

Universidade Federal de
Santa Catarina

Programa de Pós-
Graduação em
Engenharia Mecânica

www.posmec.ufsc.br

Campus Universitário
Trindade

Florianópolis- SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica na área
de concentração em Metrologia e
Instrumentação da Universidade Federal de
Santa Catarina, como requisito para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

Coorientador: Mauro Eduardo Benedet

Florianópolis, 2013

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE TRANSDUTORES ACÚSTICOS
ELETROMAGNÉTICOS PARA COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS - Gabriel Maurício Probst

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE TRANSDUTORES ACÚSTICOS ELETROMAGNÉTICOS PARA COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS

Gabriel Maurício Probst

Neste novo âmbito em que o Brasil se encontra, onde tecnologias para a indústria de petróleo e gás estão bastante requisitadas. Esta dissertação visa contribuir com o estudo das características construtivas de transdutores EMAT, que acoplados a pontos específicos da tubulação, e também, aos PIGs, agilizarão o processo de manutenção dos dutos transportadores de produtos, tais como o petróleo e o gás natural.

Orientador:

Prof. Marco Antonio
Martins Cavaco, Ph. D

Coorientador:

Mauro Eduardo
Benedet



Gabriel Maurício Probst

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE
TRANSDUTORES ACÚSTICOS ELETROMAGNÉTICOS PARA
COMUNICAÇÃO 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. Ph. D. Marco Antonio
Martins Cavaco

Florianópolis
2013

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

Probst, Gabriel Maurício
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE
TRANSDUTORES ACÚSTICOS ELETROMAGNÉTICOS PARA COMUNICAÇÃO
ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS / Gabriel Mauricio Probst ;
orientador, Marco Antonio Martins Cavaco ; co-orientador,
Mauro Eduardo Benedet. - Florianópolis, SC, 2013.
86 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. transdutores acústicos
eletromagnéticos (EMATs). 3. sinal acústico ultrassônico.
4. oleodutos. 5. manutenção preventiva. I. Cavaco, Marco
Antonio Martins . II. Benedet, Mauro Eduardo. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Gabriel Maurício Probst

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE
TRANSDUTORES ACÚSTICOS ELETROMAGNÉTICOS PARA
COMUNICAÇÃO 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.

Florianópolis, 24 de Setembro de 2013.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

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

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

Matias Roberto Viotti, Dr. Ing.
Photonita

Dedico este trabalho a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram, seja com conhecimento ou companheirismo, para o desenvolvimento deste projeto de dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram, seja com conhecimento ou companheirismo, para o desenvolvimento deste projeto de dissertação.

RESUMO

Metodologias de prevenção a acidentes em oleodutos são bastante procuradas por empresas que trabalham no ramo do petróleo e gás. Hoje, a prevenção contra acidentes é feita principalmente com a ajuda de equipamentos denominados PIGs (*Pipeline Inspection Gauges*), que percorrem o trajeto feito pelo produto transportado procurando por falhas estruturais nas paredes das tubulações. Porém, os dados coletados por este método são tratados apenas de maneira *off-line*, após a remoção do PIG da tubulação. No intuito de tornar o processo de prevenção contra acidentes mais rápido e dinâmico, o presente trabalho propõe o estudo das características construtivas de transdutores acústicos eletromagnéticos (EMATs – *Electromagnetic Acoustic Transducers*), que acoplados a pontos específicos das tubulações, e também aos PIGs, agilizarão o processo de detecção de falhas e de manutenção das tubulações, pois permitirão uma maior rapidez na coleta e tratamento dos dados adquiridos pelos PIGs. Este tipo de transdutor é composto por uma bobina, alimentada alternadamente, e um ímã, que fornece um campo magnético estático. A interação entre corrente de *Foucault*, gerada pela bobina na parede da tubulação, e o campo magnético estático induz na parede metálica ondas ultrassônicas de intensidade proporcional à corrente aplicada na bobina e ao campo magnético incidente na superfície do material. Uma série de testes foram realizados para verificar a influência da espessura da trilha da bobina do transdutor para geração do sinal ultrassônico, bem como, a distância entre trilhas, a corrente aplicada, a quantidade de campo magnético, o *lift-off* (distância do transdutor à parede metálica) e o desalinhamento entre emissor/receptor. Os resultados dos testes são apresentados em forma de gráficos, que de maneira simples ilustram a influência de cada variável para geração do sinal acústico. Também são apresentados resultados de testes realizados com transdutores que compartilham diferentes tipos de ondas, longitudinal/transversal, onde a realização da comunicação se mostrou viável.

Palavras chave: oleodutos, manutenção preventiva, PIGs, transdutores EMATs, sinal ultrassônico.

ABSTRACT

Methodologies to prevent accidents in oil pipelines are very searched by oil and gas companies. Currently, the preventive measures against accident are specially carried out with equipment named PIGs (Pipeline Inspection Gauges), which go through the way of the transported product looking for structural damages on the pipe walls. However, the data gathered by this method are only analyzed in an off-line manner, i.e., after removing the PIG from pipe. Therefore, in order to make the process to prevent accident faster and more dynamic, this paper aims to study the constructive characteristics of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) that, once connected to both specific parts in the pipes and PIGs, will improve the process to detect fails and repair the pipes. Such transducer is composed of an AC coil and a magnet (which provides a static magnetic field). The interaction between the eddy current, generated by the coil on the pipe wall, and the static magnetic field induces ultrasound waves on the metallic walls of proportional intensity to the current applied to both coil and magnetic field around the material surface. Several tests were carried out to verify the influence of the transducer coil thickness path in order to generate an ultrasound signal, as well as the distance among the paths, the applied current, the magnetic field strength, the lift-off, and the misalignment of transmitter and receiver. The test outcomes are presented in graphic representation clearly showing the influence of each variant to the acoustic signal generation. There is also the presentation of outcomes related to tests carried out with transducers sharing different types of waves (longitudinal/transversal), in which the communication was viable.

Keywords: pipeline, prevent accident, PIGs, EMATs, acoustic signal.

Lista de Figuras

Figura 1: Proposta de aplicação com o desenvolvimento desta dissertação.	20
Figura 2: Configuração básica de um transdutor acústico eletromagnético, onde, B representa o campo magnético estático gerado pelo imã, i a corrente que circula pelo fio condutor e fl à força de <i>Lorentz</i> resultante da interação entre o campo magnético estático e a corrente de <i>Foucault</i> induzida.	26
Figura 3: Alinhamento do domínio magnético na estrutura do material ferromagnético na presença de um campo magnético externo (B).	27
Figura 4: Configurações de transdutores EMAT. (a) configuração do tipo bobina espiral, (b) configuração do tipo espiral alongada.	28
Figura 5: Configurações de transdutores EMAT. (a) configuração do tipo onda longitudinal, (b) configuração do tipo bobina de meandro.	29
Figura 6: Modelo clássico do elétron em órbita.	30
Figura 7: Exemplificação dos domínios magnéticos da magnetita.	31
Figura 8: Regra da mão direita.	32
Figura 9: Magnetostricção, a) corresponde ao material acima da temperatura de Curie, b) corresponde a uma magnetostricção espontânea e c) a uma magnetostricção forçada.	34
Figura 10: <i>P-wave</i> (onda longitudinal).	36
Figura 11 <i>S-wave</i> (onda cisalhante).	37
Figura 12: <i>SH-wave</i> (onda cisalhante polarizada horizontalmente).	38
Figura 13: <i>Rayleigh-wave</i>	38
Figura 14 Modelos de bobinas desenvolvidos. Em a) bobina de meandro, b) bobina circular e c) bobina circular alongada.	41
Figura 15: Correntes induzidas de <i>Foucault</i> na superfície do espécime.	42
Figura 16: Distância entre trilhas para bobinas em formato de meandro. ..	43
Figura 17: Exemplificação da força de <i>Lorentz</i> para as bobina confeccionadas.	44
Figura 18: Exemplificação da magnetostricção para as bobinas confeccionadas.	45
Figura 19: Sentido da força de <i>Lorentz</i> para as bobinas desenvolvidas.	45
Figura 20: Esquema para casamento de impedâncias.	46
Figura 21: Exemplo de casamento de impedância, bobina emissora.	47
Figura 22: Exemplo de casamento de impedância, bobina receptora.	47
Figura 23: Exemplo dos modelos de bobinas emissoras confeccionadas. ...	48
Figura 24: Exemplo dos modelos de bobinas receptoras confeccionadas. .	48
Figura 25: Comportamento da impedância em relação <i>lift-off</i> para bobinas EMAT.	50

Figura 26: Gráfico da largura da pista por corrente aplicada para espessura do cobre de 35 μm .	52
Figura 27: Bancada utilizada para os testes de avaliação das características construtivas dos transdutores EMAT desenvolvidos.	55
Figura 28: Vista detalhada do sistema de comunicação.	56
Figura 29: Bobina em meandro de recepção desenvolvida.	57
Figura 30: Anulação do ultrassom pela bobina em meandro.	57
Figura 31: Exemplo do sinal ultrassônico captado pela bobina circular.	59
Figura 32: Campo magnético produzido pela bobina.	60
Figura 33: Gráfico da avaliação das características construtivas das bobinas circulares.	61
Figura 34: Gráfico da avaliação das características construtivas das bobinas circulares alongadas.	61
Figura 35: Bobina circular e circular alongada, fabricadas com fio de cobre 27 AWG.	62
Figura 36: Gráfico da análise da influência do campo magnético estático quanto à geração do sinal acústico, bobina circular.	63
Figura 37: Gráfico da análise da influência do campo magnético estático quanto à geração do sinal acústico, bobina circular alongada.	63
Figura 38: Intensidade do campo magnético em relação à distância da partícula.	64
Figura 39: Decaimento do sinal acústico na emissão com o aumento do <i>lift-off</i> .	66
Figura 40: Gráfico da análise da variação do <i>lift-off</i> quanto à geração do sinal acústico bobina circular.	66
Figura 41: Gráfico da análise da variação do <i>lift-off</i> quanto à geração do sinal acústico para bobina circular alongada.	67
Figura 42: Captação do sinal ultrassônico pela bobina receptora.	68
Figura 43: Gráfico da análise da quantidade de voltas na bobina receptora quanto à captação do sinal acústico para bobina circular.	69
Figura 44: Gráfico da análise da quantidade de voltas na bobina receptora quanto à captação do sinal acústico para bobina circular alongada.	70
Figura 45: Decaimento do sinal acústico na recepção com o aumento do <i>lift-off</i> .	71
Figura 46: Gráfico da análise da variação do <i>lift-off</i> quanto à captação do sinal acústico para bobina circular.	71
Figura 47: Gráfico da análise da variação do <i>lift-off</i> quanto à captação do sinal acústico para bobina circular alongada.	72
Figura 48: Relação entre tensão e <i>lift-off</i> devido a escolha do capacitor de correção.	73

Figura 49: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre bobinas emissoras e receptoras, modelo circular.	74
Figura 50: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre as bobinas emissora e receptora, modelo circular alongado, longitudinal.	74
Figura 51: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre as bobinas emissora e receptora, modelo circular alongado, transversal.	75
Figura 52 Direção de propagação do ultrassom.....	75
Figura 53: Gráfico da análise da influência do <i>lift-off</i> quanto à geração do sinal acústico na configuração PIEZO-EMAT, bobina circular.	76
Figura 54: Gráfico da análise da influência do <i>lift-off</i> quanto à geração do sinal acústico na configuração PIEZO-EMAT, bobina circular alongada. .	77

Lista de Tabelas

Tabela 1: Bobina de emissão de meandro, especificações.....	49
Tabela 2: Bobina de emissão circular, especificações.	49
Tabela 3: Bobina de emissão circular alongada, especificações.	50
Tabela 4: Bobina de recepção circular, especificações.	51
Tabela 5: Bobina de recepção circular alongada, especificações.....	51
Tabela 6: Bobina de recepção em meandro, especificações.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	Objetivo geral.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
1.2	INSTRUMENTAÇÃO DO PROJETO	22
1.3	CONTRIBUIÇÃO.....	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO LITERÁRIA E REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	REVISÃO LITERÁRIA.....	25
2.1.1	Histórico.....	25
2.1.2	Modelo básico de funcionamento do transdutor.....	25
2.1.3	Classificação do transdutor	27
2.1.4	Vantagens e limitações do transdutor.....	29
2.2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	30
2.2.1	Campo magnético.....	30
2.2.1.1	Força magnética	31
2.2.2	Magnetostricção	32
2.2.3	Força de <i>Lorentz</i>	34
2.2.4	Corrente de <i>Foucault</i>	35
2.2.5	Ultrassom	35
2.2.5.1	Onda longitudinal.....	36
2.2.5.2	Onda cisalhante	36
2.2.5.3	Onda cisalhante polarizada horizontalmente.....	37
2.2.5.4	Rayleigh-Wave.....	38
2.3	SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO.....	38
3	TRANSDUTOR ACÚSTICO ELETROMAGNÉTICO	41
3.1	ELABORAÇÃO DAS BOBINAS EMAT	41
3.1.1	Diferença entre os tipos de bobinas quanto à geração do sinal ultrassônico	43
3.1.2	Casamento de impedância.....	45
3.2	FABRICAÇÃO DAS BOBINAS EMAT.....	48
3.2.1	Especificações das PCI's.....	49
3.2.2	Corrente máxima aplicada.....	51
3.3	SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO	52

4	TESTES E RESULTADOS	55
4.1	BOBINA EM MEANDRO	56
4.2	BOBINAS DE EMISSÃO CIRCULAR E CIRCULAR ALONGADA.....	58
4.2.1	Avaliação das características das trilhas da bobina sobre o sinal acústico gerado	59
4.2.2	Avaliação da influência da variação da intensidade de fluxo magnético estático sobre o sinal acústico gerado	62
4.2.3	Avaliação da variação do <i>lift-off</i> na geração do sinal acústico gerado	65
4.3	BOBINAS DE RECEPÇÃO CIRCULAR E CIRCULAR ALONGADA	67
4.3.1	Avaliação da quantidade de voltas da bobina para captação do sinal acústico	67
4.3.2	Avaliação da variação do <i>lift-off</i> para captação do sinal acústico	70
4.4	AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES NA INTENSIDADE DO SINAL ACÚSTICO CAPTADO	73
4.5	CONFIGURAÇÃO PIEZO-EMAT	76
4.6	SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO	78
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	79
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Oleodutos são meios de transporte tubulares de grandes proporções por meio dos quais o petróleo, extraído de reservatórios naturais, é levado até uma refinaria onde o óleo cru, através de um processo químico de limpeza e refino, é derivado em diversos componentes, tais como: lubrificantes, asfalto, diesel, gasolina, querosene entre outros. [1]

Por serem, na grande maioria dos casos, instalados no subsolo, em áreas instáveis e sujeitas a intempéries ambientais, tais oleodutos estão propensos a falhas que podem levar a desastres ecológicos, tais quais: a contaminação de solos [4], oceanos [5], mananciais [6], entre outros, que prejudicam a vida e afetam a economia. [2]-[3]

Visando evitar acidentes, empresas do ramo de oleodutos atuam em um plano contínuo de manutenção preventiva com equipamentos denominados PIG¹. O equipamento é inserido na tubulação, e por meio da pressão do fluido que atua sobre o suporte traseiro do mesmo, o equipamento é impulsionado percorrendo toda a extensão do duto. Além de efetuarem a limpeza interna das tubulações, PIG's instrumentados também adquirem informações no decorrer do trajeto que são posteriormente analisadas de maneira *off-line*. Tais informações consistem em dados geométricos sobre uma falha ou anomalia encontrada interna ou externamente à tubulação, fornecendo a localização geográfica da falha, bem como: tamanho, profundidade e largura da mesma. [7]-[8]

A necessidade da aquisição de informações do PIG em modo *real-time*², leva pesquisadores buscarem por soluções para comunicação sem fio através de paredes metálicas.

Neste enfoque, o presente trabalho se dedica ao estudo das características construtivas de transdutores EMAT³, capazes de gerar e receber ondas acústicas ultrassônicas em materiais metálicos, para aplicações em comunicação. Haja vista, que soluções convencionais utilizando rádio frequência são limitadas devido ao efeito pelicular. Efeito este que atenua a onda eletromagnética, fazendo com que ela flua pela superfície do condutor e não através dele [9].

¹ PIG: Termo originado nos Estados Unidos da América (EUA) por empresas do ramo de distribuição de água que utilizavam o equipamento para a limpeza de suas tubulações. Com a ascensão do petróleo, empresas petrolíferas passaram também a utilizar PIG's na inspeção de seus dutos [7].

² *Real-time*: Comunicação realizada em tempo real.

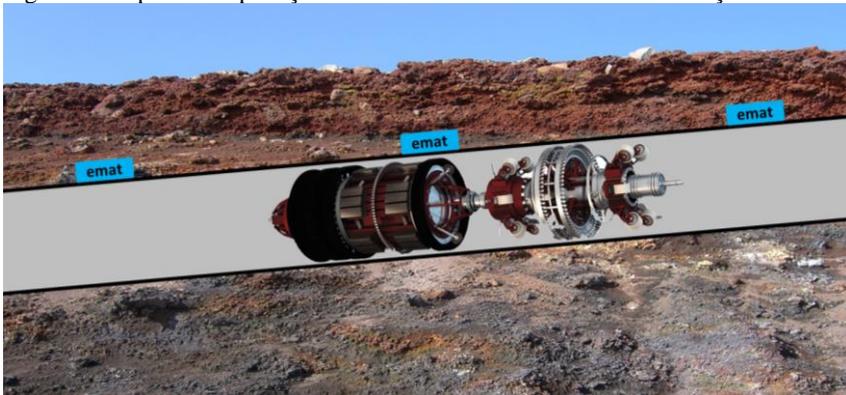
³ EMAT: *Electromagnetic acoustic transducer* ou, transdutor acústico eletromagnético.

O funcionamento de transdutores EMAT é regido por três mecanismos físicos, conhecidos como força de Lorentz [10], campo magnético estático [11] e magnetostricção [12]. Uma bobina, alimentada com corrente alternada, gera um campo magnético alternado que quando posto próximo a um material metálico induz no mesmo correntes de *Foucault* [13]. Um campo magnético estático que seja então inserido próximo a esta corrente de *Foucault*, gera na superfície do material uma força perpendicular a corrente e ao campo magnético estático, denominada força de *Lorentz*, que atua sobre os íons e elétrons do material gerando ondas ultrassônicas.

Embora este tipo de transdutor seja difundido no meio acadêmico e industrial para avaliação de falhas em testes não destrutivos em superfícies metálicas [14]-[15]-[16], poucos são os estudos encontrados onde o transdutor atua como dispositivo transmissor ou receptor de informação através de paredes metálicas [17].

Como não há a possibilidade do PIG parar em certos pontos da tubulação, para que seja feita a leitura ou transmissão de dados, já que ele é impulsionado pelo fluido que por ali corre. Tem-se a necessidade do desenvolvimento de um transdutor capaz de realizar comunicação de dados através da interface metálica com o PIG em movimentação, como ilustra a Figura 1. Desta maneira, será possível ao PIG o recolhimento de informação de sensores que estiverem instalados no lado externo da tubulação, além do envio dessas e outras informações referentes às condições estruturais dos oleodutos a uma central, onde os dados coletados serão tratados. Dando assim maior agilidade à manutenção dos oleodutos.

Figura 1: Proposta de aplicação com o desenvolvimento desta dissertação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para tanto, o trabalho aqui proposto pretende avaliar a influência exercida pelos componentes que constituem o transdutor para a geração e recepção de sinal acústico.

Soluções de comunicação *wireless*, utilizando ultrassom, são importantes não só na indústria do petróleo, mas também na indústria naval para comunicação entre blocos de navios [18] ou containers [19], para controle e segurança, entre outras.

1.1 OBJETIVOS

Visando facilitar o entendimento desta dissertação, e das atividades a serem desenvolvidas no decorrer da mesma, dividiu-se este item em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a influência das características construtivas de transdutores EMAT para geração e captação de sinal acústico ultrassônico.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de um melhor esclarecimento, do objetivo geral, delineararam-se como objetivos específicos os seguintes itens:

- Avaliar a influência das configurações de enrolamento das bobinas para geração e recepção do sinal acústico;
- Avaliar a influência da largura das trilhas e espaçamento entre trilhas para a geração do sinal acústico;
- Avaliar a influência da intensidade de corrente aplicada as bobina sobre o sinal acústico gerado;
- Avalia a influência do campo magnético estático na geração do sinal acústico;
- Avaliar a influência do *lift-off* quanto à geração e recepção do sinal acústico;
- Avaliar a influência do deslocamento entre os centros das bobinas receptoras e emissoras quanto à geração e captação do sinal acústico;
- Avaliar a possibilidade da realização de comunicação na configuração PIEZO-EMAT.

1.2 INSTRUMENTAÇÃO DO PROJETO

Os seguintes itens foram definidos como instrumentação necessária para o desenvolvimento da dissertação:

- Fonte de alimentação simétrica [20];
- Gerador de funções [21];
- Circuito de potência, para amplificação do sinal elétrico vindo do gerador de função [22];
- Placa pré-amplificadora para recebimento do sinal acústico [23];
- Osciloscópio digital [24].

1.3 CONTRIBUIÇÃO

Este projeto de dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um transdutor que seja capaz de realizar o envio e recebimento de informações através de paredes metálicas. Solução esta pouco estudada no meio acadêmico e ainda não presente no meio industrial. Portanto, a contribuição do trabalho está no estudo da influência exercida sobre cada componente que constitui o transdutor, para o envio e recebimento de sinais acústicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho segue dividido em mais quatro capítulos, como descrito a seguir.

- Capítulo 2 – Apresenta a Revisão Literária e Referencial Teórico, onde será realizada uma revisão bibliográfica sobre o transdutor EMAT, dando embasamento teórico sobre os princípios físicos envolvidos para o funcionamento do mesmo. Também será comentando a respeito dos modelos básicos existentes, bem como, classificação, vantagens e desvantagens em relação a transdutores piezoelétricos.
- Capítulo 3 – Apresenta os Transdutores Acústicos Eletromagnéticos, onde além da fabricação das PCI's contendo as bobinas EMAT, serão abordadas as especificações das mesmas, bem como, os cálculos para casamento de impedância. Também será abordada a diferença entre as bobinas desenvolvidas quanto à geração do sinal acústico ultrassônico.
- Capítulo 4 – Apresenta os resultados dos Testes realizados para avaliação da influência das características construtivas dos transdutores

desenvolvidos. Uma abordagem diferenciada, onde foi realizada a comunicação entre transdutor PIEZO e EMAT, também é abordada.

- Capítulo 5 – Apresenta a Conclusão geral do trabalho, comentando a respeito dos objetivos visados e alcançados, fazendo também um levantamento das possíveis continuções para melhoria do mesmo.

2 REVISÃO LITERÁRIA E REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda uma revisão literária sobre os transdutores EMAT. Serão levantados os principais tipos de transdutores utilizados, tanto no meio acadêmico quanto industrial, bem como os princípios físicos que regem o funcionamento deste tipo de transdutor.

Tal revisão servirá para o modelamento do conceito do transdutor a ser desenvolvido na etapa seguinte do projeto. Também serão comentados temas como campo magnético estático, força magnética, magnetostricção, força de *Lorentz*, correntes de *Foucault* e ultrassom. Princípios físicos estes que regem o funcionamento do transdutor.

2.1 REVISÃO LITERÁRIA

Este item é reservado a uma revisão bibliográfica referente a transdutores EMAT. Para tanto, um breve histórico sobre os primeiros estudos referentes ao transdutor será apresentado. Seguindo, serão exibidos os princípios físicos básicos que regem o funcionamento do mesmo. Uma classificação, comentando sobre os principais transdutores conhecidos será apresentada bem como suas vantagens e limitações em relação a transdutores piezoelétricos.

2.1.1 Histórico

Não há uma data na literatura que marque o surgimento do transdutor EMAT no meio acadêmico ou industrial. Ainda mais, pois os princípios físicos que descrevem seu funcionamento surgiram com o passar do tempo, não apenas com um estudioso, mas por gerações de estudiosos, logo, o aparecimento do primeiro transdutor acústico eletromagnético só foi possível com a evolução das áreas científica e tecnológica, já que o transdutor é consequência de um fenômeno interdisciplinar que envolve mecânica dos sólidos e eletromagnetismo. [12]-[25]

2.1.2 Modelo básico de funcionamento do transdutor

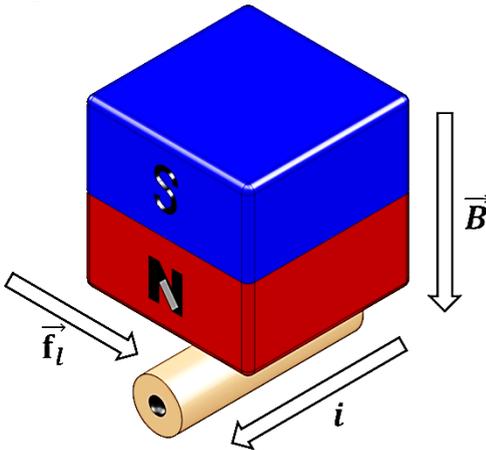
Um transdutor acústico eletromagnético consiste de um fio condutor, por onde circula uma corrente alternada, e um imã ou bobina que fornece um campo magnético estático. Segundo a lei de Ampère, a corrente tangencial que circula pelo fio induz no mesmo um campo magnético variável no tempo, e pela lei de *Faraday*, uma corrente elétrica é induzida em um material condutor quando este for posto próximo a um campo

magnético variável. Esta corrente induzida, conhecida como corrente de *Foucault* (em homenagem ao físico francês que estudou o fenômeno), interage com o campo magnético estático gerando uma força que é representada pela equação de *Lorentz*, Equação 1:

$$\vec{f}_l = \vec{j} \times \vec{B} \quad \text{Equação 1}$$

onde a força de *Lorentz* (\vec{f}_l) corresponde a uma força gerada por unidade de volume, \vec{j} representa a densidade da corrente induzida no material condutor e \vec{B} o campo magnético estático [12]-[13]. A Figura 2 ilustra a configuração básica de transdutores EMAT.

Figura 2: Configuração básica de um transdutor acústico eletromagnético, onde, \vec{B} representa o campo magnético estático gerado pelo ímã, i a corrente que circula pelo fio condutor e \vec{f}_l à força de *Lorentz* resultante da interação entre o campo magnético estático e a corrente de *Foucault* induzida.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

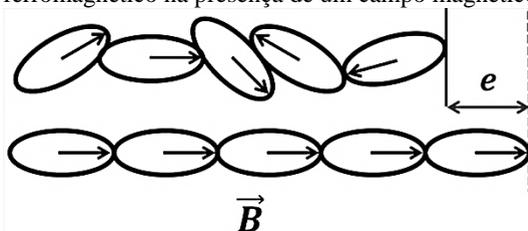
Em materiais metálicos não magnéticos, a força de *Lorentz* é a única responsável pela geração de ondas ultrassônicas. Quando um fio alimentado alternadamente é posto próximo ao material não magnético, ele induz na estrutura do material uma corrente de *Foucault*. Como as forças, nos elétrons e íons na rede do material, são iguais e opostas, o resultado é uma força de *Lorentz* nula que atua sobre o material. Ao ser inserido um campo magnético constante próximo ao enrolamento, ocorre uma interação na estrutura do material entre a corrente induzida e campo magnético estático,

gerando uma força de *Lorentz* em sentido alternado que acaba introduzindo no material ondas ultrassônicas. [12]

Em materiais ferromagnéticos, outro fator além da força de *Lorentz* é responsável pela geração de ondas ultrassônicas, a magnetostricção, que é uma propriedade inerente de materiais ferromagnéticos de se deformarem na presença de um campo magnético externo, deformação esta que ocorre no domínio magnético presente no material. Quando uma bobina, alimentada alternadamente, é posicionada próxima à superfície do material ferromagnético, o campo magnético induzido pela bobina deforma seu domínio magnético, deformação esta que é função do campo magnético gerado pela bobina e, pelo campo magnético estático, Figura 3. A interação entre estes dois campos magnéticos resulta em um acoplamento de indução magnética que gera no material ondas ultrassônicas. [12]-[25]

Para ambos os materiais, não magnéticos e ferromagnéticos, o sentido e a direção de propagação da onda gerada esta diretamente ligada ao sentido do campo magnético estático, e da configuração da bobina no transdutor. [12]

Figura 3: Alinhamento do domínio magnético na estrutura do material ferromagnético na presença de um campo magnético externo (\vec{B}).



Fonte: Adaptado de [20].

A interação entre os fenômenos físicos descritos faz com que transdutores EMAT sejam capazes de gerar vários tipos de ondas acústicas. O tipo de onda gerado está diretamente ligado à característica construtiva da bobina do transdutor, podendo haver então ondas que se propagam de maneira longitudinal ou transversal pelo corpo metálico, bem como, apenas pela superfície ou por toda extensão volumétrica do mesmo. Uma combinação entre as características citadas também é possível. [12]

2.13 Classificação do transdutor

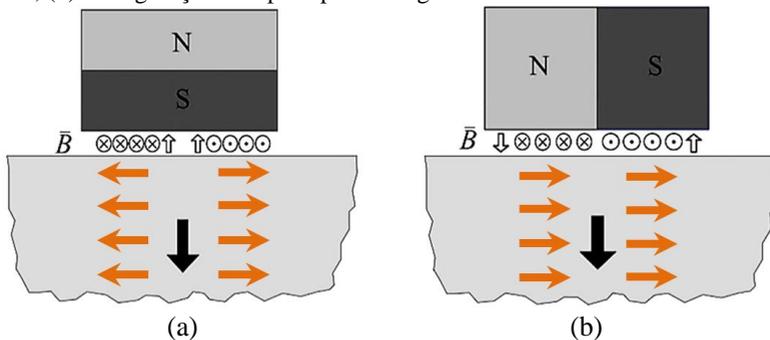
Transdutores EMAT são classificados de acordo com o tipo de onda acústica por ele gerada. Encontram-se na literatura mais de dez modelos de

transdutores EMAT, sendo que variações destes também são presentes. Dentre os principais pode-se destacar o transdutor com bobina circular, circular alongada, de onda longitudinal e de bobina em meandro.

Na configuração de bobina circular, Figura 4 (a), o transdutor gera na superfície metálica ondas acústicas ultrassônicas do tipo “*shear wave*”⁴. Na Figura 4 (b) tem-se a configuração de circular alongada, onde o campo magnético estático interage com a bobina de forma reversa e oposta direcionando o domínio magnético do material condutor em apenas um sentido. O tipo de onda acústica gerada é perpendicular à superfície do material. A Figura 5 (a) ilustra o transdutor EMAT na configuração de onda longitudinal, onde a disposição do ímã é tal que o campo por ele gerado corre de forma tangencial à superfície do material condutor. Essa interação do campo magnético com a bobina, paralela ao material e normal ao campo magnético, gera ondas longitudinais perpendiculares à superfície do material condutor. A ilustração representada pela Figura 5 (b) corresponde ao transdutor EMAT na configuração de bobina em meandro. Esta configuração permite ao transdutor, por meio de trações paralelas geradas entre o campo magnético e a bobina, gerar tanto *shear waves* quanto ondas longitudinais. [12]-[25]

Em ambas as figuras, as setas de cor alaranjada ilustram a direção de polarização do domínio magnético do material, a seta em cor preta ilustra a direção de propagação do ultrassom gerado e, as setas em cor branca ilustram a direção do campo magnético estático pelo ímã gerado.

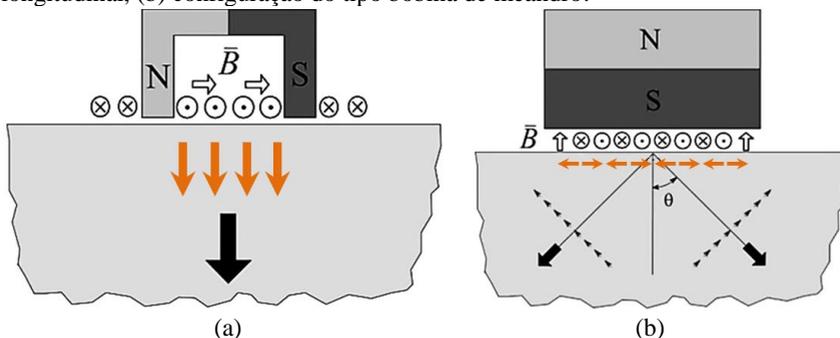
Figura 4: Configurações de transdutores EMAT. (a) configuração do tipo bobina espiral, (b) configuração do tipo espiral alongada.



Fone: Adaptado de [26].

⁴ *Shear wave*: Onda cisalhante (transversal) que se propaga através do material de forma perpendicular, e não apenas por sua superfície.

Figura 5: Configurações de transdutores EMAT. (a) configuração do tipo onda longitudinal, (b) configuração do tipo bobina de meandro.



Fonte: Adaptado de [26].

2.14 Vantagens e limitações do transdutor

Transdutores EMAT possuem vasta utilização no mercado para testes não destrutivos em materiais condutores, sendo tanto possível gerar quanto receber ondas acústicas ultrassônicas. Outra característica atraente deste transdutor é que não se faz necessário o acoplamento do mesmo ao material que se deseja inspecionar, eliminando assim problemas quanto à geração do ultrassom se comparado a transdutores do tipo piezelétricos. Além de poder trabalhar em condições insalubres, altas temperaturas, o transdutor ainda oferece uma ótima reprodutibilidade. [12]-[25]

Uma das principais limitações deste tipo de transdutor é sua baixa eficiência se comparado a transdutores do tipo piezoelétricos, grande quantidade de energia é utilizada na geração do sinal acústico, enquanto que sua recepção não ultrapassa a casa dos microvolts. Além disso, o transdutor somente funciona em materiais condutores elétricos. Devido a grande quantidade de energia necessária para seu funcionamento (em transdutores industriais por volta de 40 A). Apesar de não ser necessário um acoplamento com o material metálico, o *lift-off*⁵ influencia diretamente na intensidade do sinal acústico gerado e captado, ou seja, influencia diretamente na eficiência do transdutor. Outro problema se refere à movimentação do transdutor devido a atração existente entre o ímã e o material metálico, no entanto, este problema pode ser contornado se utilizado um componente que possua campo magnético controlado, exemplo: eletroímã. [12]-[25]

⁵ *Lift-off*: Distância entre transdutor e superfície metálica.

2.2 REFERENCIAL TEÓRICO

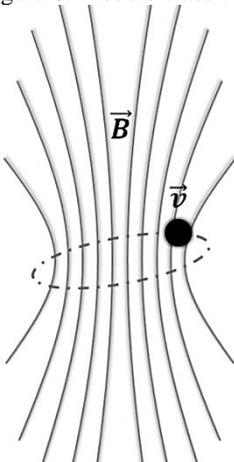
Este item do projeto é dedicado a um estudo mais aprofundado sobre cada um dos fenômenos físicos, citados anteriormente, que regem o funcionamento do transdutor.

2.2.1 Campo magnético

Campos magnéticos sempre estiveram presentes no cotidiano da humanidade, seja por minério de magnetita, descobertos a mais de 2500 anos, ou, pelo próprio campo magnético natural que o planeta terra possui, como citado por William Gilbert no ano de 1600 em seu livro *De Magnete* [27].

O campo magnético em materiais magnéticos, como a magnetita, por exemplo, surge devido a correntes elétricas a nível atômico no material. Onde por definição corrente elétrica significa carga em movimento. Como descoberto por *Oersted* em 1820, correntes elétricas produzem em torno de si um campo magnético que é resultado da movimentação dos elétrons. Em materiais magnéticos, como a magnetita, sua camada de valência, ou seja, o último nível da camada eletrônica no átomo, não possui elétrons aos pares, o que acaba por gerar um campo magnético resultante devido à movimentação orbital que o elétron realiza em torno de seu eixo de rotação, como ilustra a Figura 6 [27].

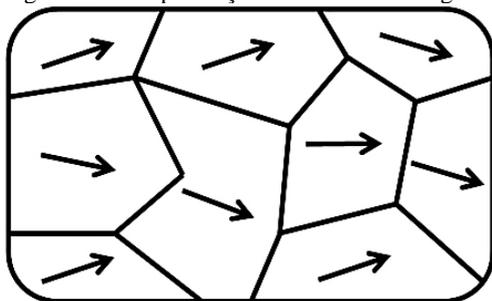
Figura 6: Modelo clássico do elétron em órbita.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como um mol do material é composto por um número de átomos da ordem do número de Avogadro (10^{23}), onde todos possuem um campo magnético resultante, os domínios magnéticos do material acabam por gerar um campo magnético não nulo que aponta para uma determinada direção. Como a magnetita apresenta seus domínios magnéticos naturalmente alinhados, Figura 7, a resultante, a soma de todos os domínios, gera o campo magnético no material que é representado por \vec{B} [28].

Figura 7: Exemplificação dos domínios magnéticos da magnetita.



Fonte: Adaptado de [28].

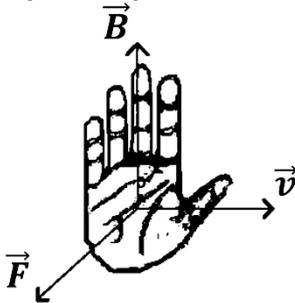
2.2.1.1 Força magnética

Quando uma partícula em movimento é exposta a um campo magnético, esta passa a sofrer o efeito de uma força magnética (\vec{F}_m). Esta força é resultante da carga da partícula (q), da velocidade (\vec{v}) com que a partícula viaja pelo campo, e do campo magnético (\vec{B}) que atua sobre esta partícula. Como descrito pela Equação 2. [28]-[29]

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{Equação 2}$$

A direção e sentido do vetor resultante \vec{F}_m podem ser representados pela regra da mão direita, como ilustra a Figura 8.

Figura 8: Regra da mão direita.



Fonte: Adaptado de [27].

onde, o dedo polegar representa a direção \vec{v} em que a partícula está viajando pelo campo \vec{B} , ilustrado na imagem pelos dedos que possuem a direção do indicador. A força \vec{F}_m , resultante da interação entre a carga, a velocidade da carga e o campo magnético, é representada então pelo vetor que sai da palma da mão. Para cargas positivas o vetor força \vec{F}_m é o ilustrado na Figura 8, caso a carga seja negativa o vetor possui sua direção inversa ao apresentado, ou seja, o vetor \vec{F}_m possui sua direção entrando na palma da mão. [27]-[29]

A força que atua sobre a partícula é sempre perpendicular à velocidade da mesma, de modo que a força magnética não pode alterar o módulo da velocidade da partícula, somente a direção de seu movimento, que pode então ser descrito pelas leis de Newton.

Quatro são as características da atuação da força magnética sobre a partícula:

1. A força magnética atua somente em cargas que estejam em movimento, logo, é altamente dependente da velocidade da partícula;
2. O módulo da força magnética é proporcional ao módulo da carga que pelo campo transita;
3. O módulo da força magnética é proporcional ao módulo, ou intensidade, do campo magnético;
4. A força magnética que atua sobre a partícula é sempre perpendicular à direção do campo magnético, e à direção da velocidade da partícula.

2.2.2 Magnetostrição

Quando um material metálico é exposto a um campo magnético externo, este sofre transformações que variam de material para material. Fenômeno este descoberto por Joule em 1842. Dependendo do

comportamento do material metálico sobre o efeito do campo magnético ele pode ser classificado de três maneiras, sendo elas: material paramagnético, diamagnético e ferromagnético, onde, neste último o fenômeno de magnetostricção é mais fácil de ser percebido, haja vista, que as deformações sofridas pelo material são da ordem de 10^{-5} metros. [28]-[29]-[30]

Materiais paramagnéticos são caracterizados por apresentarem uma fraca magnetização ao serem expostos a campos magnéticos externos. Na ausência de um campo magnético, os domínios magnéticos do material se encontram orientados de forma aleatória, o que acaba por gerar um campo resultante nulo. Contudo, na presença de um campo externo, os domínios tendem a se alinhar paralelamente as linhas de campo, o que geraria uma magnetização espontânea no material caso não houvesse um contrabalanceamento dos domínios magnéticos no material devido à agitação térmica, que acaba fazendo com que os domínios magnéticos voltem a ficar novamente orientados de forma aleatória. [28]-[29]-[30]

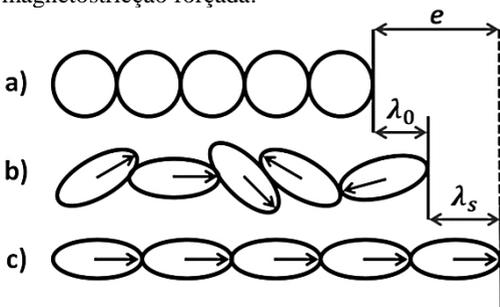
Materiais diamagnéticos são caracterizados por apresentarem, na presença de um campo magnético externo, um momento magnético no sentido oposto ao do campo magnético que sobre ele atua, gerando assim uma força de repulsão entre o material diamagnético e o campo magnético externo.

Materiais ferromagnéticos são caracterizados por apresentarem uma forte magnetização, mesmo na presença de um campo magnético externo de baixa intensidade. Na ausência de um campo magnético, os domínios magnéticos do material se encontram orientados de forma aleatória, o que gera um campo magnético resultante nulo. Contudo, na presença de um campo magnético externo, os domínios tendem a se alinhar paralelamente as linhas de campo, gerando um campo resultante maior que o campo magnético externo. Alinhamento este que permanece mesmo após a retirada do campo magnético externo, fazendo com que o material permaneça magnetizado e induzindo também campos magnéticos em outros materiais. [28]-[29]-[30]

A Figura 9 ilustra como se apresentam, de forma simplificada, os domínios magnéticos presentes em materiais metálicos. Em (a), tem-se o material acima de uma temperatura crítica, denominada temperatura de Curie, onde o material deixa de apresentar suas características magnetizantes devido ao alto grau de agitação térmica dos átomos, agitação esta que desfaz os domínios magnéticos presentes no material. Fenômeno este que ocorre até mesmo com materiais que são permanentemente magnetizados (ímãs). Em (b), tem-se um material que se encontra abaixo

da temperatura de Curie, onde os domínios magnéticos do material já se encontram estabelecidos e apontando para direções aleatórias, caracterizando assim uma magnetização espontânea com campo magnético resultante igual a zero devido a aleatoriedade dos domínios. Em (c), os domínios magnéticos do material se encontram orientados na mesma direção das linhas de campo magnético externo, caracterizando uma magnetização forçada do material. [28]-[29]-[30]

Figura 9: Magnetostricção, a) corresponde ao material acima da temperatura de Curie, b) corresponde a uma magnetostricção espontânea e c) a uma magnetostricção forçada.



Fonte: Adaptado de [28].

Magnetostricção pode então ser caracterizada pela deformação isovolumétrica de seus domínios magnéticos, na presença de um campo externo, que pode ocorrer de forma espontânea ou forçada. [29]

223 Força de Lorentz

Uma partícula em repouso, ou seja, v_{q_0} igual à zero, carregada positiva ou negativamente gera em torno de si um campo elétrico \vec{E} . Campo elétrico este que atua sobre partículas vizinhas gerando uma força elétrica \vec{F}_0 entre elas. Força esta descrita como sendo:

$$\vec{F}_e = q_0 \vec{E} \quad \text{Equação 3}$$

onde, q_0 representa o valor da carga da partícula, e \vec{E} o campo elétrico produzido em torno de si.

Ao ser introduzido movimento a partícula (v_{q_0} diferente de zero) ela passa a gerar um campo magnético que atua nas cargas vizinhas a ela, haja vista, que a carga não pode executar trabalho sobre ela mesma.

A força de *Lorentz* é então definida como a somatória de todas as forças que atuam em cargas próximas as cargas geradoras de campos, ou seja:

$$\vec{f}_l = \vec{F}_e + \vec{F}_m \quad \text{Equação 4}$$

onde, \vec{f}_l representa a força resultante de *Lorentz*, \vec{F}_e a força elétrica que atua sobre a partícula e \vec{F}_m a força magnética que também atua sobre a mesma partícula. Substituindo os termos da Equação 4 pelas Equações 2 e 3, obtemos a seguinte expressão que representa a força de *Lorentz* atuante na partícula:

$$\vec{f}_l = q_0(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Equação 5}$$

2.2.4 Corrente de *Foucault*

Um condutor de corrente elétrica quando exposto a uma variação de fluxo magnético, induz em sua superfície uma força eletromotriz (f.e.m) que possui taxa de variação igual à magnitude do fluxo magnético ao qual o material é exposto. Variação esta que é descrita pela Equação 6:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad \text{Equação 6}$$

onde ε , representa a f.e.m induzida na superfície do material e, $-d\phi_m/dt$ a variação do fluxo magnético. Esta força eletromotriz induzida gera no material uma corrente que é razão entre a f.e.m pela resistividade do material, como descrito pela Equação 7. [29]-[30]

$$i = \frac{\varepsilon}{R} \quad \text{Equação 7}$$

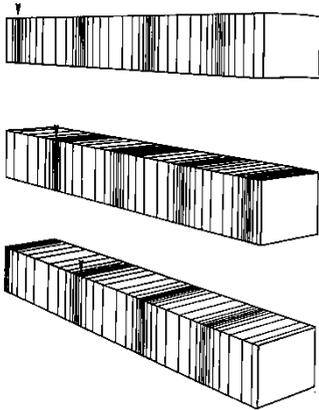
2.2.5 Ultrassom

Os tipos de ondas acústicas ultrassônicas mais comuns, geradas em materiais metálicos pela interação dos fenômenos físicos já mencionados, são conhecidas como: *P-wave*, *S-wave*, *SH-wave* e *Rayleigh-Wave*.

2.2.5.1 Onda longitudinal

Ondas longitudinais, também conhecidas como *P-waves*, são tipos de ondas ultrassônicas que fazem com que o corpo do material vibre em uma direção que é paralela a direção de propagação da onda [31]. Podendo ser representado analogamente a um elástico em contração e distensão, como ilustra a Figura 10.

Figura 10: *P-wave* (onda longitudinal).



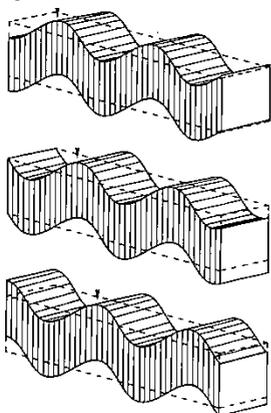
Fonte: Adaptado de [31].

Este tipo de onda pode se propagar tanto por meios gasosos, quanto líquidos e sólidos, provocando uma deformação volumétrica no material sem alterar sua forma.

2.2.5.2 Onda cisalhante

Ondas cisalhantes, também conhecidas como *S-waves*, são tipos de ondas elásticas que se propagam pelo corpo do material e não somente pela superfície do mesmo, onde o sentido da onda é perpendicular à direção de propagação [31]. Podendo ser representado analogamente a uma onda que se propaga por uma corda, Figura 11.

Figura 11 *S-wave* (onda cisalhante).



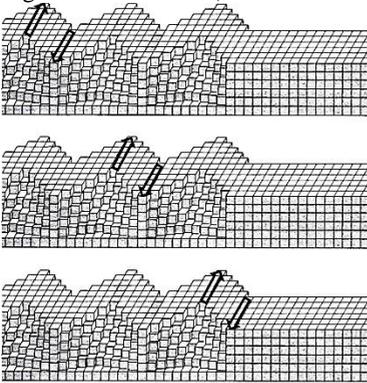
Fonte: Adaptado de [31].

Este tipo de onda se propaga somente por meios sólidos, uma vez que meios líquidos e gasosos não suportam forças cisalhantes. Este tipo de onda provoca uma deformação isovolumétrica no material. Sua velocidade de propagação varia entre (2000 e 5000) metros por segundo.

2.2.5.3 Onda cisalhante polarizada horizontalmente

Ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente, também conhecidas como *SH-wave*, são tipos de ondas elásticas que ao contrário das ondas P e S se propagam na superfície do material. Sua amplitude é grande na superfície e decai à medida que a profundidade das ondas no material aumenta. Sua velocidade de propagação menor que a das ondas P e S, Figura 12 [31].

Figura 12: *SH-wave* (onda cisalhante polarizada horizontalmente).

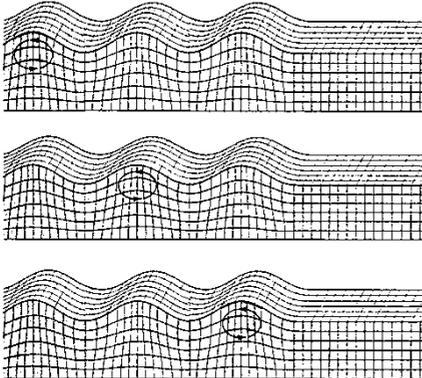


Fonte: Adaptado de [31].

2.2.5.4 Rayleigh-Wave

A onda *rayleigh-wave* é um tipo de onda que se propaga pela superfície do material. Este tipo de onda é correspondente à interferência das ondas do tipo P e S, que provocam vibrações no sentido contrário ao de propagação da onda, descrevendo assim uma órbita elíptica. Sua amplitude diminui à medida que a onda penetra no material, Figura 13 [31].

Figura 13: *Rayleigh-wave*.



Fonte: Adaptado de [31].

2.3 SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO

Neste capítulo, um breve levantamento sobre o princípio de funcionamento de transdutores acústicos eletromagnéticos foi abordado,

verificando-se então a existência de três fenômenos físicos que regem o funcionamento do mesmo. Foram também citadas as principais vantagens e limitações deste tipo de transdutor, em relação a transdutores piezelétricos, quanto à geração e recepção de sinais ultrassônicos.

Também foram aprofundados os temas sobre os fenômenos físicos que possibilitam a geração de sinal acústico em paredes metálicas. Foram abordados tópicos como campo magnético estático, magnetostricção e força de *Lorentz*, necessários para o funcionamento do transdutor.

Também foram estudados os principais tipos de ondas acústicas geradas por transdutores EMAT, ondas estas que podem tanto ser de corpo como de superfície.

Como o objetivo do projeto é a realização de comunicação com receptores que estejam posicionados no lado oposto da parede onde se localiza o transdutor emissor, transdutores que geram ondas de superfície serão descartados na etapa seguinte de projeto. Etapa esta que consiste da elaboração das bobinas que serão utilizadas para avaliação da influência das características de transdutores EMAT.

A partir deste ponto, o desenvolvimento do projeto toma um rumo mais físico (palpável) tornando assim mais fácil a visualização dos procedimentos que serão tomados para avaliação daquilo que influencia ou deixa de influenciar a geração de ultrassom em paredes metálicas.

Vale lembrar que poucos são os estudos realizados com este tipo de transdutor para a finalidade aqui proposta, a de comunicação. O presente trabalho pretende então avançar nos estudos sobre este tipo de transdutor, apresentando a viabilidade e condições de aplicação desta técnica de comunicação através de paredes metálicas, tanto no meio acadêmico quanto industrial.

3 TRANSDUTOR ACÚSTICO ELETROMAGNÉTICO

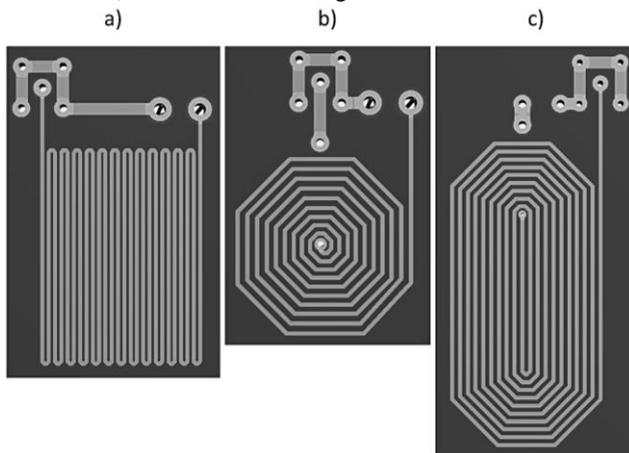
Esta etapa de projeto se dedica ao desenvolvimento das bobinas que serão utilizadas para avaliação das características construtivas dos transdutores EMAT. Serão definidos neste tópico os modelos de bobinas utilizadas para testes, bem como, o circuito para casamento de impedância.

Também será abordada a diferença entre as bobinas, escolhidas para avaliação das características construtivas de transdutores EMAT, quanto à geração do sinal acústico ultrassônico.

3.1 ELABORAÇÃO DAS BOBINAS EMAT

Os modelos de bobinas selecionados para testes foram os de bobina em meandro, bobina circular e circular alongada, como ilustrado na Figura 14. Tais modelos foram selecionados, pois dentre os tantos existentes, estes são os mais adequados para a geração das ondas ultrassônicas de interesse [25]. Para a confecção das bobinas foi utilizado o software de projeto e simulação de PCI's *Proteus*, da empresa Labcenter Electronics® [32].

Figura 14 Modelos de bobinas desenvolvidos. Em a) bobina de meandro, b) bobina circular e c) bobina circular alongada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Desenvolveram-se, de acordo com a metodologia adotada, placas PCI's onde as bobinas EMATs variam em largura de trilha, espaçamento entre trilhas, e conseqüentemente, o número de voltas. Este último limitado pelo fato de o ímã de neodímio, que fornece o campo magnético estático,

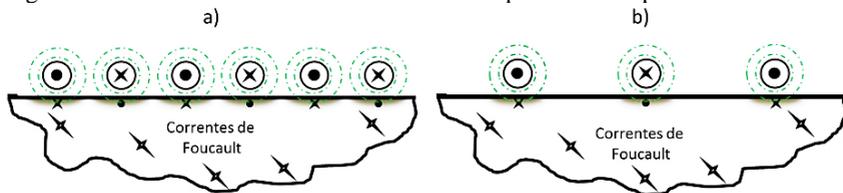
possuir diâmetro de 19 mm e espessura de 2 mm. Uma vez que a amplitude do sinal gerado decai de forma acentuada à medida que as trilhas se afastam do centro da região ativa do imã [33], optou-se por não ultrapassar as limitações do imã na criação dos enrolamentos. A região ativa consiste da área da bobina localizada logo abaixo ao imã.

A variação da largura das trilhas das bobinas desenvolvidas possibilita uma grande variação do valor de corrente a ela aplicada. Com os modelos desenvolvidos é possível obter valores de corrente que variam entre poucos mili-ampères, a até mais de quatro ampères contínuos. Desta forma, varia-se, conseqüentemente, o valor do campo magnético gerado entorno da trilha, Equação 8, que por sua vez varia a densidade de corrente de *Foucault* induzida na parede do material metálico.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{Equação 8}$$

Com a variação do espaçamento entre trilhas é possível averiguar se sua influência, na geração do ultrassom, é de relativa importância ou não. Como ilustra a Figura 15 (a), fios condutores mais próximos entre si tendem a gerar uma área sem espaçamento, ou com mínimo espaçamento, de densidade de corrente de *Foucault*, ao contrário do ilustrado em (b), onde a elevada distância entre os condutores acaba por deixar uma área sem a presença de correntes de *Foucault* entre as trilhas condutoras.

Figura 15: Correntes induzidas de *Foucault* na superfície do espécime.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

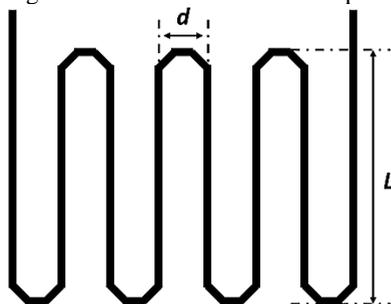
Como expressado anteriormente pela Equação 1, a densidade de corrente induzida é de fundamental importância para que haja força de *Lorentz*, porém, poucas são as publicações em relação à quanto espaçamento deve existir entre as trilhas das bobinas de transdutores EMAT, ou o que isto influencia na geração do sinal ultrassônico.

Para bobinas de formato em meandro, o espaçamento entre trilhas pode ser obtido de acordo com a Equação 9, quando a razão L/d , Figura 16, for da ordem de pelo menos dez vezes [34]-[35].

$$d = \frac{V}{2f \operatorname{sen}\theta}$$
Equação 9

A variável d representa a distância entre trilhas, V a velocidade de propagação do ultrassom no material de interface, f a frequência com que o sinal é gerado e $\operatorname{sen}\theta$ o ângulo existente entre a PCI e a parede metálica.

Figura 16: Distância entre trilhas para bobinas em formato de meandro.



Fonte: Adaptado de [34].

Desta forma, a variação do espaçamento entre trilhas para as bobinas transmissoras ocorreu da seguinte maneira: optou-se por variar a distância entre trilhas do modelo em meandro seguindo a Equação 9, e dos modelos circular e circular alongada variando a distância entre trilhas com incremento de um milímetro, fazendo assim com que a corrente de *Foucault* gerada no material de interface fique totalmente concentrada em uma região do material, ou por ele espalhada.

Para bobinas receptoras, o espaçamento entre trilhas de bobinas de formato em meandro pode também ser obtido pela Equação 9 [34]-[35].

Para as demais bobinas receptoras, foram desenvolvidas três configurações com fio de cobre 36 AWG, que variam entre si em quantidade de voltas. Bobinas contendo 150, 300 e 600 voltas foram projetadas e confeccionadas.

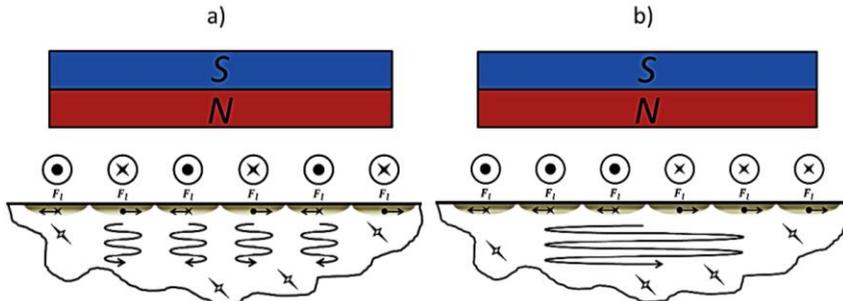
3.1.1 Diferença entre os tipos de bobinas quanto à geração do sinal ultrassônico

Os três tipos de bobinas desenvolvidas geram ondas de corpo de interesse para transmissão do sinal do ultrassônico. O que difere entre os modelos é o que ilustram as Figuras 17 e 18.

A Figura 17 (a) ilustra o modelo de bobina de formato em meandro. É possível observar que enquanto em uma trilha a corrente entra na folha, em sua trilha vizinha, a corrente sai. Esta inversão de sentido da corrente é interessante, pois no material de interface acontecerá o mesmo com a corrente de *Foucault*, induzindo assim, diversas ondas acústicas no corpo do material metálico.

Já como ilustrado pela Figura 17 (b), bobina circular e circular alongada, ocorre no corpo do material metálico a indução de somente uma onda acústica devido ao modo construtivo das bobinas que possuem trilhas com mesmo sentido de corrente, em um mesmo lado do transdutor. No exemplo ilustrado, correntes que entram na folha se localizam ao lado direito, enquanto as que saem estão ao lado esquerdo.

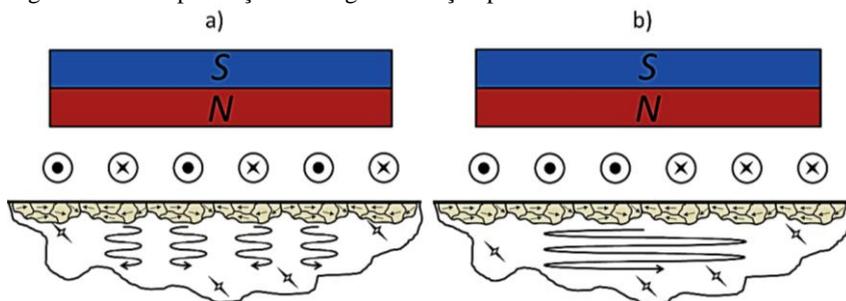
Figura 17: Exemplificação da força de *Lorentz* para as bobina confeccionadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Além da força de *Lorentz*, gerada pela interação do campo magnético estático com a corrente de *Foucault*, outro fenômeno físico, que ocorre simultaneamente em materiais ferromagnéticos, também participa da geração de ultrassom, sendo ela a magnetostricção, Item 2.2.2. A interação do campo magnético estático com o campo magnético alternado, gerado pela bobina do transdutor, produz um acoplamento de indução magnética que também induz ondas ultrassônicas no material [25]. A Figura 18 ilustra o fenômeno de magnetostricção que ocorre no material na presença do campo magnético estático e variável. Em (a), tem-se a bobina em meandro e em (b), as bobinas circular e circular alongada.

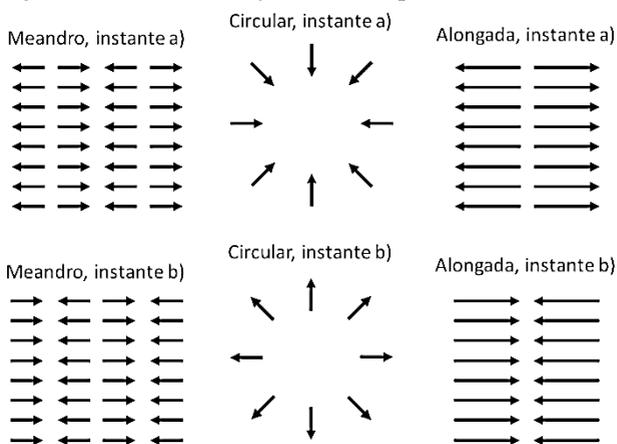
Figura 18: Exemplificação da magnetostricção para as bobinas confeccionadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O sentido da força de *Lorentz*, principal responsável pela geração do sinal ultrassônico no corpo do material metálico, é ilustrado na Figura 19. Observa-se que a variação do sentido da força é dependente do sentido da corrente aplicada a bobina.

Figura 19: Sentido da força de *Lorentz* para as bobinas desenvolvidas.



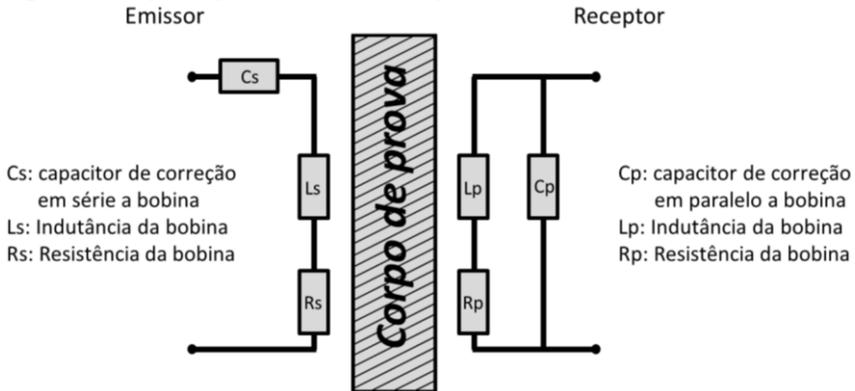
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Casamento de impedância

Para que ocorra a máxima transferência de energia entre o circuito de potência/bobina emissora e bobina receptora/circuito de pré-amplificação, faz-se necessário a utilização de um elemento reativo que deve ser inserido ao circuito de forma paralela ou em série. Tal esforço é necessário devido à baixa eficiência na conversão de energia, elétrica para sonora, em

transdutores do tipo EMAT se comparados a transdutores piezoelétrico. O circuito ilustrado na Figura 20, foi utilizado como base para a realização do casamento de impedância, tanto nas bobinas emissoras quanto receptoras, dos transdutores desenvolvidos [17].

Figura 20: Esquema para casamento de impedâncias.

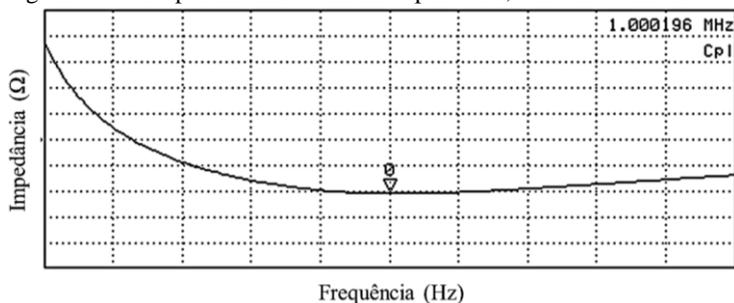


Fonte: Adaptado de [17].

De forma geral, o casamento de impedância ocorre acrescentando-se um elemento capacitivo em série com a bobina emissora (C_s) e em paralelo com a receptora (C_p), elemento esse que provoca um vale de impedância nas bobinas emissoras e pico nas receptoras, na frequência de ressonância de 1 MHz escolhida para avaliação das características construtivas dos transdutores.

Com a configuração acima ilustrada, obtém-se com a bobina emissora a menor impedância possível ao sistema, como ilustra a Figura 21. Desta maneira, é possível aplicar a bobina o máximo pico de corrente que o circuito de potência é capaz fornecer.

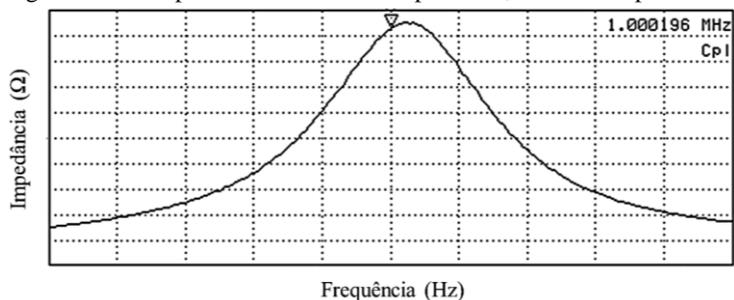
Figura 21: Exemplo de casamento de impedância, bobina emissora.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Já para bobinas receptoras, obtém-se o máximo em impedância na frequência de ressonância, como ilustra a Figura 22, desta maneira, a energia sonora localizada na parede do material metálico, induz o máximo de tensão elétrica na bobina receptora.

Figura 22: Exemplo de casamento de impedância, bobina receptora.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O valor do capacitor a ser inserido, em série ou paralelo a bobina, é obtido de acordo com a Equação 10 [36].

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_s} \quad \text{Equação 10}$$

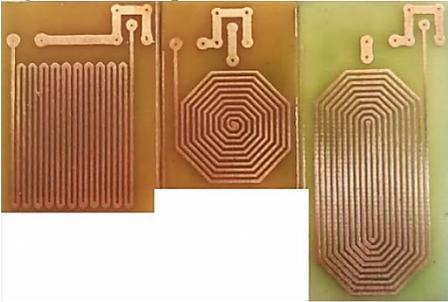
Onde f representa a frequência de trabalho adotada e L_s o valor de indutância da bobina confeccionada. A defasagem em relação ao vale ou ao pico de impedância é resultado da escolha do capacitor a ser inserido ao circuito de casamento. Para o casamento de impedância foram utilizados capacitores com tolerância construtiva de 20%, portanto, como ilustram as

Figuras 21 e 22, todas as PCI's confeccionadas obtiveram seus valores de impedância próximos ao seu vale ou pico.

32 FABRICAÇÃO DAS BOBINAS EMAT

A confecção das PCI's, contendo a bobina EMAT e o circuito de casamento de impedância, foi realizada nas dependências do INEP⁶. As bobinas emissoras foram desenvolvidas em fenolite, material plástico laminado isolante elétrico, possuindo espessura de cobre de 35 μm . As Figuras 23 e 24 ilustram alguns dos modelos confeccionados visados na etapa de elaboração das bobinas dos transdutores.

Figura 23: Exemplo dos modelos de bobinas emissoras confeccionadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 24: Exemplo dos modelos de bobinas receptoras confeccionadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao todo foram confeccionadas trinta placas emissoras, dez de cada modelo, que diferem em largura de trilha, distância entre trilhas e número

⁶ INEP: Instituto de Eletrônica de Potência localizado no campus da Universidade Federal de Santa Catarina [37].

de voltas. Também foram confeccionadas sete bobinas receptoras, três para os modelos circular e circular alongada, e uma para o modelo em meandro. Bobinas estas que diferem em quantidade de voltas.

3.2.1 Especificações das PCI's

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os valores referentes à quantidade de voltas obtidas, ao espaçamento entre trilhas, bem como a largura das mesmas, e também, o valor de impedância, capacitância e impedância corrigida referente a cada bobina confeccionada. Tais valores foram obtidos a uma frequência de 1 MHz pelo analisador de impedância de precisão, modelo 4294A da empresa *Agilent* [38]. Equipamento este disponibilizado pelo INEP.

Tabela 1: Bobina de emissão de meandro, especificações.

Modelo	Nº voltas	Espaçamento (mm)	Largura (mm)	Impedância (Ω)	Capacitância (nF)	Impedância corrigida (Ω)
I	13	0,5	0,5	3,51	51,5	1,94
II	7	0,5	1	2,10	80,0	0,74
III	4	0,5	2	1,35	123,0	0,47
IV	3	0,5	3	1,10	151,0	0,36
V	6	1	1	1,93	96,4	0,85
VI	4	1	2	1,44	115,4	0,55
VII	3	1	3	1,20	137,5	0,44
VIII	4	2	1	1,80	93,6	0,64
IX	3	2	2	1,34	124,0	0,51
X	2	2	3	1,11	149,0	0,37

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 2: Bobina de emissão circular, especificações.

Modelo	Nº voltas	Espaçamento (mm)	Largura (mm)	Impedância (Ω)	Capacitância (nF)	Impedância corrigida (Ω)
I	10	0,5	0,5	7,63	23,5	3,82
II	5	0,5	1	2,95	57,8	1,23
III	3	0,5	2	1,70	97,5	1,54
IV	2	0,5	3	1,34	122,0	0,91
V	4	1	1	2,29	73,0	0,90
VI	3	1	2	1,52	107,0	0,57
VII	2	1	3	1,15	140,0	0,38
VIII	3	2	1	1,68	99,2	0,62
IX	2	2	2	1,25	128,0	0,38
X	1	2	3	1,23	133,0	0,92

Fonte: Elaborado pelo Autor.

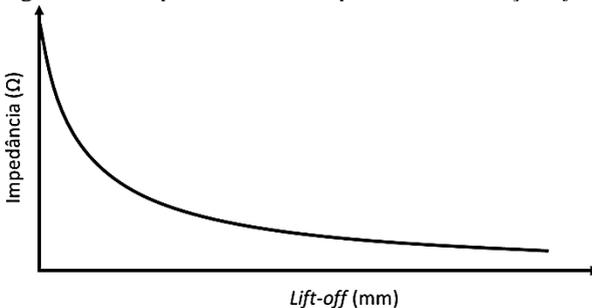
Tabela 3: Bobina de emissão circular alongada, especificações.

Modelo	Nº voltas	Espaçamento (mm)	Largura (mm)	Impedância (Ω)	Capacitância (nF)	Impedância corrigida (Ω)
I	10	0,5	0,5	6,70	22,9	3,53
II	5	0,5	1	3,85	44,8	1,63
III	3	0,5	2	1,22	134,0	0,84
IV	2	0,5	3	1,16	147,0	0,69
V	4	1	1	2,39	71,0	0,97
VI	3	1	2	1,18	140,0	1,46
VII	2	1	3	1,90	88,0	0,82
VIII	3	2	1	1,13	150,0	0,81
IX	2	2	2	1,27	129,0	0,75
X	1	2	3	0,95	173,0	0,44

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a obtenção dos valores apresentados nas tabelas acima, todas as PCI's desenvolvidas foram medidas posicionadas próximas à parede metálica, onde os testes de envio e recebimento do sinal ultrassônico foram executados, e também, já com o imã acoplado a PCI. Desta maneira, conseguiu-se o valor de impedância das bobinas de maneira mais coerente, haja vista, que a aproximação da bobina à parede metálica altera seu valor de impedância [36]. Como ilustra a Figura 25.

Figura 25: Comportamento da impedância em relação *lift-off* para bobinas EMAT.



Fonte: Adaptador de [36].

As bobinas de recepção confeccionadas também foram avaliadas pelo analisador de impedância, e suas especificações são apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6. O mesmo método de análise utilizado para as bobinas emissoras foi utilizado para avaliação das especificações das bobinas receptoras.

Tabela 4: Bobina de recepção circular, especificações.

Modelo	Nº voltas	Impedância (Ω)	Capacitância (pF)	Impedância corrigida (Ω)
I	150	397	467	637
II	300	2570	68	7220
III	600	7660	22,2	12250

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 5: Bobina de recepção circular alongada, especificações.

Modelo	Nº voltas	Impedância (Ω)	Capacitância (pF)	Impedância corrigida (Ω)
I	150	1200	144	2660
II	300	3750	44	10380
III	600	82500	13,2	---

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 6: Bobina de recepção em meandro, especificações.

Modelo	Nº voltas	Impedância (Ω)	Capacitância (pF)	Impedância corrigida (Ω)
I	150	9970	19,8	17050
II	300	---	---	---
III	600	---	---	---

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 5 é possível observar a falta do valor de impedância corrigida para a bobina circular alongada de 600 voltas, tal fato se deve a não necessidade do acréscimo do elemento capacitivo de correção, uma vez que o pico de impedância da bobina, medido com o analisador de impedância, atingiu seu máximo a 1 MHz.

A justificativa para a Tabela 6, referente às especificações da bobina em meandro, não estar totalmente preenchida é dada no Item 4.1.

3.2.2 Corrente máxima aplicada

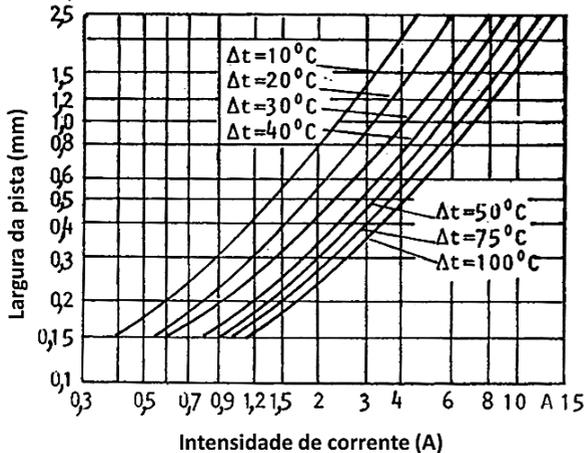
A corrente máxima aplicada em cada PCI desenvolvida foi selecionada de acordo com a norma brasileira NBR 8188⁷. As curvas ilustradas na Figura 26 apresentam uma tolerância de 10% para suprir possíveis imperfeições do processo de fabricação. As correntes ilustradas representam valores *rms* (i.e. representam uma medida estática de uma magnitude variável).

O valor real de corrente a ser aplicada, já que o circuito trabalha em corrente alternada, pode ser obtido multiplicando-se o valor encontrado no

⁷ NBR 8188: Representa um guia de projeto relativo à especificação fabricação, e uso de placas impressas [39].

gráfico, referente à corrente que determinada largura de trilha suporta em determinada temperatura, por $\sqrt{2}$.

Figura 26: Gráfico da largura da pista por corrente aplicada para espessura do cobre de 35 μm .



Fonte: Adaptado de [39].

3.3 SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO

A terceira etapa de desenvolvimento do projeto foi responsável pela elaboração e criação das bobinas EMATs a serem testadas. Foi definido, que as bobinas a serem confeccionadas serão as de formato em meandro, circular e circular alongada. Tais modelos foram selecionados, pois entre os diversos existentes, são estes os capazes de gerar ondas acústicas de interesse, ou seja, ondas de corpo.

São também definidos nesse tópico, as principais diferenças entre os modelos selecionados quanto à geração das ondas acústicas. Observou-se que para o modelo em meandro, devido à forma construtiva da bobina, várias formas de ondas são geradas no material, enquanto que nos modelos circular e circular alongada, apenas uma forma de onda é induzida.

A importância do casamento de impedância para as bobinas EMAT também é abordada, casamento este que visa ajustar a impedância do sistema de comunicação, para a obtenção de um maior ganho em conversão de energia elétrica para sonora (bobina emissora), e sonora para elétrica (bobina receptora). É demonstrado nas Tabelas de 1 a 6, que o objetivo em diminuição ou aumento de impedância das bobinas transdutoras é obtido com o acréscimo do elemento reativo ao sistema.

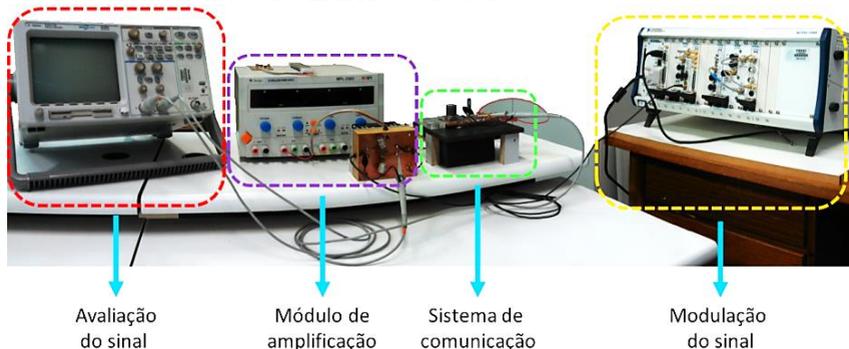
Ao término desta etapa, abre-se caminho para a realização dos testes que irão avaliar as características construtivas das bobinas EMAT.

4 TESTES E RESULTADOS

Segundo pesquisas anteriores [17]-[36]-[40], a impedância da bobina receptora, de transdutores EMAT de baixa potência, deve ser alta o suficiente para que a máxima transferência de energia entre o meio sonoro e a bobina ocorra, e também, que a mesma possui sensibilidade proporcional ao seu número de voltas. Portanto, como não há um padrão de bobina para transdutores EMAT, optou-se por avaliar as características das bobinas emissoras com bobinas receptoras contendo 300 voltas. Uma vez que os testes demonstrarem qual a melhor configuração de bobina emissora, esta mesma será utilizada para avaliação das características construtivas das bobinas receptoras.

A Figura 27 ilustra a bancada utilizada para os testes de avaliação das características construtivas das bobinas EMAT desenvolvidas.

Figura 27: Bancada utilizada para os testes de avaliação das características construtivas dos transdutores EMAT desenvolvidos.

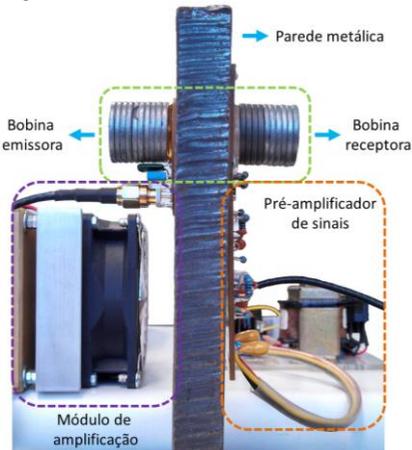


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 28 ilustra de maneira mais detalhada o sistema de comunicação desenvolvido. É possível observar à esquerda da figura o transdutor de emissão do sinal acústico, bem como seu módulo de amplificação de sinal que é responsável pelo ganho em tensão da informação a ser transmitida. À direita da figura tem-se a bobina de recepção juntamente com a placa pré-amplificadora de sinais.

Os testes para avaliação das características construtivas das bobinas foram realizados com um material metálico que representa a real situação de trabalho dos transdutores acústicos.

Figura 28: Vista detalhada do sistema de comunicação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 BOBINA EM MEANDRO

Dos modelos de bobinas EMAT desenvolvidas para testes, o modelo em meandro foi o único em que não foi possível a realização do envio de sinais.

Alguns fatores foram levantados como possíveis causas para o não funcionamento desta configuração:

- 1 Devido ao formato peculiar que a bobina possui, e também, à limitação de área ativa existente decorrente do tamanho do ímã fornecedor de campo magnético estático, não foi possível desenvolver uma bobina de recepção que respeitasse o espaçamento entre trilhas sugerido pela Equação 9.

De acordo com a Equação 9, a distância entre trilhas para bobinas em meandro, com frequência de trabalho centralizada em 1 MHz, deve ser de 3,25 mm tanto para bobinas emissoras quanto receptoras. Para maioria das bobinas emissoras confeccionadas, o valor do espaçamento entre trilhas é próximo ao valor ideal calculado, variando entre 3 mm e 3,5 mm. Para a bobina receptora desenvolvida, o valor sugerido pela Equação 10 é difícil de ser alcançado devido à limitação de área ativa, e também, ao volume de fio necessário para sua construção.

Como ilustra a Figura 29, a distância média entre trilhas para a bobina de recepção ficou em torno de 8 mm.

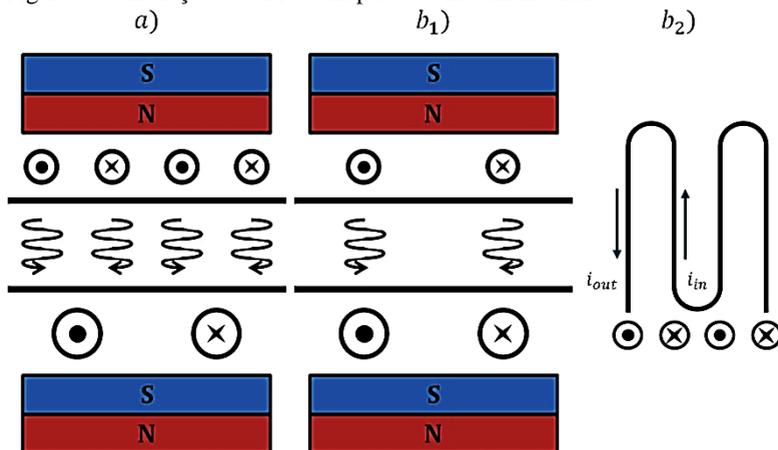
Figura 29: Bobina em meandro de recepção desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

- 2 Como há divergência quanto à quantidade de pequenas voltas entre bobina emissora e receptora, acredita-se que possa ter ocorrido o cancelamento de indução de tensão elétrica na bobina receptora, como ilustra a Figura 30.

Figura 30: Anulação do ultrassom pela bobina em meandro.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como ilustrado em (a), o fato de a bobina emissora possuir um número maior de pequenas voltas que a bobina receptora confeccionada, pode

ter acarretado em um cancelamento do ultrassom recebido. Nota-se em (a), que duas ondas sonoras chegam simultaneamente a uma trilha da bobina receptora. Nota-se também, que esses sinais sonoros possuem sentidos de propagação opostos, gerando correntes induzidas com campos magnéticos opostos ao ficarem imersas no campo magnético estático fornecido pelo imã acoplado a bobina receptora. Como este fenômeno ocorre em cada trilha da bobina receptora, um cancelamento simultâneo acontece, deixando de produzir diferença de potencial entre os terminais da bobina, prejudicando assim a detecção do sinal acústico ultrassônico.

Acredita-se que para que seja possível a detecção do sinal acústico com bobinas em meandro, a relação esboçada pela Equação 9 deva ser satisfeita. Desta maneira, espera-se que ocorra uma somatória de sinal devido à direção de indução oposta que acontecerá em cada trilha da bobina receptora, como ilustrado na Figura 30 (b_1) e (b_2).

- 3 Além dos fatos mencionados, a quantidade de voltas completas que a bobina receptora possui foi um empecilho para a não detecção do sinal ultrassônico. Como ilustrado adiante no Item 4.3.1, bobinas receptoras com 150 voltas não são boas detectoras de sinal acústico.

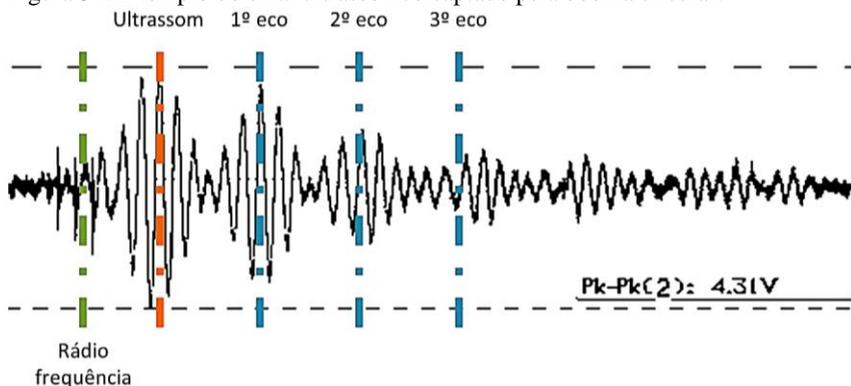
4.2 BOBINAS DE EMISSÃO CIRCULAR E CIRCULAR ALONGADA

Conforme Item 3.1, variou-se a largura da trilha, espaçamento entre trilha e número de voltas de cada bobina. Também foram variadas a intensidade de fluxo magnético aplicado, e distância de *lift-off*, ambos para verificação de suas influências no processo de geração do sinal acústico.

A Figura 31 ilustra um exemplo de sinal emitido e recebido pela bobina circular sem a presença de *lift-off*. Sinal este captado pela bobina receptora de 300 voltas. É possível observar que para uma parede metálica com espessura média de 9,7 mm, a intensidade de sinal captada pela bobina é proporcional a 4,31 V, valor este que é dependente da corrente aplicada a bobina emissora, do ganho do pré-amplificador e, da quantidade de pastilhas de imãs acopladas ao transdutor emissor e receptor.

Os pontos nos gráficos apresentados nos itens a seguir representam a média obtida a partir de quinze medições realizadas. As incertezas de medição apresentadas foram obtidas com base no coeficiente t de *student* para $(n - 1)$, sendo n o número de amostras.

Figura 31: Exemplo do sinal ultrassônico captado pela bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.1 Avaliação das características das trilhas da bobina sobre o sinal acústico gerado

Como é possível observar nas Figuras 33 e 34, quanto maior a largura da trilha, a distância entre trilhas e menor o número de voltas da bobina abaixo da área ativa do imã, menor é a intensidade do sinal acústico gerado pela bobina emissora. Tal fato é justificado pela falta de corrente de *Foucault* induzida na superfície da parede metálica.

A corrente que circula pela bobina emissora é definida de acordo com a Equação 11:

$$I = n|q|v_d A \quad \text{Equação 11}$$

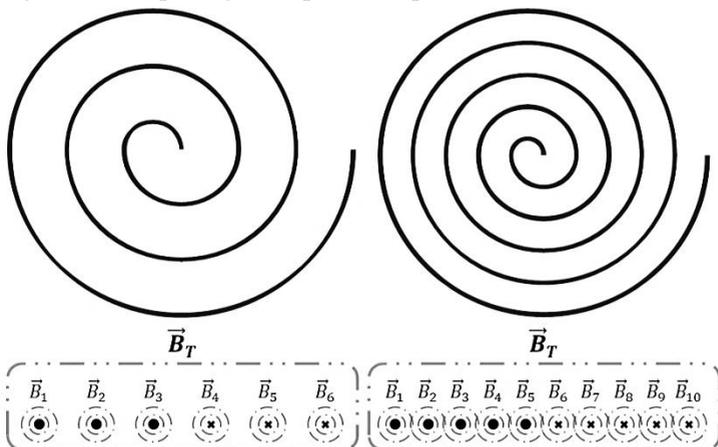
onde, A representa a área da seção reta do fio, n o número de cargas por unidade de volume, q o valor de carga da partícula, e v_d , a velocidade de arraste das partículas no elemento. De forma que é possível obtermos o valor do campo magnético total, produzido pela bobina emissora em qualquer ponto no espaço, com a integração em todos os segmentos $d\vec{l}$ da Equação 8. [29]-[30]

Como descrito no Item 2.1.2, a geração de ultrassom no material depende basicamente de dois fatores: da densidade de corrente de *Foucault* induzida, e do campo magnético estático. Portanto, a corrente que flui pela bobina emissora é deveras importante para o bom funcionamento do transdutor, haja vista, que a indução de corrente de *Foucault* é dependente da intensidade do campo magnético gerado pela bobina. Logo, quanto mais corrente pela bobina fluir, maior será o campo magnético por ela produzido,

consequentemente, maior será a densidade de corrente induzida na parede do material metálico.

O motivo pelo qual a quantidade de voltas influencia na melhora da intensidade sonora produzida pela bobina é ilustrado na Figura 32. Como cada segmento da bobina produz campo magnético em torno de si, quanto mais segmentos a bobina possuir, maior será o campo magnético por ela produzido, por sua vez, maior a densidade de corrente que será induzida na parede do material metálico.

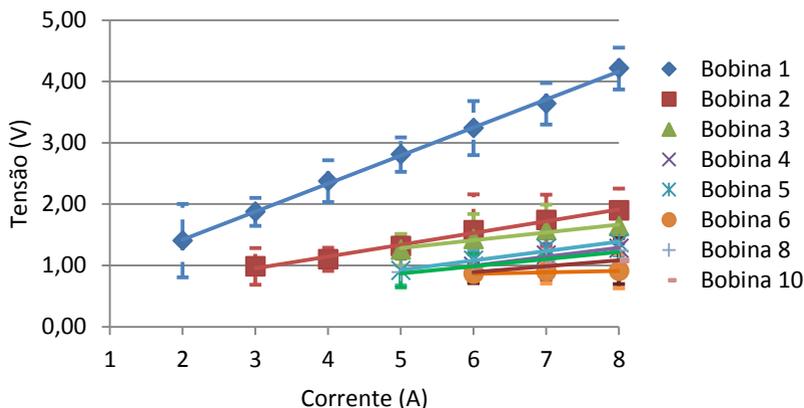
Figura 32: Campo magnético produzido pela bobina.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

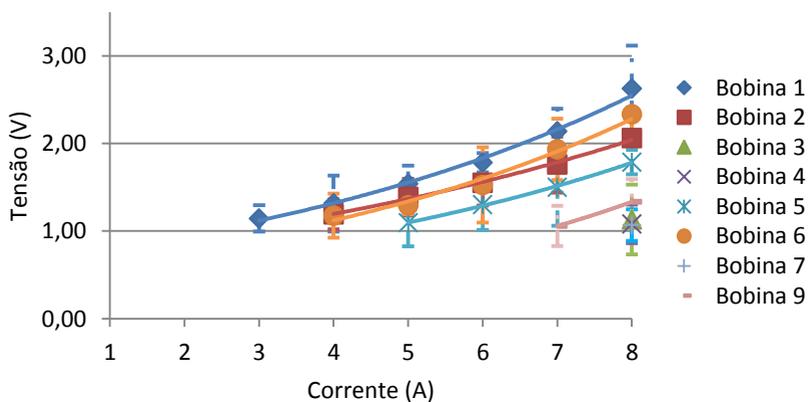
Como ilustrado pela Figura 32, e representado pela Equação 8. O campo magnético total, produzido pela bobina, é a somatória de cada segmento produtor de campo magnético, logo, os resultados ilustrados nas Figuras 33 e 34, onde bobinas com um maior número de voltas apresentaram um melhor resultado, são coerentes.

Figura 33: Gráfico da avaliação das características construtivas das bobinas circulares.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 34: Gráfico da avaliação das características construtivas das bobinas circulares alongadas.



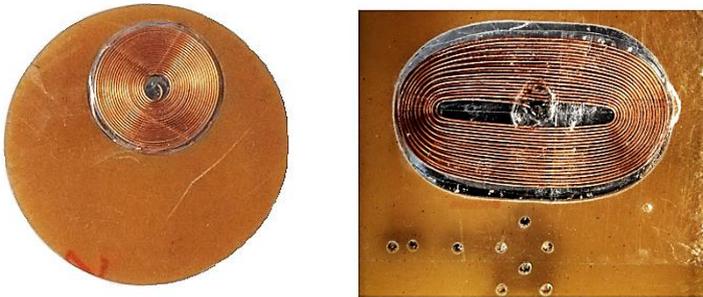
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para realização dos testes, cujos resultados estão ilustrados nas Figuras 33 e 34, utilizou-se uma quantidade fixa de pastilhas de ímãs de neodímio. Desta maneira, a avaliação das características construtivas das bobinas emissoras confeccionadas, foram todas avaliadas a uma mesma intensidade de campo magnético estático. Variando-se então a largura da

trilha, o espaçamento entre trilhas, a quantidade de voltas abaixo do imã, e também, a corrente aplicada.

Para validação dos conceitos aqui abordados, novas bobinas de emissão de sinal acústico foram confeccionadas, Figura 35, com fio de cobre 27 AWG contendo 19 voltas sem espaçamento entre elas, bobinas estas que foram utilizadas para avaliação do efeito *lift-off* quanto a emissão do sinal acústico. As novas bobinas possuem 19 voltas, pois este foi o número possível de enrolamentos abaixo da área ativa do imã que é limitada em 19 mm. Os resultados, dos testes com as novas configurações, são apresentados no Item 4.2.3.

Figura 35: Bobina circular e circular alongada, fabricadas com fio de cobre 27 AWG.



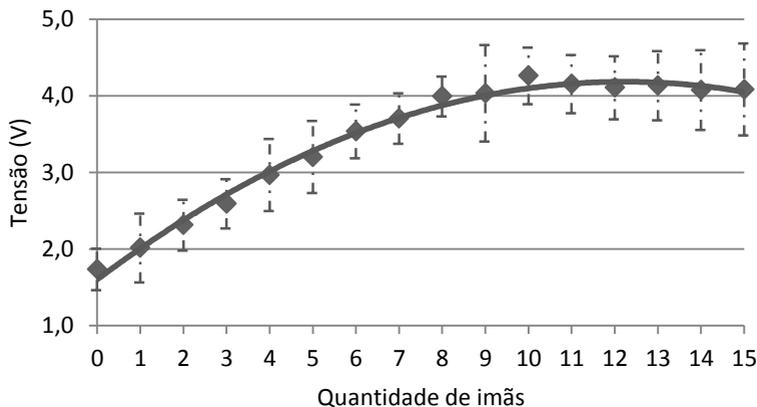
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2 Avaliação da influência da variação da intensidade de fluxo magnético estático sobre o sinal acústico gerado

Como representado pela Equação 1, o funcionamento de transdutores acústicos eletromagnéticos é função do produto da densidade de corrente induzida na parede metálica do material, com o campo magnético estático permanente presente acima da bobina do transdutor.

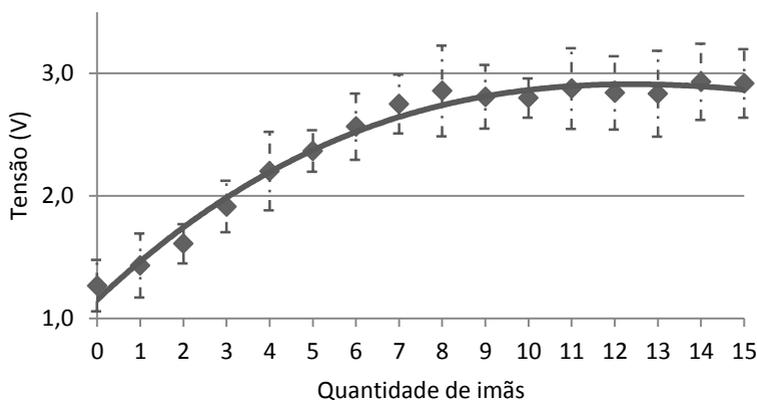
A partir dos resultados ilustrados nas Figuras 36 e 37, é possível observar que essa relação possui característica ascendente até o ponto onde ocorre uma saturação magnética, ou seja, até o ponto em que o acréscimo de campo magnético estático deixa de influenciar na intensidade do sinal acústico gerado.

Figura 36: Gráfico da análise da influência do campo magnético estático quanto à geração do sinal acústico, bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 37: Gráfico da análise da influência do campo magnético estático quanto à geração do sinal acústico, bobina circular alongada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A saturação observada ocorre, pois não é possível obter campo magnético ilimitado por mera adição de pastilhas imantadas. Cada ímã adicionado ao transdutor atua como um dipolo magnético que gera a sua volta um campo magnético estático próprio, campo este que decai em

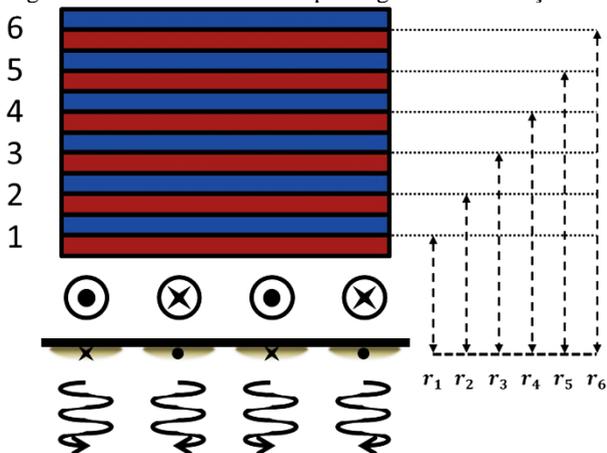
intensidade com o aumento da distância em relação à corrente induzida de *Foucault*. Como descrito pela Equação 12:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{r^3} \quad \text{Equação 12}$$

onde, $\mu_0/4\pi$ representa uma constante de acoplamento (característica inerente ao material), μ o momento de dipolo magnético do ímã, e r , a distância em relação ao centro do dipolo onde será obtido o valor da intensidade de campo magnético. [41]-[42]

A Figura 38 ilustra o modo de funcionamento adotado para os testes com os transdutores desenvolvidos. É possível perceber que à medida que pastilhas de ímãs são acrescentadas, a distância r do ponto da fonte, ponto este onde se encontram as partículas q (corrente induzida de *Foucault*), aumenta o equivalente à altura do ímã, de modo que cada novo dipolo adicionado contribui com uma parcela cada vez menor, em relação ao dipolo anterior, para o aumento do campo magnético atuante nas partículas q . Este aumento da distância faz com que cada ímã possua um campo magnético atuante sobre as partículas q , de maneira que o campo magnético resultante, que atua nas partículas para geração da força de *Lorentz*, é a somatória do campo magnético que cada ímã exerce individualmente sobre as partículas induzidas [42].

Figura 38: Intensidade do campo magnético em relação à distância da partícula.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como cada imã adicionado ao transdutor contribui com uma parcela cada vez menor de campo magnético para a geração da força de *Lorentz*, a saturação observada nas Figuras 36 e 37 é, portanto, previsível.

É interessante se notar nos gráficos, que sem o acréscimo de pastilhas de imã foi possível a captação de sinal acústico. Isto se dá devido principalmente a magnetostricção, que participa da geração de sinal acústica, porém, de maneira menos expressiva.

Os resultados apresentados nas Figuras 36 e 37 foram obtidos a zero *lift-off*, com aplicação de uma corrente a bobina que possuiu o mesmo valor médio, objetivando garantir uma corrente de *Foucault* média constante na parede metálica. Garantido que a única variável avaliada nos testes fosse o campo magnético estático.

4.2.3 Avaliação da variação do *lift-off* na geração do sinal acústico gerado

Uma das vantagens de transdutores EMAT é a não necessidade de acoplamento com o material que se deseja inspecionar, ou, neste caso, comunicar. Ao contrário de transdutores do tipo piezoelétricos, que só geram sinal acústico ao estarem devidamente acoplados a superfície metálica.

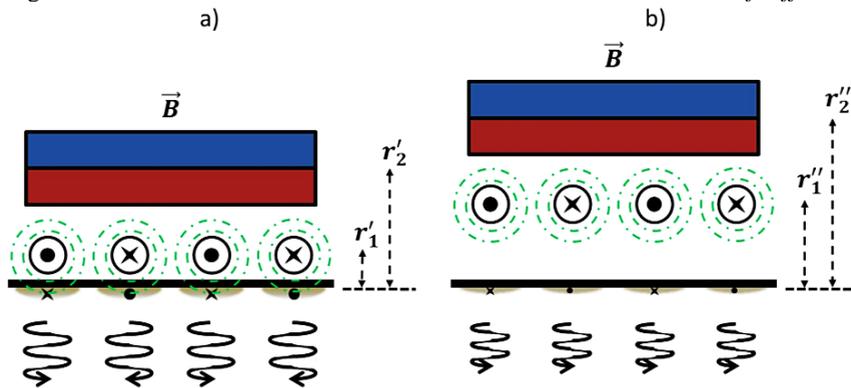
Para avaliação da influência do *lift-off* sobre o sinal gerado, foram utilizadas as bobinas confeccionadas em fio de cobre 27 AWG, como ilustrado na Figura 35. Comparando-se o valor de tensão obtido a zero *lift-off* com as bobinas em fio de cobre, ao valor de tensão obtido nos testes de avaliação das características construtivas (Figuras 33 e 34), é possível observar um ganho de aproximadamente 25% em intensidade sonora com a nova forma construtiva da bobina.

Para avaliação do efeito *lift-off*, foram utilizados espaçadores que variavam em comprimento de 1 em 1 milímetro. Como é possível observar nas Figuras 40 e 41, há um acentuado decaimento do sinal acústico com o acréscimo de *lift-off*. Fenômeno este que pode ser explicado pelas Equações 8 e 12. De acordo com a Equação 8, é possível observar que a densidade de corrente induzida é dependente da distância em que a bobina se encontra da parede metálica, dependência esta que é proporcional a r^{-2} . Pela Equação 12, nota-se que a intensidade de campo magnético produzido pelo dipolo magnético decai com o afastamento em relação à partícula induzida, decaimento este que é proporcional a r^{-3} .

A Figura 39 ilustra o comportamento do transdutor com o aumento do *lift-off*. Em (a), tem-se o transdutor na condição ótima de trabalho a zero

lift-off. Em (b), o transdutor afastado da parede metálica, onde é ilustrado a diminuição da corrente induzida, e também, a redução da intensidade sonora produzida.

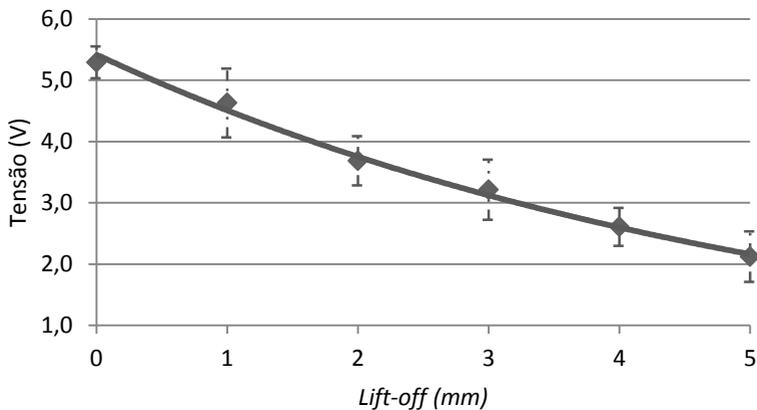
Figura 39: Decaimento do sinal acústico na emissão com o aumento do *lift-off*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

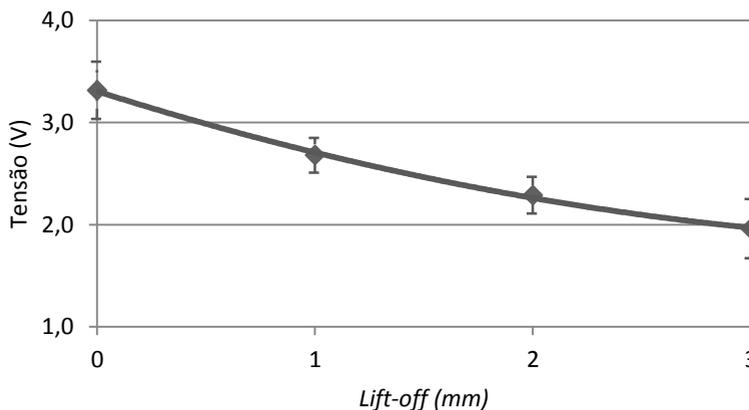
Aliando baixa densidade de corrente induzida na parede metálica, com baixa intensidade de campo magnético estático na superfície da parede, tem-se o decaimento do sinal acústico produzido pelo transdutor com aumento de *lift-off*. Conforme ilustrado nas Figuras 40 e 41.

Figura 40: Gráfico da análise da variação do *lift-off* quanto à geração do sinal acústico bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 41: Gráfico da análise da variação do *lift-off* quanto à geração do sinal acústico para bobina circular alongada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 BOBINAS DE RECEPÇÃO CIRCULAR E CIRCULAR LONGADA

Após a avaliação das características construtivas das bobinas emissoras, com bobina de recepção de 300 voltas, utilizaram-se as bobinas com melhores resultados em emissão, para avaliação da influência que a quantidade de voltas na bobina de recepção exerce sobre o sinal acústico captado. Os testes realizados consistem na avaliação da quantidade de voltas e variação do *lift-off*, uma vez que a influência que o campo magnético estático exerce sobre as bobinas receptoras é a mesma exercida sobre as bobinas emissoras [25].

4.3.1 Avaliação da quantidade de voltas da bobina para captação do sinal acústico

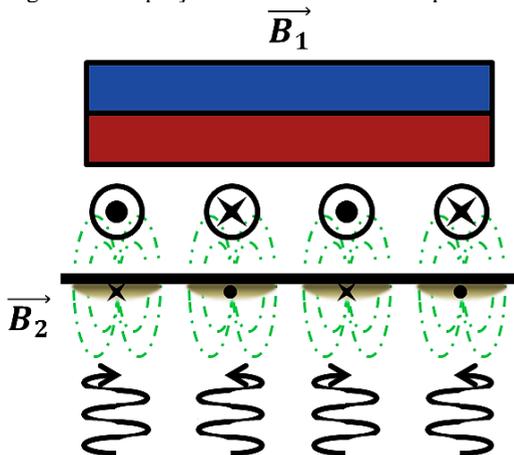
Como citado por *Graham* [17], a bobina de recepção deve possuir alta impedância para que a máxima transferência de energia ocorra entre à parede metálica e a bobina de recepção. Também é citado por *Jian et al.* [40], que o sinal acústico induzido na bobina receptora é proporcional à quantidade de voltas que a mesma possui. *Ding et al.* [36] ressaltam a importância do casamento de impedância para o bom funcionamento da bobina receptora, porém, seu trabalho avalia bobinas de baixa impedância,

onde, neste caso, a inserção do capacitor se prova eficaz, haja vista, que a impedância da bobina será máxima na frequência de trabalho.

Para avaliar estas afirmações, foram desenvolvidas bobinas de recepção com fio de cobre 36 AWG, contendo 150, 300 e 600 voltas, Tabelas 4, 5 e 6. Além disso, testes com e sem a inserção do capacitor de correção de impedância foram realizados, no intuito de avaliar a influencia por ele exercida quanto à captação do sinal ultrassônico.

A captação do sinal acústico ocorre de maneira inversa à emissão. O ultrassom, que é transmitido pelo material, corresponde à vibração mecânica que o mesmo esta sofrendo. Vibração esta que ao chegar ao lado oposto da parede metálica, fica imersa em um campo magnético estático (\vec{B}_1) fornecido pelo imã acoplado a bobina receptora, como ilustra a Figura 42. Como há movimento relativo entre o material de interface e o campo magnético estático, devido à vibração causada pelo sinal ultrassônico, correntes de *Foucault* são induzidas na parede do material. Estas correntes induzidas geram, por sua vez, um campo magnético próprio (\vec{B}_2) que induz então na bobina receptora uma segunda corrente de *Foucault*, logo, a tensão elétrica percebida nos terminais da bobina, que é proporcional a intensidade do sinal ultrassônico transmitido, é função do produto entre a corrente induzida na bobina e seu valor de impedância.

Figura 42: Captação do sinal ultrassônico pela bobina receptora.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nas Figuras 43 e 44, os pontos em vermelho ilustram os resultados obtidos com a bobina de recepção sem o capacitor de correção, enquanto

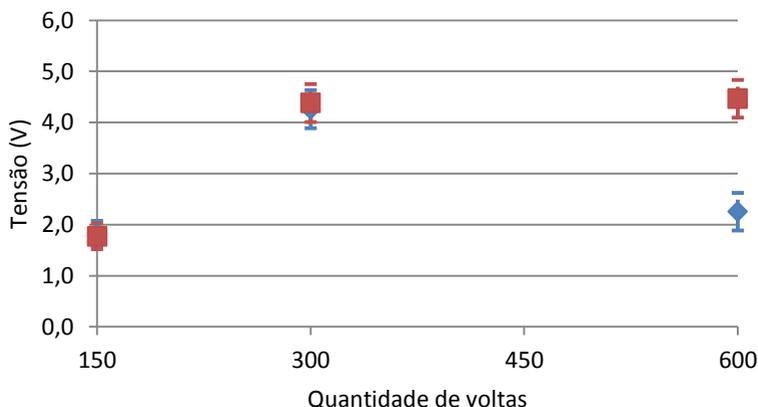
que os pontos em azul ilustram os resultados obtidos com capacitor de correção.

Como é possível observar, existe um valor ótimo de impedância que a bobina receptora deve possuir para que ocorra a máxima transferência de energia entre parede metálica e bobina receptora. Valor este que depende do tipo de enrolamento utilizado, e do número de voltas que a bobina contém.

Os gráficos apresentados ilustram que uma bobina receptora com excesso de impedância possui comportamento semelhante a uma bobina com falta de impedância, onde ocorre uma forte atenuação do sinal recebido. Para determinação deste ponto ótimo de impedância, testes com uma maior variedade de bobinas devem ser realizados.

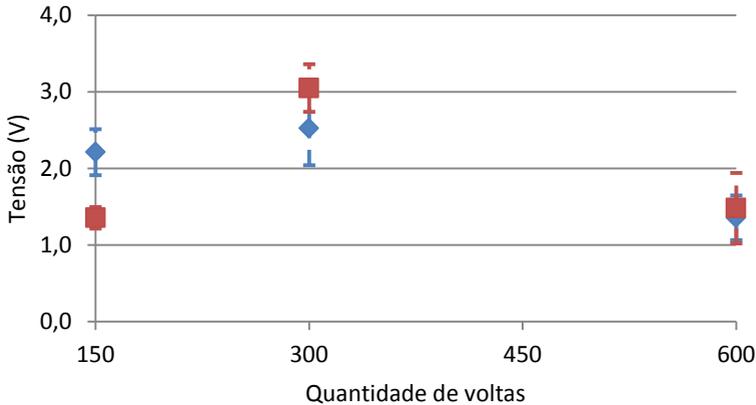
Como é possível observar nas Figuras 43 e 44, a inserção do capacitor de correção nem sempre traz o melhor resultado quanto à captação do sinal acústico. Fatores como quantidade de voltas que a bobina contém, e também, o tipo de enrolamento, devem ser levados em consideração para a realização do casamento de impedância.

Figura 43: Gráfico da análise da quantidade de voltas na bobina receptora quanto à captação do sinal acústico para bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 44: Gráfico da análise da quantidade de voltas na bobina receptora quanto à captação do sinal acústico para bobina circular alongada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

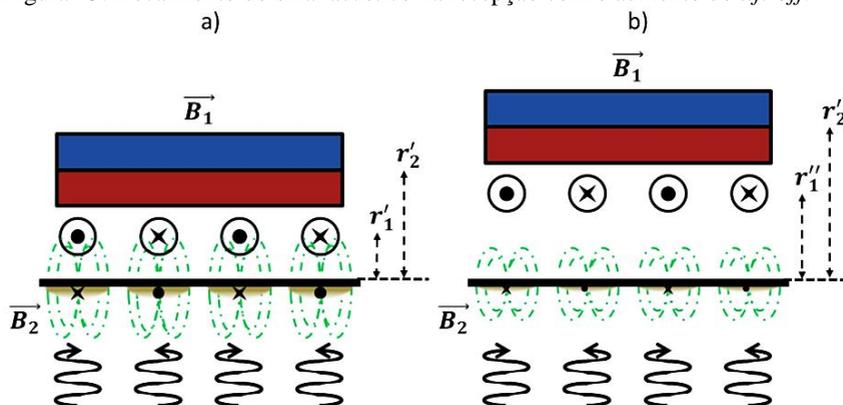
4.3.2 Avaliação da variação do *lift-off* para captação do sinal acústico

Da mesma maneira que a variação do *lift-off* afeta a geração do sinal acústico, sua detecção também é comprometida com o afastamento da bobina em relação à parede metálica, como ilustram as Figuras 46 e 47. Tal fato, que é ilustrado na Figura 45, pode também ser justificado pelas Equações 8 e 12.

Quanto maior a distância r entre o ímã que fornece o campo magnético estático (\vec{B}_1) e a parede do material metálico de interface, menor será a densidade de corrente induzida. Consequentemente, menor será o campo magnético variável (\vec{B}_2) que a corrente induzida irá gerar em torno de si. Quanto menor \vec{B}_2 , menor será a tensão que ele induzirá na bobina receptora, prejudicando assim a captação do sinal acústico.

A Figura 45 ilustra o comportamento do transdutor com o aumento do *lift-off*. Em (a), tem-se o transdutor na condição ótima de trabalho a zero *lift-off*. Em (b), o transdutor afastado da parede metálica, onde a redução da quantidade de corrente induzida e a diminuição do campo magnético variável por ela gerado são ilustradas. Fatores estes que resultam na diminuição da intensidade sonora percebida pela bobina receptora.

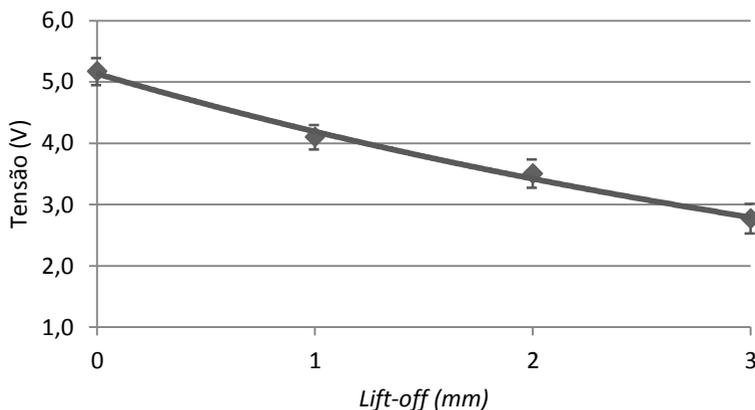
Figura 45: Decaimento do sinal acústico na recepção com o aumento do *lift-off*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

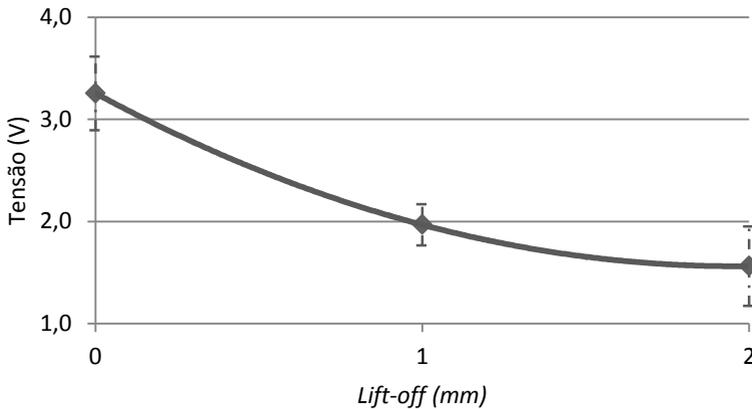
Para avaliação do comportamento da bobina receptora em relação ao *lift-off*, utilizou-se o método descrito no Item 4.2.3, onde, com a ajuda de espaçadores que variavam em comprimento de 1 em 1 milímetro, chegou-se aos resultados ilustrados nas Figuras 46 e 47.

Figura 46: Gráfico da análise da variação do *lift-off* quanto à captação do sinal acústico para bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 47: Gráfico da análise da variação do *lift-off* quanto à captação do sinal acústico para bobina circular alongada.

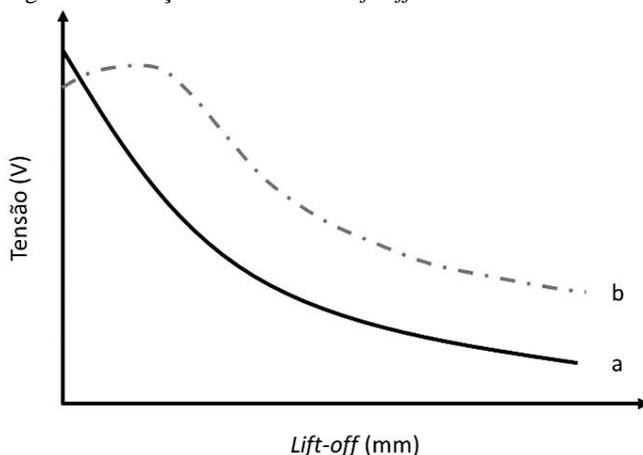


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme Item 3.2.1, o valor de impedância das bobinas desenvolvidas aumenta conforme elas se aproximam da parede metálica, foi também descrito, que o valor do capacitor de correção, para o casamento de impedância, foi calculado com as bobinas próximas à parede metálica.

Segundo *Ding et al.* [36], o valor alcançado em *lif-off*, por bobinas receptoras, pode ser melhorado com a utilização de um capacitor calculado com a bobina afastada da parede metálica, Figura 48. Como a impedância da bobina diminui com o afastamento em relação ao metal, o capacitor de correção, neste caso, fará com que a bobina alcance o pico de impedância com o aumento do *lift-off*.

Figura 48: Relação entre tensão e *lift-off* devido a escolha do capacitor de correção.



Fonte: Adaptado de [36].

Em (a), é ilustrado o método para casamento de impedância utilizado, enquanto que em (b), o melhoramento do sinal com o acréscimo do capacitor de correção calculado com a bobina afasta da parede metálica.

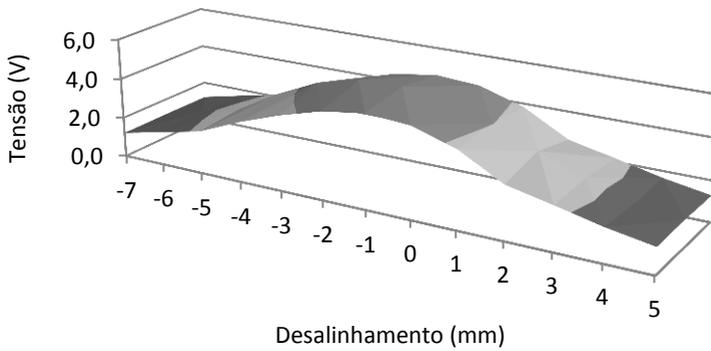
4.4 AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES NA INTENSIDADE DO SINAL ACÚSTICO CAPTADO

Outro teste válido para avaliação da viabilidade da utilização de transdutores EMAT para comunicação de dados, é em relação ao desalinhamento em que ambos os transdutores, de emissão e recepção, podem se encontrar, e mesmo assim ocorrer o envio e recebimento de sinais.

Como é possível observar nas Figuras 49, 50 e 51, tanto a bobina circular quanto circular alongada são bastante sensíveis ao desalinhamento. Para todas as bobinas desenvolvidas e testadas, conseguiu-se um desalinhamento entre centros equivalente a 32% do comprimento longitudinal ou transversal total da bobina receptora.

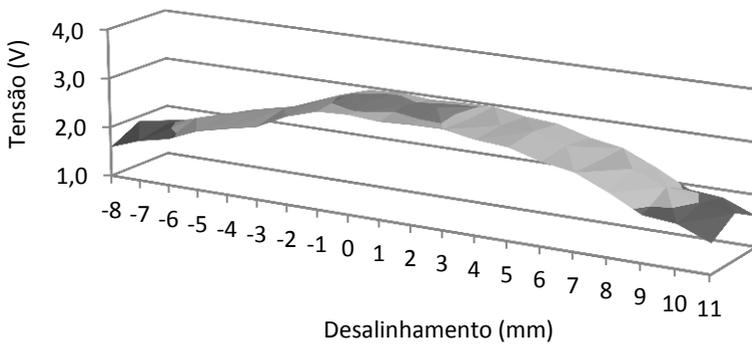
Embora para as bobinas de recepção desenvolvidas e testadas o valor de deslocamento seja de 32% do comprimento longitudinal ou transversal, devido à quantidade limitada de amostras estudadas não é possível afirmar que esse valor de desalinhamento seja uma constante para todo conjunto de bobinas EMAT de comunicação.

Figura 49: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre bobinas emissoras e receptoras, modelo circular.



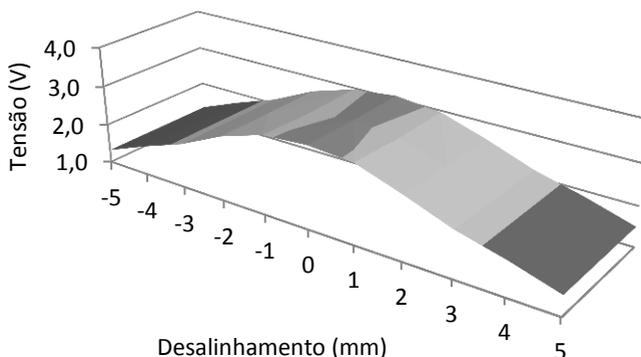
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 50: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre as bobinas emissora e receptora, modelo circular alongado, longitudinal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

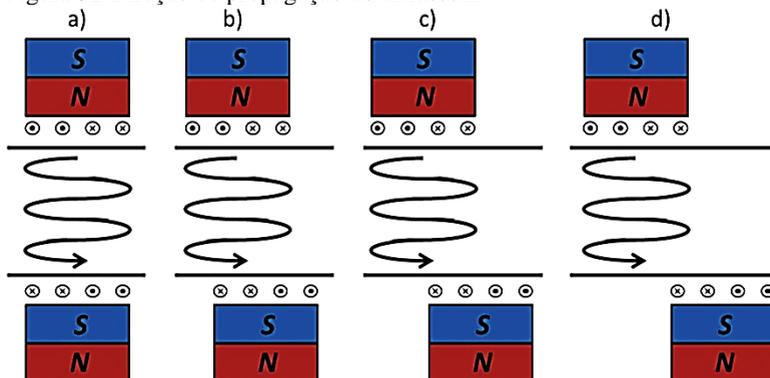
Figura 51: Gráfico da análise do decaimento do sinal acústico quanto ao desalinhamento entre as bobinas emissora e receptora, modelo circular alongado, transversal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O decaimento do nível de sinal ocorre, pois a onda acústica de corpo gerada pela bobina de emissão é unidirecional, como ilustra a Figura 52, e seu ângulo de propagação é de 90° em relação à superfície metálica. Desta maneira, quanto mais deslocado os centros das bobinas estiverem, menos onda propagada estará abaixo da bobina receptora, consequentemente, menor será a intensidade do sinal acústico sentido pela bobina.

Figura 52 Direção de propagação do ultrassom.



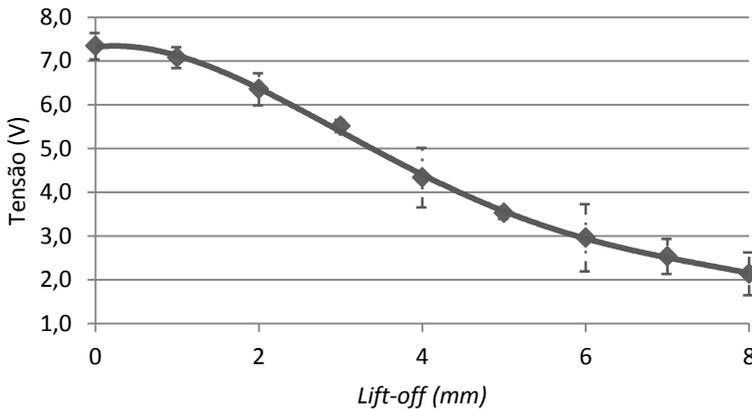
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.5 CONFIGURAÇÃO PIEZO-EMAT

Um dos objetivos do projeto é avaliar a possibilidade em se utilizar transdutores do tipo piezoelétrico comunicando-se com transdutores EMAT. Para tanto, um transdutor piezoelétrico da empresa *Olympus*, modelo V102, que possui frequência de trabalho centralizada em 1 MHz foi utilizado [43]. O transdutor em questão produz ondas longitudinais, e foi testado com as bobinas EMAT de recepção transversal contendo 300 voltas.

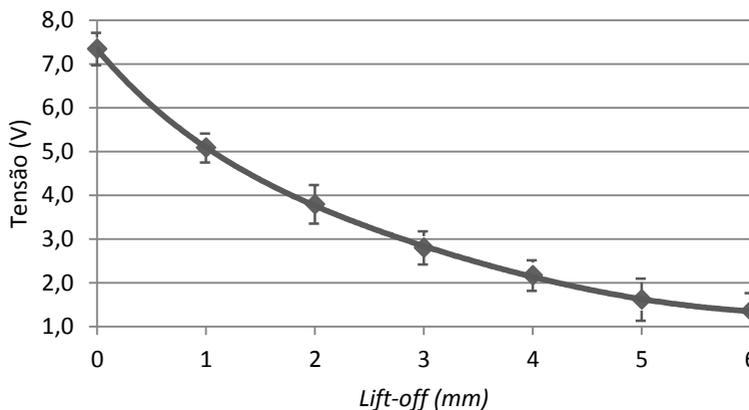
Como ilustrado nas Figuras 53 e 54, o fato de os transdutores trabalharem com ondas polarizadas de forma diferenciada, não foi um empecilho para o funcionamento da comunicação na configuração PIEZO-EMAT. Como é possível observar, a configuração em questão mostrou resultados satisfatórios.

Figura 53: Gráfico da análise da influência do *lift-off* quanto à geração do sinal acústico na configuração PIEZO-EMAT, bobina circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 54: Gráfico da análise da influência do *lift-off* quanto à geração do sinal acústico na configuração PIEZO-EMAT, bobina circular alongada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os testes foram realizados aplicando-se uma tensão de 5 V no transdutor piezo. Este valor foi escolhido, pois tensões mais altas geram ondas ultrassônicas de tamanha intensidade que ao serem sentidas pela bobina EMAT de recepção acabavam por saturar a placa pré-amplicadora de leitura do sinal, impossibilitando assim a leitura em tensão correspondente ao sinal acústico recebido.

Respeitaram-se as conclusões obtidas com as Figuras 36 e 37 em relação à quantidade de pastilhas de imã acopladas as bobinas receptoras, onde foi possível se observar uma saturação magnética depois de acrescentada 10 pastilhas de imãs ao transdutor. Como após esta quantidade de pastilhas de imã o acréscimo de campo magnético deixa de influenciar a geração de sinal acústico, os testes na configuração PIEZO-EMAT foram realizados com 10 pastilhas de imãs acoplados a bobina EMAT receptora.

Comparando as Figuras 46 e 47 com as Figuras 53 e 54, é possível observar que há uma melhora significativa na leitura do sinal ultrassônico gerado pelo transdutor PIEZO em relação ao transdutor EMAT desenvolvido. Na configuração EMAT-EMAT, o *lift-off* conseguido foi de 3 mm com a bobina circular, enquanto que na configuração PIEZO-EMAT sugerida conseguiu-se obter sinal a uma distância de 8 mm, o que representa um ganho de aproximadamente 260% em *lift-off*.

4.6 SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO

A quarta etapa de desenvolvimento, considerada como fase final, foi responsável por reunir os conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores, e buscar respostas aos objetivos anteriormente propostos.

Ao longo desta etapa de projeto, foram realizados os testes que avaliaram as influências das características construtivas das bobinas do transdutor para a geração do sinal acústico ultrassônico.

Os resultados ilustram a influência de cada variável para a geração do sinal acústico. Também são apresentados os resultados obtidos com um dos modelos desenvolvidos onde não foi possível obter comunicação, seguido de possíveis justificativas para o ocorrido.

Foi abordada a possibilidade de comunicação, na configuração PIEZO-EMAT, utilizando transdutores que apesar de compartilharem modos de onda diferentes (longitudinal/transversal), mostrou-se promissora. Superando as expectativas em termos de intensidade sonora percebida e *lift-off* alcançado.

Com base nos resultados dos gráficos apresentados no Item 4.2.1, foi proposto um novo enrolamento de bobina EMAT de emissão que se mostrou satisfatório, onde, eliminando-se os espaçamentos existentes entre cada volta da bobina, e diminuindo-se a espessura do fio que constitui a bobina, foi possível a obtenção do ganho em sinal acústico recebido referente a aproximadamente 1 V em relação as bobinas confeccionadas em placas de fenolite.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Transdutores acústicos eletromagnéticos, comumente conhecidos como EMATs, são altamente difundidos na indústria para avaliação da situação estrutural, em materiais metálicos, por meio de ensaios não destrutivos (NDT, *nondestructive testing*). O transdutor possui certas vantagens em relação a transdutores piezoelétricos, também utilizados para ensaios não destrutivos, pois não necessita de acoplamento com o material que se deseja inspecionar, e também, por poder atuar a distância do material de inspeção. Característica esta denominada *lift-off*. Em contrapartida, sua eficiência energética, ou seja, a relação de transformação entre energia elétrica – ultrassom / ultrassom – energia elétrica é várias vezes menor se comparada a transdutores do tipo piezoelétricos. Porém, a não necessidade de acoplamento e a possibilidade de se trabalhar com o transdutor afastado do material metálico, torna este tipo de transdutor atrativo tanto para o meio acadêmico quanto industrial.

Com a finalidade de se desenvolver um sistema de comunicação por meio de ultrassom, tomou-se como objetivo desta dissertação a avaliação das características construtivas de transdutores EMAT para uma boa emissão e recepção de sinal acústico. Foram avaliados além do tipo de enrolamento, a largura do fio, o espaçamento entre eles, a quantidade de ímãs necessária para a realização da comunicação, bem como o efeito *lift-off* sobre o sinal sonoro gerado e a influência exercida pela descentralização dos transdutores. Para avaliação das características construtivas foram realizadas baterias de testes onde foram variadas as características mencionadas.

A estrutura do projeto foi dividida de acordo com os itens que seguem:

- Introdução: onde foram levantados os objetivos do projeto;
- Revisão literária e referencial teórico: onde foi realizado um aprofundamento sobre os fundamentos físicos envolvidos no funcionamento dos transdutores EMAT;
- Transdutores acústicos eletromagnéticos: onde foram definidos os tipos de bobinas a serem desenvolvidas, e também, o que difere entre as bobinas quanto a geração de ultrassom;
- Testes e resultados: onde foram avaliadas as características construtivas dos transdutores desenvolvidos, e também, aonde foi avaliada a possibilidade de comunicação na configuração PIEZO-EMAT.

Durante o desenvolvimento do projeto algumas dificuldades foram evidenciadas, como por exemplo: a fabricação das placas emissoras e

receptoras com enrolamento em fio de cobre. As bobinas de emissão foram construídas sem espaçamento entre os enrolamentos, o que foi dificultado devido ao pequeno tamanho e também a necessidade do paralelismo entre as voltas. Já as bobinas receptoras foram construídas com fio de cobre de diâmetro pequeno, o que acabou dificultando o enrolamento das bobinas que possuíam um elevado número de voltas. Por várias vezes o fio se rompeu na metade do processo de fabricação.

Os testes para avaliação da influência das trilhas do transdutor evidenciaram algo que já havia sido previsto com os estudos teóricos sobre o funcionamento do transdutor. Quanto menor o diâmetro do fio que constitui a bobina, e, quanto menor o espaçamento entre os enrolamentos que compõem a bobina, melhor ela será para geração de sinal acústico, pois maior será o número de voltas que constituem a bobina emissora abaixo da área ativa do imã, conseqüentemente, maior será a corrente de *Foucault* produzida pela bobina emissora. Potencializando assim a emissão de sinal acústico ultrassônico.

Inicialmente acreditava-se que o campo magnético do transdutor aumentava linearmente com o acréscimo de mais imãs a sua estrutura. Após a realização dos testes ilustrados nas Figuras 36 e 37, e não compreendendo os resultados alcançados, descobriu-se com uma pesquisa mais aprofundada, que este aumento não ocorre de forma linear, e também, que há um ponto de saturação de campo magnético. Acontece que cada pastilha do imã representa um dipolo magnético bem definido, e por conseqüência, possui um campo magnético próprio bem definido. Ao se acrescentar mais pastilhas magnéticas ao transdutor, acrescentam-se vários campos magnéticos que perdem intensidade à medida que se afastam da parede metálica (interface de comunicação), logo, o campo magnético total que atua nas partículas induzidas na parede metálica, é representado pela somatória da resultante de todos os campos magnéticos acoplados ao transdutor EMAT. O que justifica a estabilização ilustrada pelas Figuras 36 e 37 após adicionada a quantidade de imãs referente a 10 pastilhas de imãs ao transdutor.

O *lift-off*, que prejudica a intensidade sonora gerada ou captada pelo transdutor, também é influenciado pelo campo magnético estático devido ao mesmo problema citado anteriormente. Quanto maior a distância do transdutor em relação à parede metálica, menor a intensidade de campo magnético estático que atua na geração/recepção do sinal acústico, por sua vez, menor é a eficiência do transdutor.

Três foram os modelos de bobina EMAT desenvolvidas, porém, somente dois destes modelos apresentaram resultados satisfatórios, sendo elas as bobinas circular e circular alongada. A bobina em formato de

meandro não apresentou resultado, pois não foi possível a realização de comunicação. Acredita-se que este fato tenha ocorrido devido ao formato peculiar da bobina em meandro. Acredita-se que a bobina receptora deva possuir a mesma quantidade de voltas que a emissora, para que não haja assim o cancelamento acústico na bobina receptora. Acredita-se que seja possível a realização de comunicação com este modelo de bobina, no entanto, as bobinas, tanto emissora quanto receptora, devem respeitar o espaçamento entre trilhas sugerido pela Equação 9, e também, a bobina receptora deva possuir um número maior de voltas completas.

Uma configuração de comunicação utilizada no projeto, e surpreende por ter funcionado tão bem, é a configuração PIEZO-EMAT, onde, o transdutor do tipo piezoelétrico, que gera ondas do tipo longitudinal, conseguiu se comunicar com a bobina EMAT circular e circular alongada configurada para o recebimento de ondas transversais. Não se sabe ao certo como foi possível a comunicação entre esses dois transdutores que compartilham formas de onda tão distintas, porém, com a análise do tempo de onda recebida pelas bobinas emisoras, acredita-se que o transdutor PIEZO esteja gerando tanto onda longitudinais quanto transversais. Tornou assim possível a bobina EMAT receptora captar as variações de fluxo magnético geradas, na parede metálica, pela interação entre sinal ultrassônico e campo magnético estático devido a alta eficiência de transdução do transdutor PIEZO.

Com os resultados apresentados é possível evidenciar claramente o que influencia ou não na geração do sinal acústico ultrassônico. É possível observar que o objetivo de comunicação em baixa potência é viável. Os estudos aqui apresentados servem para clarear ainda mais os entendimentos sobre o funcionamento deste tipo de transdutor tão comumente utilizado na indústria NDT. E avivar possíveis pesquisadores sobre as possibilidades que este método de comunicação oferece.

Os resultados deste trabalho serviram para auxiliar o desenvolvimento de um sistema de comunicação dinâmica, onde foi possível realizar transferência de dados de medição com o dispositivo móvel percorrendo o interior de um tubo à velocidade de 2 m/s.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Transdutores EMAT se mostram promissores como meio de comunicação através de paredes metálicas, no entanto, alguns estudos ainda se fazem necessários para um total entendimento sobre o modo de funcionamento do transdutor. Para tanto, os seguintes tópicos são sugeridos como temas para trabalhos futuros:

- Comparação dos resultados obtidos com modelos computacionais, baseados em elementos finitos, no intuito de validar o modo de funcionamento do transdutor;
- Estudo do mecanismo de funcionamento entre transdutores que compartilham tipos diferenciados de ondas acústicas (longitudinal e transversal);
- Avaliação da influência do capacitor de correção, quando calculado com a bobina afastada da parede metálica, no que diz respeito à qualidade de recepção do sinal acústico;
- Avaliação da influência exercida pela ferrite sobre a detecção do sinal ultrassônico.

REFERÊNCIAS

- [1] REFINARIA DE PETRÓLEO RIOGRANDENSE, **Refinaria**, 2011. Disponível em: <<http://www.refinariariograndense.com.br/refinaria/>>. Acesso em: 23 Setembro 2011.
- [2] TIERRAMÉRICA, **Vazamento de petróleo**, C2001. Disponível em: <<http://www.tierramerica.net>>. Acesso em: 23 Setembro 2011.
- [3] RODRIGUES, A. F., et al. **Avaliação geotécnica e ambiental da zona de influência do duto petrolífero no município de Mangaratiba (RJ), com a utilização da técnica de avaliação do terreno**. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Outubro 2005.
- [4] CORRER, C. J., et al. Aplicação “IN SITU” de surfactantes em solo contaminado com petróleo e tratamento da água residual com agentes oxidantes. **4º PDPETRO**, Outubro 2007.
- [5] 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, Dezembro 2000.
- [6] TIBURTIUS, E. R. L., ZAMORA, P. P., LEAL, E. S. Contaminação de águas por BTXS e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 441-446, Junho 2004.
- [7] CORDELL, J., VANZANT, H. **The pipeline pigging handbook**. USA: Clarion Technical Publishers and Scientific Surveys Ltd., 2003. 249 p.
- [8] BELLER, M., REBER, K., SCHNEIDER, U. Tools, vendors, services – a review of current in-line inspection technologies, 2002.
- [9] SARKIS, C. D. **Blindagem Eletromagnética**, Belo Horizonte, 2000. [Trabalho acadêmico]. Disponível em: <www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab5.pdf>. Acesso em: 23 Setembro 2011.
- [10] HEHL, F. W., OBUKHOV, Y. N. **Foundations of classical electrodynamics**. Junho 2001, 458 p.
- [11] BREWSTER, H. D. **Electromagnetism**. Oxford Book Company, 2010. 286 p.

- [12] ENSMINGER, D., STULEN, F. B. **Ultrasonics: data, equations and their practical uses**. USA: CRC Press, 2009. 510 p.
- [13] RODRÍGUE, A. A., VALLI, A. **Eddy current approximation of Maxwell equations**. USA: Springer, 2010. 361 p.
- [14] BOBROV, V. T., SAMOKRUTOV, A. A., SHEVALDYKIN, V. G. **Electromagnetic-acoustic transducers for in-service manual testing of heated objects**. In: 17th World conference on nondestructive testing, Shanghai, Outubro 2008.
- [15] JIAN, X., DIXON, S., QUIRK, K. **Electromagnetic acoustic transducers for in and out of plane ultrasonic wave detection**. In: 17th World conference on nondestructive testing. Shanghai, Outubro 2008.
- [16] ZHAO, X., et al. In-line nondestructive inspection of mechanical dents on pipelines with guided shear horizontal wave electromagnetic acoustic transducers. **Journal of Pressure Vessel Technology**. v. 127, n. 3, p. 304-309, Abril 2005.
- [17] GRAHAM, D. J., NEASHAM, J. A., SHARIF, B. S. High bit rate communication through metallic structures using electromagnetic acoustic transducers. **OCEANS**, p. 972-977, Maio 2009.
- [18] TALUKDAR, K. Development of a new acoustic communication technology for ballast water exchange compliance. **OCEANS, Proceedings of MTS**. v. 1, p. 363-368, 2005.
- [19] HOSMAN, T., et al. **Multi-tone FSK for ultrasonic communication**. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), p. 1424-1429, Maio 2010.
- [20] MINIPA, **MPL-3303M**, 2011. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/Caracteristicas.aspx?ID_Sub_Categoria=35&ID=456>. Acesso em: 29 Junho 2012.
- [21] NATIONAL INSTRUMENTS, **NI PXI-5441**. Disponível em: <http://www.ni.com/pdf/products/us/pxi_5441.pdf>. Acesso em: 29 Junho 2012.

- [22] CIRRUS LOGIC, **PA119**, 2001. Disponível em:
<<http://www.cirrus.com/en/products/pa119.html#>>. Acesso em: 29 Junho 2012.
- [23] SCHMITZ, C. R., **Desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicação por ultrassom através de paredes metálicas**. 2013. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.
- [24] AGILENT TECHNOLOGIES, **Oscilloscope**, 2012. Disponível em:
<<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-536902796.536880783.00&lc=por&cc=BR>>. Acesso em: 15 Agosto 2012.
- [25] HIRAO, M., SOGI, H. **EMATS for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements**. USA: Springer, 2003. 392 p.
- [26] UNIVERSITY OF CINCINNATI, **ClassNotes**. Disponível em:
<<http://www.ase.uc.edu/~pnagy/ClassNotes/>>. Acesso em: 18 Outubro 2011.
- [27] WIKIPEDIA, **Magnetismo**, 2012. Disponível em:
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetismo>>. Acesso em: 13 Fevereiro. 2012.
- [28] CULLITY, B. D. **Introduction to magnetic materials**. USA: Addison-Wesley, 1972. 666 p.
- [29] YOUNG H. D., FREEDMAN R. A. **Física III – Eletromagnetismo**. Brasil: Pearson, 2010. 422 p.
- [30] PAUL, A. T., MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. Brasil: Gen LTC, 2009. 530 p.
- [31] SISMO, **Sismo nunca mais**. Disponível em:
<<http://sismosesmp.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2012.
- [32] LABCENTER ELETRONICS, **Proteus**. Disponível em:
<<http://www.labcenter.com/index.cfm>>. Acesso em: 20 Maio 2012.

- [33] MIRKHAMI, K., et al. Optimal design of EMAT transmitters. **NDT & E International**, v. 37, n. 3, p.181-193, Abril 2004.
- [34] YANG, Z., YE, P. Design of electromagnetic acoustic transducer for wheel flaw detection. **Mechanical Automation and Control Engineering (MACE)**, p. 2501-2504, Junho 2010.
- [35] LUDWIG, R., YOU, Z., PALANISAMY, R., Numerical Simulations of na Electromagnetic Acoustic Transducer-Receiver System for NDT Applications. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 29, n. 3, p. 2081-2089, Maio 1993.
- [36] DING, X., et al. **Lift-off Performance of Receiving EMAT Transducer Enhanced by Voltage Resonance**. In: 18th World Conference on Nondestructive Testing, South Africa, Abril 2012.
- [37] INEP, **Instituto de Eletrônica de Potência**. Disponível em: <<http://www.inep.ufsc.br/index.php>>. Acesso em: 06 Junho 2012.
- [38] AGILENT TECHNOLOGIES, **Precision Impedance Analyzer**, 2012. Disponível em: <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-33831.536879654.00&lc=por&cc=BR>>. Acesso em: 15 Agosto 2012.
- [39] ABNT, **Guia de projeto e uso da placa impressa**. NBR 8188, Setembro 1983.
- [40] JIAN, X., et al. Electromagnetic acoustic transducers for in- and out-of plane ultrasonic wave detection. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 148, n. 1, p. 51-56, Novembro 2008.
- [41] SASLOW, W. M. **Electricity, Magnetism and Light**. USA: Thomson Learning, 2002. 800 p.
- [42] ORTIZ, Wilson. **Dúvida sobre Magnetismo**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <probstgabriel@gmail.com > em 7 de Março de 2013.
- [43] OLYMPUS, **Flaw Detectors**, 2011. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/contact-transducers/>> Acesso em: 01 Novembro 2011.