integrador e filtro ativo [35][36].

Figura 13: Configuração com realimentação negativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

Circuitos montados com amplificadores operacionais na configuração diferencial são incapazes de extrair satisfatoriamente o sinal diferencial quando as entradas estão submetidas a sinais ruidosos com baixa amplitude. A solução para este problema é a utilização de amplificadores de instrumentação [37].

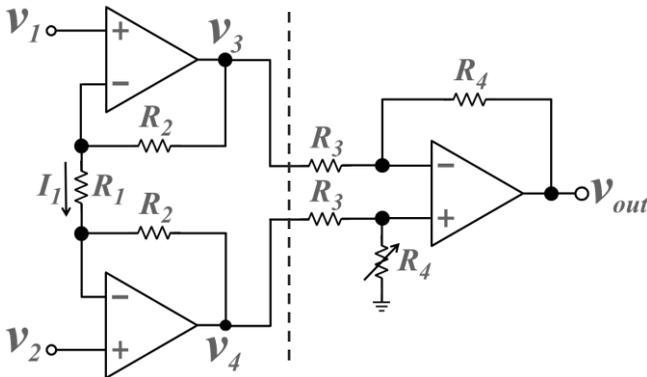
Os amplificadores de instrumentação são circuitos que amplificam a diferença entre duas tensões, apresentam elevada impedância de entrada, alta rejeição a sinais de modo comum e ganho diferencial ajustável maior e mais estável do que com um simples amplificador diferencial [31].

Segundo Northrop [29] e Nuwer [38], a rejeição de modo comum deve ser no mínimo 80 dB para atenuar os sinais de modo comum, preservando apenas a amplificação da diferença de tensão entre as entradas.

Conforme Tavares [39], amplificadores de instrumentação de boa qualidade têm CMRR de 120 dB, impedância de entrada da ordem de $10^{15} \Omega$ e ganho ajustável de 1 V/V a 1000 V/V.

A construção de amplificadores de instrumentação a partir de amplificadores operacionais é possível (Figura 14). Entretanto, a utilização de componentes discretos apresenta maior instabilidade térmica, provocando uma redução da CMRR [40].

Figura 14: Configuração típica de um amplificador de instrumentação.



Fonte: Adaptado de [37].

O circuito da Figura 14 pode ser analisado em duas partes: o circuito com os dois amplificadores (parte esquerda da Figura 14) pode ser analisado com o emprego das leis de Kirchhoff e Ohm, enquanto que a parte restante do circuito pode ser analisada aplicando o teorema da superposição. Após a análise, a tensão de saída v_{out} pode ser expressa em termos de v_1 e v_2 (Equação 11) [31],[37]:

$$v_{out} = \left[\frac{R_4}{R_3} \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \right] (v_2 - v_1) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

v_{out} , é a tensão de saída;

R_1, R_2, R_3 e R_4 , correspondem aos valores das resistências do circuito;

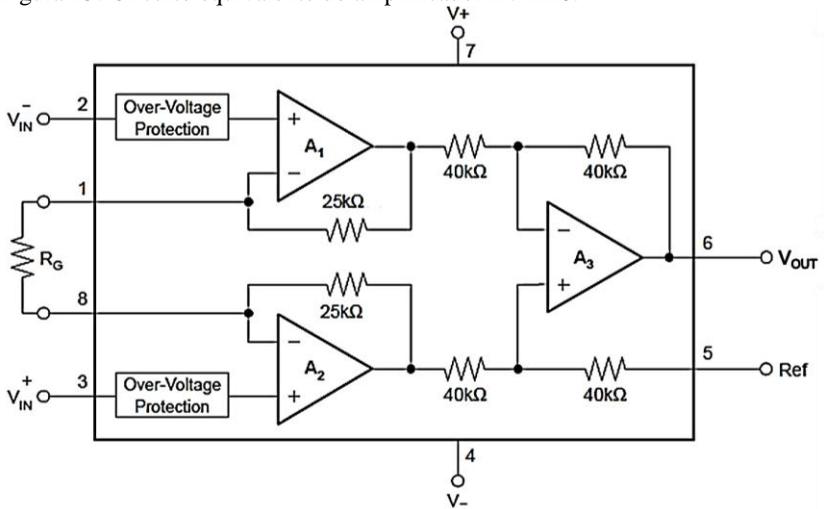
v_2 , é a tensão presente na entrada não inversora;

v_1 , é a tensão presente na entrada inversora.

Nos amplificadores de instrumentação comerciais, o ajuste de ganho pode ocorrer pela substituição de um resistor externo. Alguns amplificadores apresentam ganho pré-ajustado e a seleção é realizada de forma digital [41].

Na Figura 15, é apresentado o circuito equivalente de um amplificador de instrumentação comercial, modelo INA128, do fabricante de componentes eletrônicos Texas Instruments [42]. O ganho desse componente é definido pelo resistor R_G localizado entre os pinos 1 e 8.

Figura 15: Circuito equivalente do amplificador INA128.



Fonte: Adaptado de [42].

O ganho do INA128 e sua tensão de saída V_{OUT} em função das entradas V_{IN}^+ e V_{IN}^- podem ser calculados pelas Equações 12 e 13 respectivamente, ambas fornecidas pelo fabricante em sua folha de dados [42]:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad \text{Equação 12}$$

$$V_{OUT} = G(V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

G , é o ganho em tensão total do circuito;

R_G , é o valor da resistência do resistor de ganho;

V_{OUT} , é a tensão de saída;

V_{IN}^- , é a tensão presente na entrada inversora;

V_{IN}^+ , é a tensão presente na entrada não inversora.

3.3 FILTROS SELETORES DE SINAIS

De modo geral, um amplificador de instrumentação pré-ajustado serviria para a aquisição dos sinais acústicos transmitidos, no entanto, em aplicações práticas, inúmeras interferências estão inseridas no sinal e

comprometem a sua visualização. Uma maneira bastante empregada para reduzir esse efeito é a inserção de filtros capazes de delimitar as faixas do sinal e atenuar as interferências [43].

A construção de filtros pode empregar diversos tipos de componentes. Quando são utilizados componentes passivos (i.e., resistores, indutores e capacitores) o filtro é denominado filtro passivo. Nos filtros ativos, os mesmos componentes passivos são associados a componentes ativos como: transistores e amplificadores operacionais. Além disso, os filtros podem ser implementados na forma digital, geralmente em *DSPs* (do inglês, *Digital Signal Processor*) ou em microcontroladores, denominados filtros digitais [44][45].

Cada forma construtiva apresenta vantagens e desvantagens, algumas dessas características para filtros passivos e ativos estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens entre filtros ativos e passivos.

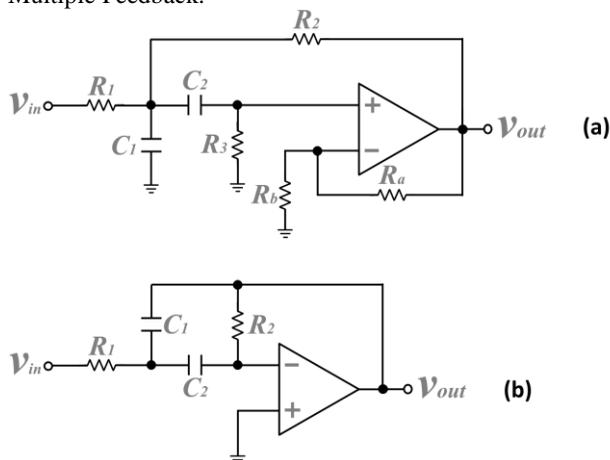
Filtros Passivos	
Vantagens	Apresentam baixa sensibilidade ⁴ ;
	Normalmente podem operar com tensões elevadas;
	Não exigem fonte de alimentação.
Desvantagens	A integração entre a saída e carga é crítica;
	Componentes de grande volume (baixas frequências);
	Difícil integração/ajuste (ordens >3).
Filtros Ativos	
Vantagens	Em grande parte dos casos o projeto é simples;
	Montagem compacta;
	Componentes disponíveis comercialmente.
Desvantagens	Limitação em frequência;
	Apresentam problemas de sensibilidade ativa e passiva;
	Possibilitam ganho.

Fonte: Adaptado de [44]

A implementação de filtros ativos pode ser realizada com diversas topologias, as duas principais são: Sallen Key e Multiple Feedback (Figura 16) [36][44][46].

⁴ O termo sensibilidade, na área de filtros, refere-se a uma grandeza que possibilita quantificar o quão sensível é o filtro a variações dos valores de ganho e dos componentes (resistores e capacitores), para prever desvios de magnitude e resposta em frequência [31][44].

Figura 16: Filtro passa banda implementado nas topologias, a) Sallen Key e b) Multiple Feedback.

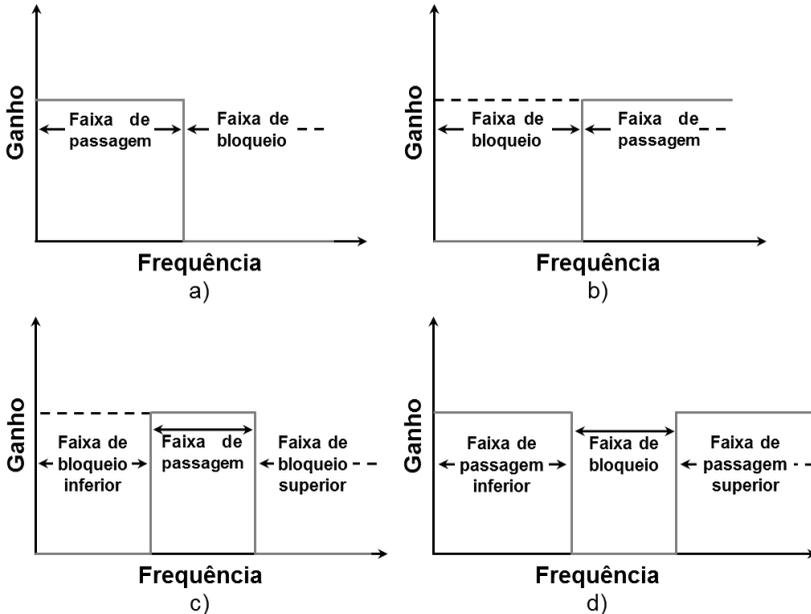


Fonte: Adaptado de [44].

A seleção da topologia do filtro depende das condições do sinal analisado. Por exemplo, quando há a necessidade de analisar sinais sem a inversão de fase, deve-se optar pela topologia Sallen Key, pois a Multiple Feedback inverte a fase do sinal. Cada topologia apresenta características particulares e cabe ao projetista selecionar a mais adequada ao sinal de interesse [46].

Após a definição da topologia de filtro a ser utilizada, deve ser selecionada a banda de frequência do filtro). A Figura 17 ilustra as características ideais dos quatro tipos principais de filtros. Na Figura 17 (a), é apresentado o filtro passa baixa, esse filtro permite a passagem de sinais cujas frequências estejam abaixo de determinado valor. Em (b), o filtro passa alta, este permite a passagem de sinais que estejam acima de determinada frequência. Já em (c), é apresentado o filtro passa faixa que permite a passagem de sinais que estejam dentro de uma determinada banda de frequências. E um quarto tipo, o rejeita faixa (d), em que os sinais dentro de uma determinada faixa de frequências são rejeitados, deixando passar os demais.

Figura 17: Tipos de Filtros: a) filtro passa baixa, b) filtro passa alta, c) filtro passa banda e d) filtro rejeita banda.

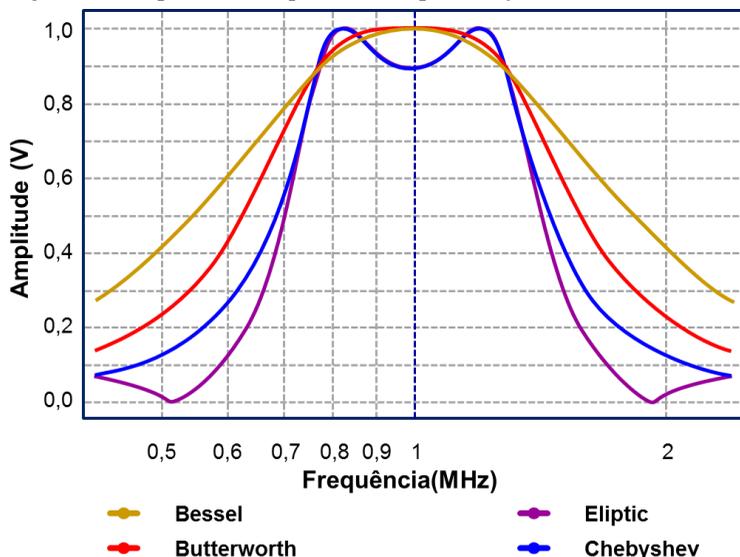


Fonte: Adaptado de [31].

Após a definição do tipo de filtro e da topologia, o próximo passo é a seleção da função de aproximação do filtro. Os filtros podem ser aproximados por funções características como Butterworth, Chebyshev, Bessel e Elíptico. A resposta em frequência para as aproximações Butterworth, Chebyshev, Bessel e Elíptico são apresentadas na Figura 18 [36][47].

A aproximação Butterworth (Figura 18), é uma das mais populares funções de aproximação que se caracteriza pela região plana na faixa de passagem. Para as aproximações do tipo Elíptico e Chebyshev, ocorre uma atenuação mais abrupta nas transições entre a faixa de bloqueio inferior e a faixa de passagem e, em consequência, um *ripple* (oscilação) na faixa passante. No caso de aproximações do tipo Bessel, a transição da faixa de bloqueio para faixa de passagem ocorre de maneira mais suave do que as demais [36][46].

Figura 18: Resposta em frequência das aproximações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as aproximações (Figura 18) apresentam melhorias na seletividade com o aumento da ordem do filtro. A utilização de filtros em cascata para elevar a ordem do filtro é uma prática comum [36][44][46].

3.4 SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO

Diversos são os amplificadores operacionais disponíveis para aplicações relacionadas ao processamento de sinais tais como: amplificadores de instrumentação diferenciais, filtros ativos, detectores de pico, conversores de registro, etc.

Neste contexto, foi apresentado um apanhado geral sobre o princípio de funcionamento, modos de operação com amplificadores e características importantes para a seleção do componente.

Foram apresentadas formas construtivas empregando amplificadores operacionais na implementação de amplificadores de instrumentação e filtros seletores de sinais, indispensáveis à realização deste trabalho.

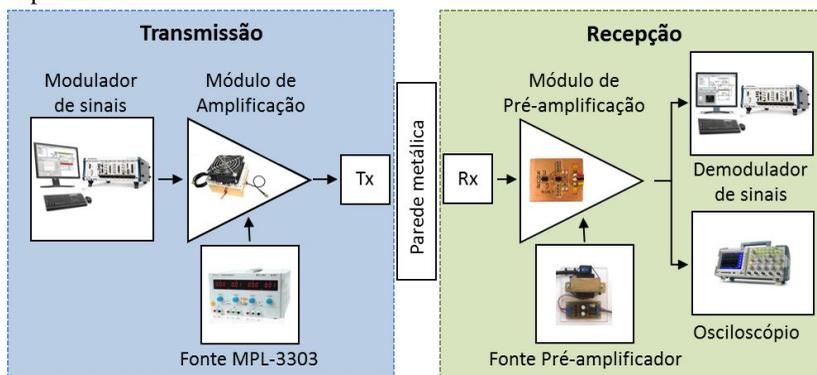
Como solução para extração de sinais ruidosos de baixa amplitude provenientes da bobina de recepção do EMAT Rx, foi sugerida a utilização de um amplificador de instrumentação.

Com relação aos filtros seletores de sinais, foram descritas as etapas para implementação, como a seleção da topologia, banda de frequência (tipo de filtro) e funções de aproximação, visando a aplicação na etapa de recepção de sinais.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, são descritos os módulos e equipamentos utilizados na transmissão e recepção de sinais através da parede metálica. Para facilitar o entendimento, a bancada experimental foi subdividida em duas partes (Figura 19): a primeira parte apresenta os elementos necessários para transmitir o sinal acústico de potência, na segunda parte, são apresentados os componentes responsáveis pela recepção e tratamento de sinais.

Figura 19: Disposição lógica dos elementos que compõem a bancada experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE SINAIS

Para transmitir sinais de ultrassom através da parede metálica, foram utilizados transdutores ultrassônicos (EMATs e Piezoelétricos). Os sinais transmitidos pelos transdutores geralmente necessitam passar pelos processos de amplificação e modulação do sinal. Assim, um modulador de sinais, que converta o valor de uma medição (código binário) em sinais elétricos a serem amplificados e transmitidos, e um módulo de amplificação, que forneça potência de sinal adequada, são necessários.

4.1.1 Gerador de sinal modulado

O sinal modulado empregado na transmissão foi gerado a partir de um computador industrial PXI⁵ (*PCI eXtensions for Instrumentation*) [48].

Dois módulos adicionais, o NI PXI-5441 e o NI PXI-5610 foram utilizados na bancada experimental. Esses foram escolhidos por serem capazes de gerar em conjunto sinais de 250 kHz a 2,7 GHz e interpretar o *software* de modulação implementado em linguagem LabVIEW. Com essa interpretação, foi possível gerar sinais com frequência central de 1 MHz, modulados em amplitude, fase ou frequência (seção 2.2) [49][50][51].

4.1.2 Módulo de Amplificação

Na construção do módulo de amplificação, foi selecionado o amplificador operacional do fabricante Apex Microtechnology, modelo PA119CE (seção 3.1.1), capaz de amplificar desde sinais contínuos até sinais de vídeo (da ordem de MHz). O PA119CE é indicado para aplicações onde se necessita operar com transdutores de potência, excitação de *lasers* diodos e até mesmo alimentar *leds* de alta potência [52].

O PA119CE é um amplificador operacional de potência capaz de operar com altas tensão e corrente, pode ser alimentado com tensões simétricas de ± 15 V (mínima) a ± 40 V (máxima), e fornecer até 4 A de corrente elétrica. Este amplificador operacional apresenta como características principais, tensão *offset* de $\pm 0,5$ mV (seção 3.1.1.2), *slew rate* de 900 V/ μ s (seção 3.1.1.3) e CMRR de 104 dB (seção 3.1.1.4). O PA119CE possui ainda um limite de corrente interno de 0,5 A que pode ser alterado pela adição de duas resistências externas, o valor dos resistores pode ser calculado segundo a Equação 14 [52]:

$$R_{cl} = \frac{0,65}{I_{LIM} - 0,54} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

R_{cl} , é o valor da resistência;

I_{LIM} , é o valor da corrente de limite desejada.

⁵ O PXI é um computador robusto de alto desempenho, montado em um chassi modular para o desenvolvimento de sistemas de medição e automação [48].

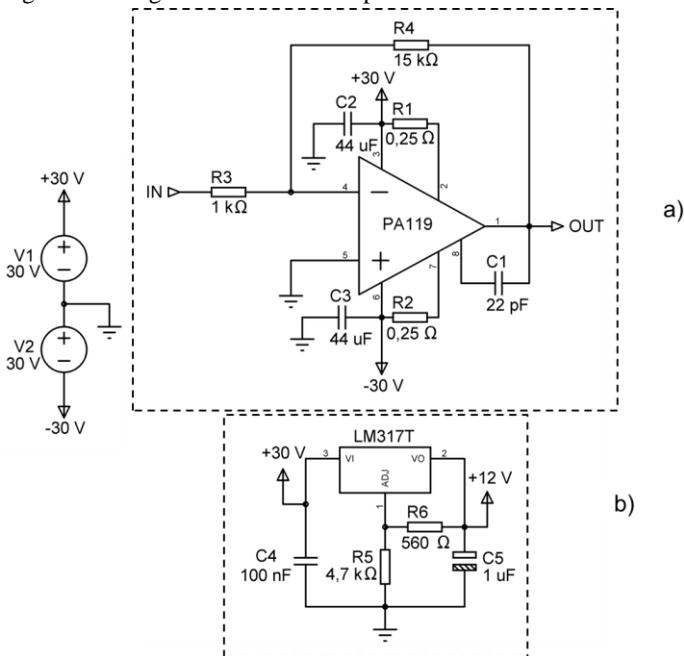
Além disso, a compensação de fase por meio de um capacitor externo, permite ao usuário flexibilidade na obtenção da taxa de variação e largura de banda em todas as configurações de ganho [52].

4.1.2.1 Projeto do Módulo de Amplificação

A configuração empregada no projeto do módulo de amplificação foi a configuração inversora (seção 3.1.2.3) configurada com um ganho de aproximadamente 15 (quinze) vezes (Figura 20 (a)).

Com base no ganho e frequência de operação, um capacitor para compensação de fase (C1) foi adicionado à saída (seção 4.1.2). Também foram adicionados os resistores R1 e R2, necessários para compor o limite de corrente de saída do amplificador (Equação 14).

Figura 20: Diagrama elétrico do amplificador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao iniciar a etapa experimental, um aquecimento excessivo no amplificador operacional foi observado. Visando minimizar o superaquecimento do componente, um sistema de ventilação forçada utilizando um mini ventilador foi construído (Figura 21). Um circuito adicional (Figura 20 (b)) que reduz a tensão de alimentação (30 V para

12 V) para alimentar o mini ventilador foi implementado utilizando o regulador de tensão LM317 [53].

Figura 21: Módulo de amplificação desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Fonte de alimentação MPL-3303

A fonte de tensão linear, utilizada na bancada experimental para alimentar o módulo de amplificação, foi a fonte de alimentação de corrente contínua regulada modelo MPL-3303, do fabricante Minipa [54].

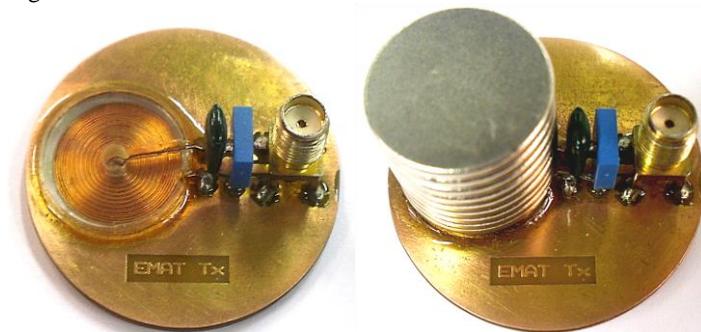
A seleção da fonte da alimentação foi baseada principalmente na quantidade de canais de saída. A MPL-3303 possui duas saídas variáveis de 0 a 30 V, permitindo uma configuração de saída simétrica. Além disso, cada canal pode fornecer uma corrente máxima ajustável de 0 a 3 A [54].

4.1.4 EMAT Tx

Para transmitir o sinal nas diferentes configurações, foi construído um transdutor EMAT (de transmissão) utilizando uma bobina com formato em espiral com um total de 20 voltas de fio 27 AWG esmaltado. Essa configuração da bobina permitiu aproveitar toda a área do ímã com aproximadamente 20 mm de diâmetro.

A montagem final do EMAT (Figura 22) ocorreu com a fixação da bobina, conector de alimentação e capacitores de sintonia sobre um disco confeccionado em placa de fenolite.

Figura 22: EMAT de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A adição de capacitores em série com a bobina foi necessária, visando atingir a máxima transferência de potência. O valor da capacitância foi obtido efetuando a medição de impedância da bobina com o auxílio de um analisador de impedância Agilent 4294A, disponível no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) da Universidade Federal de Santa Catarina [55].

4.1.5 Transdutor piezoelétrico

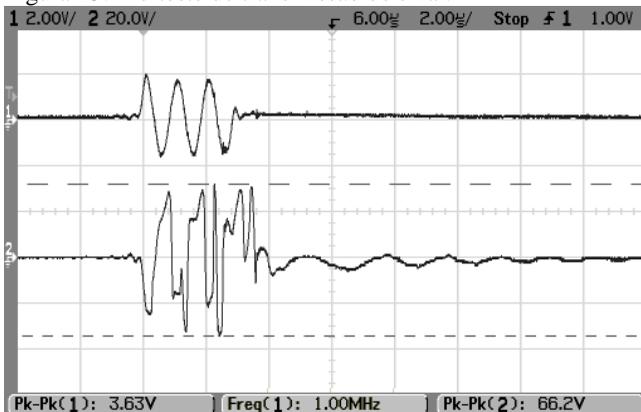
Para a realização dos testes em diferentes configurações, dois transdutores piezoelétricos Olympus V102, com frequência de operação centralizada em 1 MHz foram utilizados [17]. Os transdutores em questão são largamente utilizados para aplicações em ensaios não destrutivos (NDT). No âmbito deste trabalho, a aplicação desses transdutores compreende a geração e captação dos sinais ultrassônicos em ambas as etapas de transmissão e recepção.

4.1.6 Avaliação da etapa de transmissão

Para avaliar a etapa de transmissão, um teste visando identificar o nível de amplificação e possíveis quedas de tensão sobre o transdutor de emissão foi realizado.

O método de avaliação consistiu em fornecer ao módulo de amplificação um sinal modulado gerado pelo gerador de sinais. A saída do módulo de amplificação foi conectada ao transdutor EMAT (de emissão). Tanto na entrada quanto na saída do módulo de amplificação foram conectadas ponteiras de teste do osciloscópio. O resultado do experimento é ilustrado na Figura 23

Figura 23: Pré-teste de transmissão de sinal.

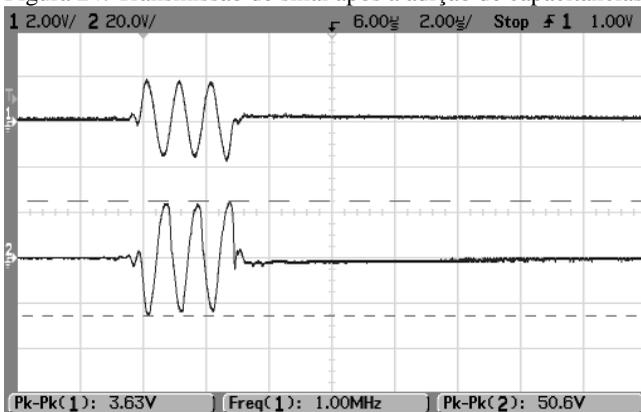


Fonte: Elaborado pelo autor.

O canal 1 do osciloscópio (parte superior da Figura 23) apresenta o sinal de entrada do módulo de amplificação modulado em amplitude, esse sinal é proveniente do gerador de sinais. O canal 2 (parte inferior da Figura 23) apresenta o sinal na saída do módulo de amplificação em que pode ser observada uma distorção acentuada. Fato que pode ser explicado devido ao fornecimento insuficiente de corrente da fonte de alimentação ao transdutor EMAT de transmissão.

Um método de correção para a distorção do sinal observado foi a adição de capacitores em paralelo com a tensão de alimentação. Um novo experimento foi realizado e uma melhora significativa pode ser observada a partir do resultado obtido, ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Transmissão de sinal após a adição de capacitâncias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 RECEPÇÃO E TRATAMENTO DE SINAL

Os testes iniciais realizados na etapa de transmissão permitiram a continuidade do trabalho para a etapa de recepção do sinal. Nesta etapa, são descritos os elementos responsáveis pela recepção e tratamento de sinais. Semelhante à transmissão, para captar os sinais de ultrassom, é necessária a utilização de transdutores ultrassônicos (EMAT Rx ou Piezoelétrico, este descrito na seção 4.1.5).

Os sinais captados por esses elementos apresentam baixa amplitude, por isso necessitam ser amplificados para posterior demodulação. Logo, é necessária a utilização de um módulo de pré-amplificação, que amplifique o sinal a um nível identificável (i.e., sinal maior que o ruído do sistema) tanto no osciloscópio (aquisição de níveis de amplitude e ruído) quanto no demodulador (conversão dos sinais elétricos em informação - código binário).

4.2.1 EMAT Rx

Fundamental tarefa da etapa de recepção se configura como a concepção e construção do EMAT de recepção. Seguindo as mesmas limitações de diâmetro do ímã (EMAT de transmissão, seção 4.1.4), 300 voltas de fio 36 AWG esmaltado, foram enroladas em formato de espiral (Figura 25).

Figura 25: Componentes do EMAT Rx.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um capacitor de sintonia foi adicionado (conforme seção 4.1.4) para atingir a máxima recepção de sinal. A montagem final do EMAT Rx ocorreu juntamente com a placa de pré-amplificação. Detalhes com características físicas e construtivas dos EMATs podem ser obtidas em [56].

4.2.2 Pré-amplificador

Para construção do pré-amplificador, foram utilizados o amplificador de instrumentação modelo INA128UA e o amplificador operacional modelo THS4022, fabricados pela Texas Instruments (ambos selecionados devido à faixa de operação em frequência, e baixos níveis de ruído) [42][57].

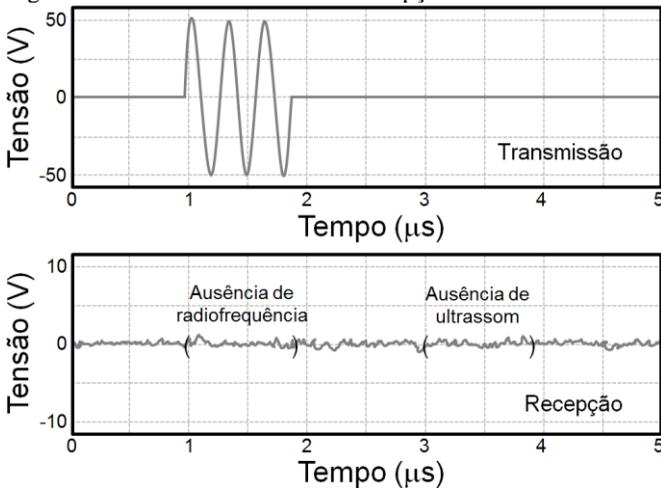
4.2.2.1 Projeto do Pré-Amplificador

Diversas são as possíveis soluções para construção de filtros seletores de sinais (seção 3.3), dentre elas, adotou-se as de filtros ativos, devido a sua facilidade de implementação. A construção inicial do pré-amplificador contemplava apenas as etapas de filtragem e ganho.

Testes preliminares empregando um filtro Butterworth de quarta ordem e topologia Multiple Feedback foram realizados. Os resultados foram insatisfatórios devido a diversos problemas como: sinal de saída ruidoso, baixa impedância de entrada do circuito e ganho inadequado.

Após trocas e compartilhamentos de informações com um especialista na área de filtros seletores de sinais [58], possíveis soluções sugeridas (mudanças de topologia e função de aproximação) foram implementadas. As Figuras 26, 27 e 28, ilustram a evolução dos sinais de recepção após as implementações práticas sugeridas.

Figura 26: Sinais de transmissão e recepção dos testes iniciais.

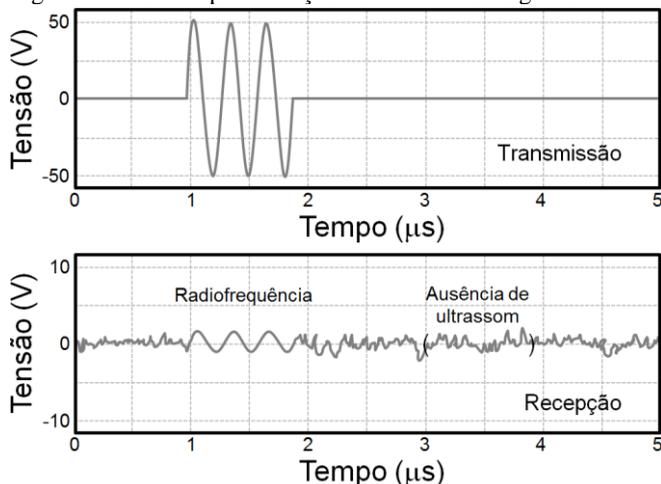


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos testes preliminares, a captação do sinal transmitido não foi possível devido ao baixo ganho do filtro. Sinais ruidosos foram identificados entre os parênteses (Figura 26) onde possivelmente se encontrariam os sinais de radiofrequência e ultrassom.

A troca da topologia somado ao aumento no ganho permitiu a visualização do sinal de radiofrequência no intervalo de $1 \mu\text{s}$ a $2 \mu\text{s}$ (parte inferior da Figura 27).

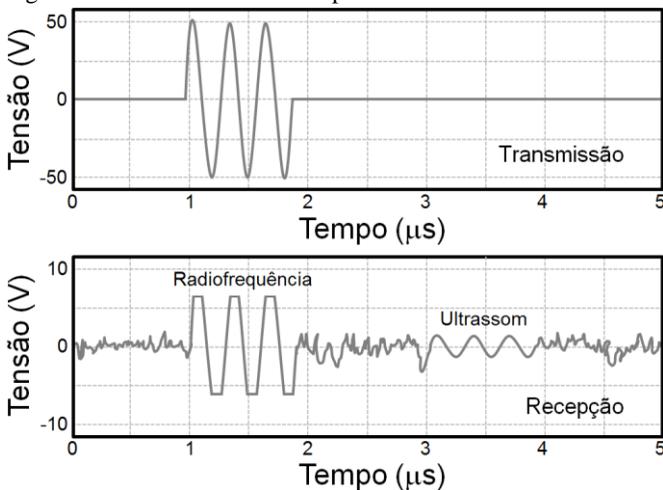
Figura 27: Nova implementação com aumento no ganho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, a visualização do sinal de ultrassom ainda não foi possível. Com isso, um aumento ainda maior do ganho foi aplicado. Assim, o sinal de radiofrequência aumentou em amplitude e atingiu a saturação (entre $1 \mu\text{s}$ e $2 \mu\text{s}$, parte inferior da Figura 28). Como resultado, o sinal de ultrassom pode ser visualizado no intervalo entre $3 \mu\text{s}$ e $4 \mu\text{s}$ (parte inferior da Figura 28).

Figura 28: Sinal de ultrassom captado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a captação do sinal de ultrassom, duas melhorias foram implementadas: a primeira faz uso do amplificador de instrumentação (seção 3.2), cuja finalidade é reduzir o efeito de divisor de tensão, e a segunda, que inclui um filtro Sallen Key passa faixa aproximado pela função característica Bessel, tem por finalidade atenuar sinais presentes fora da banda de seleção. Em ambas as etapas, foi aplicado ganho, pois seria inviável captar e analisar os sinais provenientes da transmissão.

Alguns resultados obtidos nos testes preliminares foram publicados [11][59].

4.2.2.2 Simulações em *softwares*

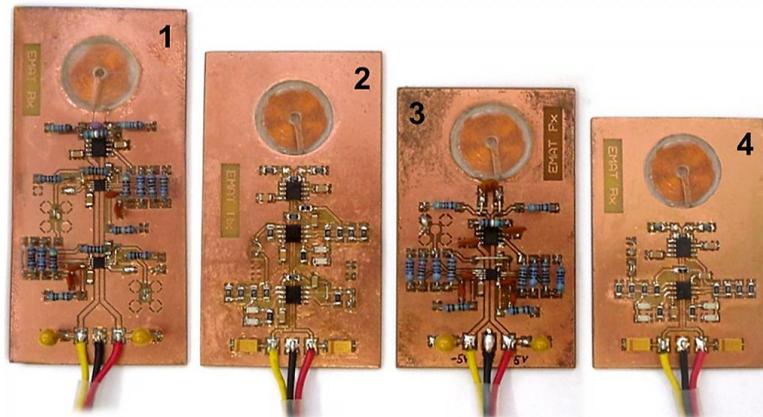
Os *softwares* Filter Wiz Lite e o FilterPro Desktop de projeto para filtros foram empregados na construção do pré-amplificador. Configurando parâmetros como ganho, frequência central, banda passante, ordem do filtro, função de aproximação e topologia, valores ideais de resistores e capacitores foram obtidos.

Os valores obtidos pelos *softwares* de projeto foram introduzidos em outro *software* de simulação de circuitos eletroeletrônicos (Multisim 11.0), no qual simulações com o modelo do amplificador operacional foram realizadas, possibilitando prever o comportamento da resposta em frequência e ganho total.

Finalizadas as simulações, quatro placas de circuito impresso foram confeccionadas (Figura 29), duas com estágio de ganho

independente (placas 1 e 2) e duas com estágio de ganho integrado ao estágio de filtragem (placas 3 e 4).

Figura 29: Placas do pré-amplificador confeccionadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

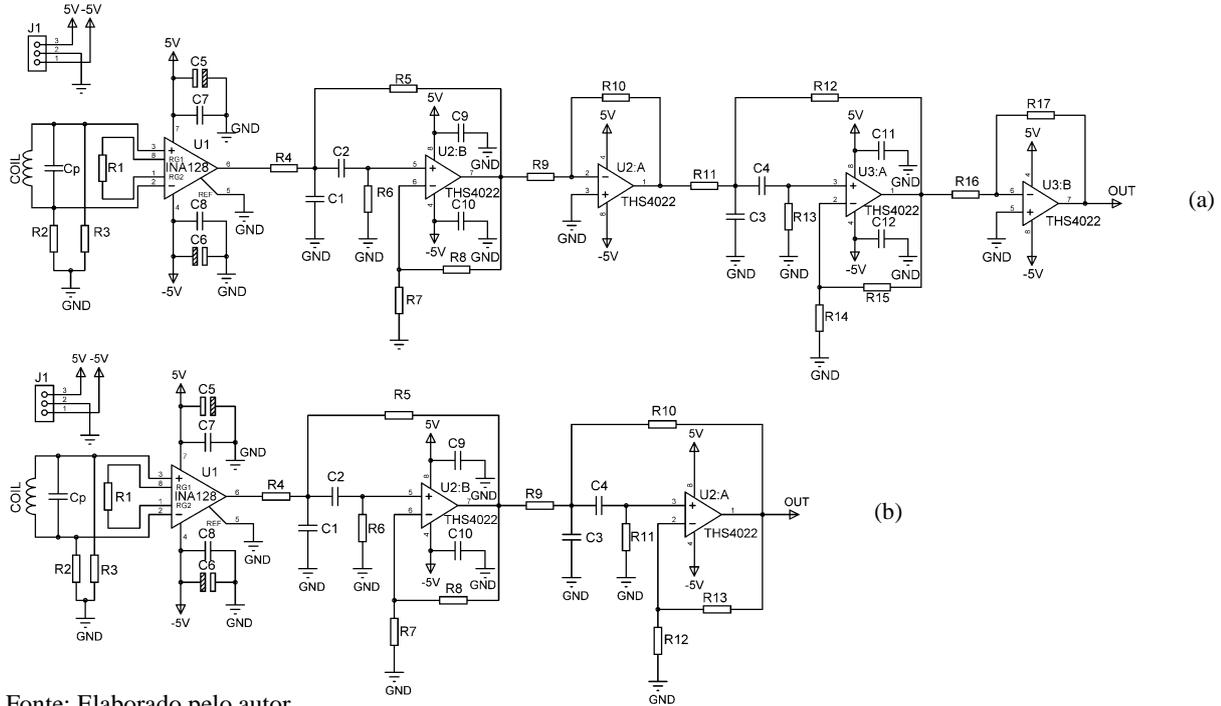
Na fabricação das placas foram utilizados resistores e capacitores com duas tecnologias de fabricação. A tecnologia *Through Hole*⁶ foi utilizada nas placas 1 e 3 pela facilidade de montagem. Nas placas 2 e 4 foram utilizados componentes SMD⁷ (*Surface Mount Device*) por proporcionar menores comprimentos de trilha entre componentes permitindo uma compactação da placa de circuito impresso e ser, teoricamente, menos sensível a interferências [46].

O diagrama elétrico das placas apresentadas na Figura 29 é ilustrado na Figura 30. O diagrama elétrico da Figura 30 (a) apresenta o estágio de ganho independente ao de filtragem, enquanto que em (b) os estágios são integrados. A finalidade da separação em (a) foi facilitar a alteração do ganho pela troca dos resistores R10 e R17. Em (b) isso só seria possível trocando todos os resistores que compõem o circuito, o que torna inviável devido dificuldade de troca dos componentes.

⁶ A tecnologia *through hole*, refere-se à montagem em que os pinos (cilíndricos ou retangulares) dos componentes eletrônicos são inseridos nos furos da placa de circuito impresso e brasados na superfície do lado oposto ao do componente.

⁷ Na tecnologia SMD os terminais (base retangular plana) dos circuitos eletrônicos são montados e brasados diretamente sobre a superfície da placa de circuito impresso.

Figura 30: Diagrama elétrico do pré-amplificador, (a) estágio de ganho independente e (b) estágio de ganho integrado ao estágio de filtragem.



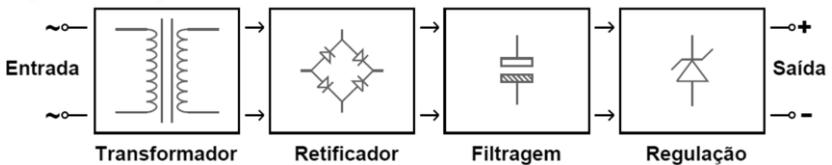
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Fonte de alimentação simétrica

Todos os circuitos eletroeletrônicos necessitam de energia elétrica para funcionar, porém nem sempre a energia está disponível na forma que o circuito eletroeletrônico exige [60]. Por esse motivo uma fonte de alimentação simétrica para ser empregada no pré-amplificador foi construída.

A fonte de alimentação construída que converte a tensão alternada da rede elétrica em tensão contínua é denominada conversor CA/CC (corrente alternada/ corrente contínua). A estrutura básica da fonte é apresentada na Figura 31.

Figura 31: Diagrama de blocos de uma fonte linear.



Fonte: Elaborado pelo autor.

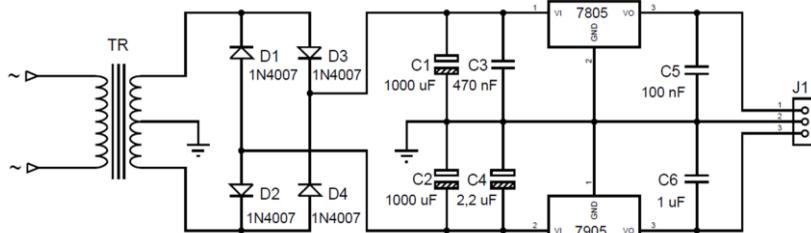
Na maioria das fontes lineares, na primeira etapa utiliza-se um transformador abaixador de tensão que converte o valor da tensão alternada de entrada em um valor que possa melhor ser utilizado pelas etapas seguintes, neste caso de 220 V para 24 V (12 V + 12 V).

A tensão obtida na bobina do secundário do transformador é alternada e a maioria dos circuitos exigem tensões contínuas. Nesse sentido, é necessária a etapa de retificação, que utiliza componentes capazes de conduzir a corrente em um único sentido, os quais foram utilizados diodos retificadores 1N4007 [61].

A tensão após a etapa de retificação, se aplicada a uma carga resistiva, resulta em corrente contínua pulsante e não em corrente contínua constante. Por este motivo é necessária a etapa de filtragem da tensão de saída. Nesse sentido, foram empregados capacitores para filtrar e fornecer uma tensão de saída contínua.

Após as etapas de retificação e filtragem, é necessária a etapa de regulação, pois variações da carga provocam oscilações na tensão de saída. Reguladores de tensão lineares, LM7805 [62] (para tensão positiva) e LM7905 [63] (para tensão negativa), foram utilizados formando uma saída simétrica de +5 V a -5 V. O diagrama elétrico da fonte simétrica é ilustrado na Figura 32.

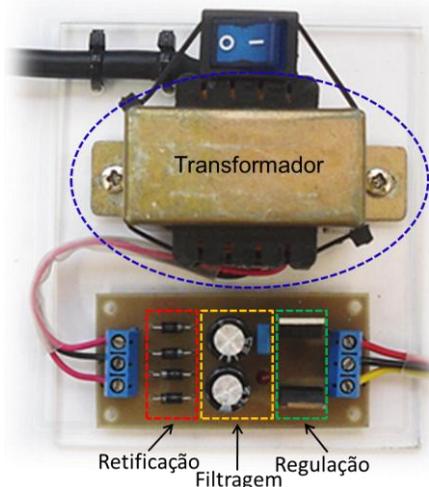
Figura 32: Diagrama elétrico da fonte simétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fonte simétrica foi confeccionada em uma placa de circuito impresso. A montagem final foi realizada sobre uma base de acrílico (Figura 33).

Figura 33: Fonte simétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Osciloscópio

Um osciloscópio Agilent 54621A com dois canais, 60 MHz de largura de banda e 200 MHz de frequência de aquisição foi selecionado para analisar o comportamento dos sinais de transmissão e recepção nas etapas de testes e validação [64].

4.2.5 Demodulador de sinal

O sinal captado pelo EMAT de recepção, após passar pelo pré-amplificador, necessita ser demodulado. Dois módulos, o NI PXI-5442 e o NI PXI-56610, e um *software* auxiliar implementado em ambiente LabVIEW realizaram a demodulação do sinal, o qual pode variar em amplitude de 200 mV a 20 V com frequências de 100 kHz a 2,7 GHz [65][66].

4.3 SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram descritos os módulos e equipamentos utilizados na transmissão e recepção de sinais através da parede metálica. Para facilitar o entendimento, esses componentes foram subdivididos em duas partes. Em um primeiro momento foram descritos os elementos responsáveis pela transmissão de sinais e posteriormente os responsáveis pela recepção e tratamento de sinais.

Para a etapa de transmissão, foi projetado e construído o módulo de amplificação capaz de amplificar em aproximadamente quinze vezes o sinal gerado pelo modulador de sinais, além de fornecer uma corrente máxima de 4 A de pico aos transdutores de transmissão.

Com a avaliação da transmissão, a tarefa fundamental da recepção foi o projeto e construção do pré-amplificador, concebido para amplificar os sinais de interesse (1 MHz) e atenuar os sinais fora da banda de seleção.

Em ambas as etapas de transmissão e recepção foram construídos EMATs em formato de espiral, diferindo apenas na quantidade de voltas e diâmetro do fio.

Além disso, a seleção da fonte MPL-3303, o osciloscópio, a construção da fonte simétrica juntamente com a implementação do *software* em LabVIEW do demodulador de sinais foram descritos e são indispensáveis à realização dos testes.

5 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são descritos os testes e resultados obtidos na validação dos dispositivos de amplificação e pré-amplificação para utilização na comunicação dinâmica. Para que a comunicação dinâmica ocorra é necessário testar e obter resultados positivos nos testes de comunicação estática. Testes com diferentes configurações empregando transdutores EMATs e Piezoelétricos foram realizados. Para avaliar as diferentes configurações, foram realizados testes com as placas de pré-amplificação, selecionando assim, a mais adequada à realização dos testes de comunicação estática e dinâmica.

5.1 AVALIAÇÃO DAS PLACAS DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO

Visando avaliar a amplitude da tensão de saída, nível de ruído e seletividade⁸, testes com as placas de pré amplificação foram realizados. Essa abordagem permite identificar a placa mais adequada à realização dos testes de comunicação.

O método de avaliação consistiu em submeter as entradas de cada uma das quatro placas de pré-amplificação a um sinal de tensão (modulado em amplitude) pré-definido de 0,5 mV (pico a pico) devido ao alto ganho das placas de pré-amplificação.

Para cada placa, dez medições utilizando o osciloscópio (seção 4.2.4) foram realizadas. A Tabela 2 apresenta a média dos níveis máximos da tensão, desvio padrão e ganho das placas.

Tabela 2: Níveis máximos de tensão obtidos na avaliação das placas de pré-amplificação.

Placas	Tensão [V]	Desv. Padrão [V]	Ganho
Placa 1	1,60	0,04	3195
Placa 2	1,30	0,03	2604
Placa 3	1,30	0,02	2602
Placa 4	1,14	0,04	2273

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com intuito de verificar qual placa apresenta a maior média dos níveis de tensão, um teste estatístico, baseado em testes de hipóteses foi realizado [67]. Os resultados desses testes são apresentados na Tabela 3.

⁸ A seletividade neste contexto refere-se à atenuação dos sinais com frequências fora da banda de seleção do filtro.

Tabela 3: Teste de hipóteses para os níveis de tensão.

Placas	Hipóteses	Resultados
Placas 1 e 2	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $H_1: \mu_1 > \mu_2$	A hipótese nula (H_0) foi rejeitada. Assim, o nível de tensão da placa 1 é significativamente maior que a placa 2.
Placas 1 e 3	$H_0: \mu_1 = \mu_3$ $H_1: \mu_1 > \mu_3$	A hipótese nula (H_0) foi rejeitada. Assim, o nível de tensão da placa 1 é significativamente maior que a placa 3.
Placas 1 e 4	$H_0: \mu_1 = \mu_4$ $H_1: \mu_1 > \mu_4$	A hipótese nula (H_0) foi rejeitada. Assim, o nível de tensão da placa 1 é significativamente maior que a placa 4.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 3, pode-se afirmar com um nível de confiança de 95% que a placa 1 possui maior nível de tensão em relação às demais. Com base nos resultados obtidos dos níveis de tensão os testes seguintes serão baseados na avaliação da placa 1 em relação às outras.

Neste contexto, são apresentados na Tabela 4 a média dos níveis máximos do ruído, desvio padrão e a relação sinal ruído para as diferentes placas.

Tabela 4: Níveis máximos de ruído e a relação sinal ruído (SNR) das placas de pré-amplificação.

Placas	Ruído [V]	Desv. Padrão [V]	SNR	SNR [dB]
Placa 1	0,22	0,04	50,48	17,03
Placa 2	0,26	0,05	25,02	13,98
Placa 3	0,18	0,02	49,88	16,98
Placa 4	0,20	0,04	33,92	15,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando verificar se ocorre diferença significativa entre os níveis de ruído da placa 1 em relação às demais, testes de hipóteses foram realizados. Os resultados desses testes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Teste de hipóteses para os níveis de ruído.

Placas	Hipóteses	Resultados
Placas 1 e 2	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$	A hipótese nula (H_0) não foi rejeitada. Assim, os ruídos das placas 1 e 2 podem ser iguais.
Placas 1 e 3	$H_0: \mu_1 = \mu_3$ $H_1: \mu_1 \neq \mu_3$	A hipótese nula (H_0) foi rejeitada. Assim, os ruídos das placas 1 e 3 são diferentes.
Placas 1 e 4	$H_0: \mu_1 = \mu_4$ $H_1: \mu_1 \neq \mu_4$	A hipótese nula (H_0) foi rejeitada. Assim, os ruídos das placas 1 e 4 são diferentes.

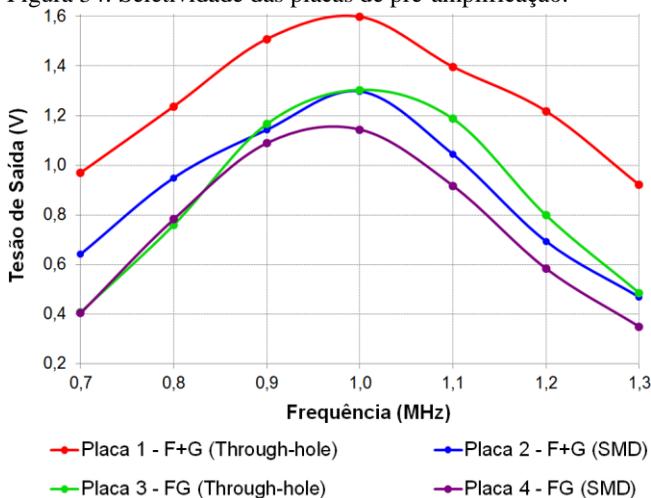
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 5, pode-se afirmar que existe diferença entre os níveis de ruído da placa 1 em relação às placas 3 e 4. Apesar dessas

diferenças, observa-se na Tabela 4 que a placa 1 apresenta uma relação sinal ruído ligeiramente maior.

Para avaliação da seletividade, a frequência do sinal de entrada das placas foi variada, em intervalos pré-definidos de (100 em 100) kHz (Figura 34).

Figura 34: Seletividade das placas de pré-amplificação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 34, observa-se que a frequência central das placas confeccionadas apresentam-se centralizadas em 1 MHz cumprindo os requisitos do projeto.

Com base nos resultados obtidos na avaliação das placas de pré-amplificação, a placa 1 foi escolhida para realização da avaliação da eficiência das diferentes configurações, bem como a realização dos testes de comunicação.

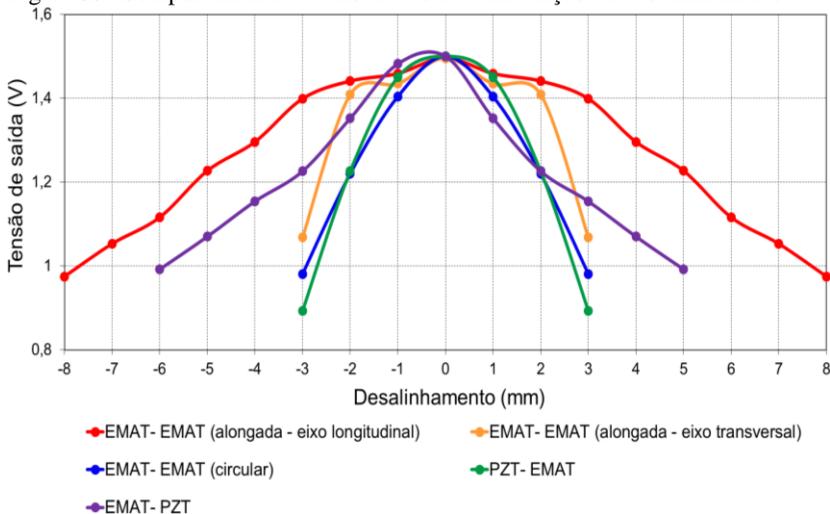
5.2 AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

A avaliação das configurações com diferentes transdutores foi necessária para identificar as combinações mais eficientes à realização dos testes de comunicação. A eficiência, neste contexto, está relacionada à potência do sinal elétrico aplicado ao transdutor de emissão necessária para atingir um nível de tensão pré-definido de 1,5 V na recepção. Nesse sentido, quanto menor a potência aplicada na emissão melhor (mais eficiente) é a configuração avaliada.

Para a realização dos testes foi necessário alinhar os transdutores de emissão e recepção. Para garantir o ponto de máxima captação de sinal, o transdutor de emissão foi fixado sob a chapa metálica e o transdutor de recepção foi movimentado manualmente em ambas as direções (longitudinal e transversal) sobre uma matriz graduada com incremento de 1 mm, colada sobre a chapa metálica.

A Figura 35 ilustra o comportamento da tensão de saída da placa de pré-amplificação para as diferentes configurações com desalinhamentos de (1 em 1) mm.

Figura 35: Comportamento da tensão de saída em função do desalinhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 35 que as configurações EMAT - EMAT (alongada - eixo longitudinal) e EMAT - PIEZO são menos sensíveis ao desalinhamento quando comparadas às demais.

Os EMATs de transmissão e recepção utilizados na configuração EMAT - EMAT (alongada) apresentam as mesmas quantidades de voltas que os EMATs circulares, 19 voltas para a transmissão e 300 voltas para a recepção [56]. O alinhamento permitiu a aquisição do nível de tensão de 1,5 V para as diferentes configurações. Para o cálculo do nível de potência aplicado à transmissão, foram efetuadas medições prévias da impedância de cada transdutor de emissão.

O cálculo do nível de potência aplicado ao transdutor de emissão para cada configuração foi efetuado segundo a lei de Ohm, utilizando os valores médios de tensão aplicada à transmissão e impedância. Os

valores de impedância, tensão pico a pico e potência RMS aplicada para cada configuração são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de impedância, tensão e potência.

Configuração	Impedância [Ω]	Tensão [V]	Potência [W]
EMAT - EMAT (alongado)	11,8	50,0	26,5
EMAT - EMAT (circular)	5,5	16,8	6,4
EMAT (circular) - Piezo	5,5	3,2	$232,7 \times 10^{-3}$
PIEZO - EMAT (circular)	97,8	3,2	$13,1 \times 10^{-3}$
PIEZO - PIEZO	97,8	$129,7 \times 10^{-3}$	$21,5 \times 10^{-6}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 apresenta como configuração mais eficiente a PIEZO - EMAT (circular), na qual foi necessário aplicar apenas 13,1 mW na transmissão de sinal para se atingir o nível de 1,5 V pré-estabelecido para recepção.

A presença da configuração PIEZO - PIEZO na Tabela 6 serve apenas para efeito de comparação com as demais, sobre esta configuração é válido ressaltar que não pode ser empregada na comunicação dinâmica, pois os transdutores piezoelétricos necessitam de acoplamento com a superfície do material.

5.3 AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO ESTÁTICA

A comunicação estática é uma importante etapa para o sucesso da comunicação dinâmica. Neste contexto, o teste de comunicação estática tem como objetivo avaliar a taxa de transferência de dados para as configurações EMAT - EMAT (circular) e Piezo - EMAT (circular). Os critérios para a seleção dessas configurações, foram a eficiência (seção 5.2), a viabilidade para comunicar dinamicamente e a facilidade de implementação.

O protocolo para comunicação implementado em *software* LabVIEW possui um total de 20 bits, onde os 8 primeiros correspondem ao início da mensagem (preâmbulo), os 8 bits subsequentes à mensagem transmitida e o 4 bits finais à checagem de erros (Tabela 7).

Tabela 7: Protocolo de comunicação.

PREÂMBULO	MENSAGEM	CRC
1 0 1 0 1 0 1 0	0 0 1 0 1 1 0 1	1 1 1 0

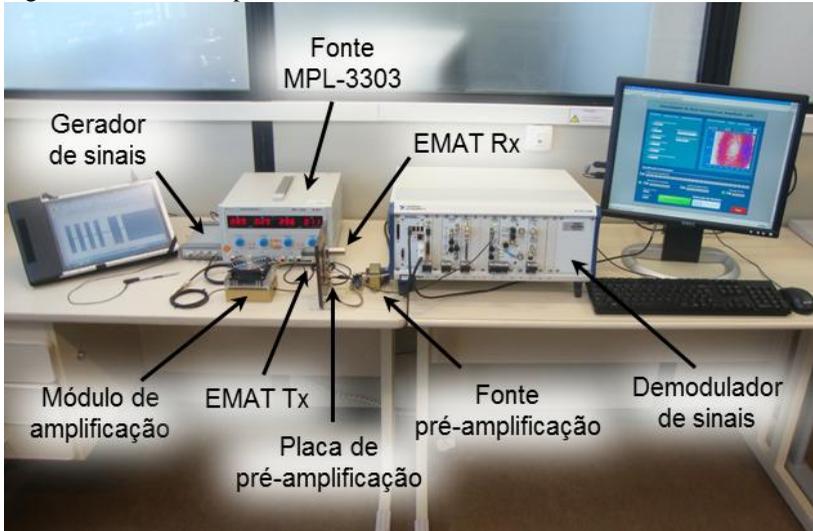
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para iniciar os testes, os transdutores de emissão e recepção foram alinhados (seção 5.2). Após a etapa de alinhamento, o processo de transmissão de dados através da parede metálica foi iniciado.

Ao longo do processo de transmissão, ecos no canal de recepção foram identificados. Além disso, verificou-se o problema de *loop* de terra devido à interconexão entre a referência dos módulos do sistema PXI e o ponto de aterramento (tomada da rede elétrica).

A solução encontrada para o problema do *loop* de terra foi a utilização do gerador de funções Agilent U2761A [68] para geração do sinal modulado, ficando o sistema PXI dedicado para demodulação. A utilização de códigos com diferentes ciclos por símbolo⁹ auxiliou na minimização do efeito dos ecos observados no canal de comunicação. Com isso, reduziu-se a relação entre os ecos e os níveis de sinal do bit zero (da modulação ASK em que o nível de sinal é o próprio nível de ruído), facilitando a demodulação do sinal. A bancada utilizada nos testes de comunicação estática é ilustrada na Figura 36.

Figura 36: Bancada experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos na comunicação estática com a utilização das configurações PIEZO - EMAT (circular) e EMAT - EMAT (circular) e suas respectivas taxas de transferência.

⁹ Ciclos por símbolo neste contexto referem-se ao número de ciclos de um sinal senoidal utilizado para representar um único bit.

Tabela 8: Resultados obtidos na comunicação estática.

Configuração	Ciclos por símbolo	Taxa de transferência ¹⁰ [kb/s]
EMAT - EMAT (circular)	12	81
	15	68
PIEZO - EMAT (circular)	9	29
	12	92
	15	71

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta como melhores resultados os obtidos com códigos implementados com 12 ciclos por símbolo. Como esperado, acima de 12 ciclos por símbolo, a taxa decai devido à necessidade de um tempo maior de comunicação. O decaimento também foi observado com 9 ciclos na configuração PIEZO - EMAT (circular), esse decaimento pode ser explicado devido à interferências provocadas pelos ecos. Os dados obtidos na comunicação estática foram de fundamental importância para a validação do módulo de demodulação de sinais, além de um importante passo para a comunicação dinâmica.

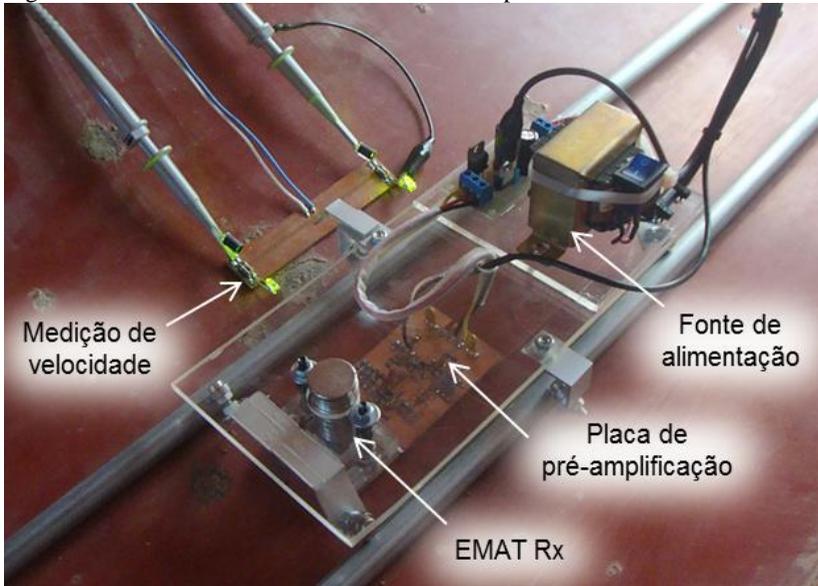
5.4 AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO DINÂMICA

Para avaliar a comunicação dinâmica quanto à velocidade média e número de pacotes recebidos¹¹, foi utilizado um tubo com 8,5 mm de espessura e 610 mm (24”) de diâmetro. Um carrinho foi construído para realizar a movimentação (Figura 37) para completar a bancada experimental (Figura 36). O EMAT Rx, a placa de pré-amplificação e a fonte de alimentação foram fixados no carrinho.

¹⁰ Tradução do inglês para “*baud rate*”.

¹¹ Pacotes recebidos, neste contexto referem-se aos 20 bits transmitidos (preâmbulo + mensagem + checagem de erros).

Figura 37: Sistema de deslocamento montado na parte interna do tubo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A inclinação do tubo foi realizada para movimentar o carrinho e duas guias (perfil circular) fixadas no tubo, o direcionavam pelo percurso. Diferentes inclinações do tubo foram realizadas, visando obter velocidades distintas para o carrinho.

A medição da velocidade foi realizada com a utilização de um dispositivo construído com dois fotodiodos (que detectavam a passagem do carrinho) espaçados por uma distância conhecida. Na passagem do carrinho, dois pulsos de tensão consecutivos eram capturados pelo osciloscópio. O tempo entre pulsos e a distância entre os fotodiodos permitiram o cálculo da velocidade média do carrinho na região de comunicação.

A avaliação foi aplicada para as configurações EMAT - EMAT (circular) e PIEZO - EMAT (circular). Os ecos no canal de transmissão foram minimizados com a mesma técnica empregada na seção 5.3. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para as duas configurações testadas.

Tabela 9: Resultados obtidos na comunicação dinâmica.

Configuração	Velocidade máxima [m/s]	Ciclos por símbolo	Pacotes recebidos
EMAT - EMAT (circular)	0,85	9	12
PIEZO - EMAT (circular)	2,00	12	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dispositivos de amplificação e pré-amplificação foram validados com sucesso na comunicação dinâmica. A configuração PIEZO - EMAT (circular) se mostrou mais eficiente, comunicando a uma velocidade superior a EMAT - EMAT (circular).

A configuração PIEZO - EMAT (circular) apresentou melhores resultados por oferecer uma distância de comunicação superior (desalinhamento entre Tx e Rx), aproximadamente 47 mm para PIEZO - EMAT (circular) e 10 mm para EMAT - EMAT (circular) devido a diferenças construtivas. Outro fator que contribuiu para os resultados foi a maior eficiência de transdução da configuração PIEZO - EMAT (circular), que melhorou a relação sinal ruído (seção 5.1).

5.5 SÍNTESE DO QUINTO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram descritos os métodos utilizados para avaliar os dispositivos responsáveis pela transmissão de dados. Testes iniciais foram efetuados para selecionar uma das quatro placas de pré-amplificação quanto à seletividade, nível de amplificação e ruído.

Os ecos identificados no canal de comunicação foram minimizados utilizando códigos com diferentes números de ciclos por símbolo. O problema do *loop* de terra entre módulos e o ponto de aterramento (tomada da rede elétrica) foi resolvido utilizando o gerador de funções Agilent U2761A para modular o sinal de transmissão.

Os testes realizados na comunicação estática foram importantes para a validação do módulo de demodulação de sinais. Além disso, serviu de base para a realização dos testes de comunicação dinâmica.

Testes de comunicação dinâmica foram realizados com sucesso, e os dispositivos de amplificação e pré-amplificação foram validados. A configuração PIEZO - EMAT (circular) se mostrou mais eficiente, comunicando a uma velocidade máxima de 2 m/s, enquanto que a configuração EMAT - EMAT (circular) permitiu a comunicação à velocidade máxima de 0,85 m/s.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do recente crescimento do segmento de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil, a comunicação através de barreiras metálicas é uma importante alternativa para o monitoramento das condições de operação de dutos. Neste contexto, o presente trabalho propôs o desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicação por ultrassom através de paredes metálicas. Para a transmissão de sinais foi projetado e construído um módulo de amplificação e para a recepção foram desenvolvidas quatro placas de pré-amplificação. A avaliação e a validação desses dispositivos desenvolvidos foram realizadas empregando diferentes combinações de transdutores EMATs e piezoelétricos. Além disso, foram avaliadas a comunicação estática e a comunicação dinâmica.

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam que a principal vantagem dos transdutores piezoelétricos está relacionada à eficiência na transdução do sinal quando comparado aos EMATs. Enquanto que os transdutores acústicos eletromagnéticos permitem a transmissão de dados de forma dinâmica (sem a necessidade de contato com o meio de propagação).

A eficiência de conversão do sinal elétrico em sinal acústico pelos EMATs de transmissão é baixa, quando comparada aos transdutores piezoelétricos. Da mesma forma, a eficiência de transdução observada nos EMATs de recepção é baixa, onde os níveis de tensão convertidos (de ultrassom para sinais elétricos) são da ordem de microvolts (menor do que o próprio ruído). Nesse sentido, foi indispensável a construção de circuitos específicos para amplificação e pré-amplificação de sinais.

Objetivando aumentar o nível de sinal gerado na transmissão, um módulo de amplificação foi construído. Na construção deste elemento foi utilizado o amplificador operacional Apex Microtechnology, modelo PA119CE, com alta capacidade de tensão e corrente de saída, configurado como amplificador inversor com ganho de aproximadamente quinze vezes.

Para a recepção de sinais foram construídas quatro placas de pré-amplificação capazes de aumentar a relação sinal ruído, tornando o sinal identificável aos elementos responsáveis pela aquisição de sinais. Na

construção das placas de pré-amplificação, foram utilizados amplificadores de instrumentação com alta impedância de entrada (para reduzir o efeito de divisor de tensão) e amplificadores operacionais (para implementar filtros passa faixa de quarta ordem para atenuar sinais presentes fora da banda de seleção).

Além do módulo de amplificação e das placas de pré-amplificação, transdutores EMATs para transmissão e recepção de sinais foram construídos, enquanto que transdutores piezoelétricos comerciais foram utilizados. Dessa forma, foi possível realizar os testes com diferentes configurações de transmissão-recepção.

Para avaliar as diferentes configurações, foi necessário testar e selecionar uma placa de pré-amplificação. A placa de pré-amplificação 1, com estágio de ganho independente a filtragem e montada com componentes *through hole*, foi selecionada para a realização dos testes de comunicação, por apresentar o maior ganho em relação às demais.

A realização de testes com diferentes configurações para efeito de comparação foi efetuada, uma vez que cada tipo de transdutor apresenta vantagens próprias relevantes em relação à comunicação. Como esperado, configurações empregando apenas transdutores Piezoelétricos apresentaram resultados mais eficientes que as com transdutores EMATs. Entretanto, na comunicação dinâmica, é necessária a utilização de configurações EMAT - EMAT ou mistas (com a combinação de transdutores EMATs e Piezoelétricos), pois permitem o movimento relativo entre transdutores. A avaliação das diferentes configurações foi realizada para identificar as configurações mais promissoras à realização dos testes de comunicação.

Os testes com a transferência de dados estática foram importantes para validação do demodulador de sinais. Com os resultados obtidos foi possível transmitir dados através da parede metálica para as configurações EMAT - EMAT (circular) com 81 kb/s e PIEZO - EMAT (circular) com 92 kb/s. Além disso, serviu de base para a realização dos testes de comunicação dinâmica.

Na comunicação dinâmica, a configuração PIEZO - EMAT (circular) também se mostrou mais eficiente, comunicando a uma velocidade de 2 m/s, enquanto que a configuração EMAT - EMAT (circular) permitiu a comunicação à velocidade de 0,85 m/s. A melhor eficiência da configuração PIEZO - EMAT (circular) pode ser explicada devido principalmente a uma maior relação sinal ruído quando comparada com a EMAT - EMAT (circular).

Com o sucesso da comunicação dinâmica, os dispositivos de amplificação e pré-amplificação construídos foram validados, atingindo assim o objetivo deste trabalho.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As configurações utilizando transdutores ultrassônicos EMATs e Piezoelétricos se mostraram bastantes promissoras na comunicação através de paredes metálicas. Entretanto, estudos a respeito de melhorias dos módulos de amplificação e pré-amplificação e até mesmo a realização de ensaios com novas técnicas de modulação de sinais se fazem necessários. Para isso, os seguintes tópicos são sugeridos como recomendações para trabalhos futuros:

- Testar outros tipos de modulação (fase e frequência);
- Pesquisar e implementar outras técnicas de modulação de sinais, e.g., QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*;
- Testar a comunicação com o EMAT de transmissão em movimento;
- Projetar e construir uma fonte para alimentar o módulo de amplificação capaz de fornecer maiores níveis de tensão e corrente (níveis máximos permitidos - PA119CE);
- Construir um novo módulo capaz de fornecer níveis maiores de tensão para alimentar o transdutor de emissão e, conseqüentemente, aumentar a amplitude do sinal acústico gerado no material metálico.

REFERÊNCIAS

- [1] ZANGL, H. et al., **An investigation on wireless communication and power supply through metal tank walls.** In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, (IMTC 2008). Canada. may. 2008. p. 1452-1457.
- [2] CORRER, C. J., et al. **Aplicação “IN SITU” de surfactantes em solo contaminado com petróleo e tratamento da água residual com agente oxidante.** In: 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (4º PDPETRO). Brasil. oct. 2007. p. 1-10.
- [3] ROITMAN, M., PHILIPPI, A. **Proposta de um sistema de gestão ambiental para o porto de Santos,** In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil. dec. 2000. p. 1-9.
- [4] GRAHAM, D. J.; NEASHAM, J. A.; SHARIF, B. S. **High Bit Rate communication through metallic structures using electromagnetic acoustic transducers.** In: OCEANS 2009 - EUROPE, Germany. mar. 2009. p. 1-6.
- [5] HOSMAN, T. et al. **Multi-tone FSK for ultrasonic communication.** In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, (I2MTC 2010). USA. may. 2010. p. 1424-1429.
- [6] ZANGL, H. et al., **Wireless communication and power supply strategy for sensor applications within closed metal walls.** *IEEE International Transactions Instrumentation and Measurement*, v. 59, n. 6, p. 1686-1692, 2010.
- [7] TALUKDAR, K. **Development of a new acoustic communication technology for ballast water exchange compliance.** In: MTS/IEEE OCEANS, 2005. USA. sep. 2005. p 1-6.
- [8] SARKIS, C. D. **Blindagem Eletromagnética.** Trabalho acadêmico (Disciplina Teoria de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000. 4 p.

- [9] BASTOS, J. P. A. **Eletrromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. 3^a ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004. 398 p.
- [10] COSTA, E. M. M. **Eletrromagnetismo - Teoria, Exercícios e Experimentos Práticos**. 1^a ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2009. 488 p.
- [11] CAVACO, M. A. M.; BENEDET, M. E.; SCHMITZ, C. R.; PROBST, G. M. **Comunicação sem fio através de paredes metálicas por meio de ultrassom**. In: VII CONGRESSO RIO AUTOMAÇÃO. Brasil, maio 2013.
- [12] ASHER, R. C. **Ultrasonic Sensors for Chemical and Process Plant**. 1st ed. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 1997. 473 p.
- [13] SHOUDY, D. A. et al. **An ultrasonic through-wall communication system with power harvesting**. In: IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, USA. oct. 2007. p. 1848-1853.
- [14] GRAHAM, D. J.; NEASHAM, J. A.; SHARIF, B. S. **Investigation of methods for data communication and power delivery through metals**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 10, p. 4972-4980, 2011.
- [15] SÓ FÍSICA. **Som e sua propagação**. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica/som.php>. Acesso em: 20/05/2013.
- [16] GALLEGO-JUAREZ, J. A. **Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers**. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989.
- [17] OLYMPUS - NDT. **Ultrasonic transducers for nondestructive testing**, 2009.
- [18] YANG, Z.; YE, P. **Design of electromagnetic acoustic transducer for Wheel flaw detection**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANIC AUTOMATION AND CONTROL ENGINEERING (MACE), China. jun. 2010. p. 2501-2504.
- [19] da Cunha, M.P.; Jordan, J. W. **Improved longitudinal EMAT transducer for elastic constant extraction**. In: IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM AND EXPOSITION, Canada. aug. 2005. p. 426-432.

- [20] XU D.; HONG B. A.; XINJUN W. U.; Lingsong H. E. **Lift-off performance of receiving EMAT transducer enhanced by voltage resonance.** In: 18th WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING. South Africa. apr. 2012. p. 1-6.
- [21] JIAN X.; DIXON S.; EDWARDS R. S.; MORRISON J. **Coupling mechanism of an EMAT.** *Ultrasonics*, v. 44, n 1, p 653-656, dec. 2006
- [22] PRIMERANO, R. et al. **Echo-cancellation for ultrasonic data transmission through a metal channel.** In: 41st ANNUAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCES AND SYSTEMS, (CISS '07). USA. mar. 2007. p. 841-845.
- [23] PRIMERANO, R.; KAM, M.; DANDEKAR, K. **High bit rate ultrasonic communication through metal channels.** In: 43rd ANNUAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCES AND SYSTEMS, (CISS 2009). USA. mar. 2009. p. 902-906.
- [24] OLYMPUS. **Ultrasonic transducers technical notes**, 2009.
- [25] MANSUKHANI, A. **Wireless digital modulation.** *Applied Microwave and Wireless*, v. 8, n. 4, p. 28-36, dec. 1996.
- [26] GLOVER, I. A.; GRANT, P. M. **Digital Communication.** 3rd ed. Canada: Pearson Education Canada, 2009. 1072 p.
- [27] LI, C.; HUTCHINS, D. A.; GREEN, R. J. **Short-range ultrasonic digital communications in air.** *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 55, n. 4, p. 908-918, apr. 2008.
- [28] KORN, I. **Effect of pulse shaping and transmitter filter on the performance of FSK-DPD and CPM-DPD in satellite mobile channel.** *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. v. 13, n. 2, p. 245-249, aug. 2002.
- [29] NORTHROP, R. B. **Analysis and applications of analog electronic circuits to biomedical instrumentation.** 2nd ed. Washington D.C., USA: CRC Press, 2004. 538 p.
- [30] RAZAVI, B. **Fundamentals of microelectronics.** 1st ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2004. 960 p.
- [31] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica.** 1^a ed. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill, 1995. 505 p.

- [32] SEABRA, A. C.; LOPES, R.; KOFUJI, S. T. . **Eletrônica Experimental**. Apostila do curso de Engenharia de Sistemas Elatrônicos. São Paulo: USP,1999.
- [33] GAYAKWAD R. A. **Op-amps and linear integrated circuits**. 4th ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2009. 543 p.
- [34] HAYT, W. H. Jr.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. **Análise de circuitos em engenharia**. 7^a ed. Porto Alegre, Brasil: McGraw-Hill, 2008. 858 p.
- [35] CARTER B.; BROWN T. R. **Handbook of operational amplifier applications**. 1^a ed. Dallas, USA: Texas Instruments Incorporated, 2001. 94 p.
- [36] THEDE, L. **Practical analog and digital filter design**. 1st ed. Norwood, USA: Artech House, Inc., 2004. 277 p.
- [37] ALCIATORE, D. G.; HISTAND M. B. **Mechatronics and measurements systems**. 4th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2012. 553 p.
- [38] NUWER, M. R. et al. **IFCN Standards for digital recording of clinical EEG**. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. v.106, n. 3, p. 259-261, mar. 1998.
- [39] TAVARES, M. C. **Monitor de atividade cerebral baseado em microcontrolador**. 1997. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1997.
- [40] PRUTCHI, D.; NORRIS, M. **Design and development of medical electronic instrumentation: A practical perspective of the design, construction, and test of medical devices**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, 264 p.
- [41] KITCHIN, C.; COUNTS, L. **A designer's guide to instrumentation amplifiers**. 3rd ed. Massachusetts, USA: Analog Devices, Inc., 2004. 130 p.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. **Precision, low power instrumentation amplifiers - INA128UA**, 2005.
- [43] WEBSTER, J. G. **Medical instrumentation: Application and design**. 3rd ed. New York, USA: Wiley, 1998. 712 p.

- [44] NOCETI-FILHO, S. **Filtros seletores de sinais**. 3^a ed. Florianópolis, Brasil: Editora da UFSC, 2010. 321 p.
- [45] PAARMANN, L. D. **Design and analysis of analog filters: A signal processing perspective**. New York, USA: Kluwer Academic Publishers, 2003. 436 p.
- [46] CARTER, B.; MANCINI R. **Op amps for everyone**. 3rd ed. Burlington, USA: Newnes, 2009. 609 p.
- [47] WINDER, S. **Analog and digital filter design**. 2nd ed. Norwood, USA: Newnes, 2002. 450 p.
- [48] NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é o PXI**. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/4811/pt/>. Acesso em: 18/07/2013.
- [49] NATIONAL INSTRUMENTS. **2.53 GHz dual-core embedded controller for PXI - NI PXI 8108**, 2009.
- [50] NATIONAL INSTRUMENTS. **100 MS/s, 16-bit arbitrary waveform generator with onboard signal processing - NI PXI 5441**, 2005.
- [51] NATIONAL INSTRUMENTS. **2.7 GHz upconverter - NI PXI 5610**, 2004.
- [52] APEX MICROTECHNOLOGY. **Video power operational amplifier - PA119CE**, 2012.
- [53] TEXAS INSTRUMENTS. **Three - Terminal Adjustable Regulator - LM317**, 2012.
- [54] MINIPA. **Manual de instruções - MPL3003**. São Paulo, Brasil: Minipa do Brasil, 2006. 16 p.
- [55] AGILENT TECHNOLOGIES. **Precision impedance analyzer - Agilent 4294A**, 2008.
- [56] PROBST, G. M. **Avaliação das características construtivas de transdutores acústicos eletromagnéticos para comunicação através de paredes metálicas**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.
- [57] TEXAS INSTRUMENTS. **350 MHz low-noise high-speed - THS4022**, 2007.

- [58] NOCETI-FILHO, S. **Dúvida sobre de filtros seletores de sinais.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <crc@labmetro.ufsc.br> em 11 de setembro de 2012.
- [59] CAVACO, M. A. M.; BENEDET, M. E.; SCHMITZ, C. R.; PROBST, G. M. **Desenvolvimento de um sistema de comunicação através de paredes metálicas.** In: 12^a CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ). Brasil, jun. 2013.
- [60] BRAGA, C. N. **Fontes de alimentação.** 1^a ed. São Paulo, Brasil: NCB, 2013. 240 p. v.1.
- [61] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **1N4001 - 1N4007 General purpose rectifiers**, 2009.
- [62] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **LM78XX / LM78XXA 3-Terminal 1 A positive voltage regulator**, 2013.
- [63] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **LM79XX / KA78XXA / LM79XXA 3-Terminal 1 A negative voltage regulator**, 2013.
- [64] AGILENT TECHNOLOGIES. **User's guide - Agilent 54621A oscilloscope.** USA: Agilent Technologies Inc., 2002. 276 p.
- [65] NATIONAL INSTRUMENTS. **100 MS/s, 14-bit digitizers for communications - NI PXI 5142**, 2010.
- [66] NATIONAL INSTRUMENTS. **2.7 GHz RF vector signal analyzer with digital downconversion - NI PXI 5661**, 2006.
- [67] MONTGOMERY D. C.; RUNGER G C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 5^a ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2013. 521 p.
- [68] AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent U2761A USB modular function/arbitrary waveform**, 2013.