

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
CAMPUS SALVADOR

Desenvolvimento de um protótipo para inspeção de tubos isolados por meio da
técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas

João Carlos Simões Queiroz

Salvador
Dezembro de 2023

Desenvolvimento de um protótipo para inspeção de tubos isolados por meio da técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas

João Carlos Simões Queiroz

Trabalho de conclusão de curso do Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais (PPGEM) – do Instituto Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva.

Salvador
Dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Q384d Queiroz, João Carlos Simões

Desenvolvimento de um protótipo para inspeção de tubos isolados por meio da técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas / João Carlos Simões Queiroz; orientador Ivan Costa da Silva -- Salvador, 2023.

89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Correntes parasitas pulsadas. 2. Tubulação isoladas. 3. Ensaio não destrutivo. 4. Corrosão. I. Silva, Ivan Costa da, orient. II. TÍTULO.

CDU 620.193

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS -
PPGEM

AVALIAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

IDENTIFICAÇÃO

NOME DO(A) MESTRANDO(A): João Carlos Simões Queiroz	MODALIDADE: <input type="checkbox"/> QUALIFICAÇÃO <input checked="" type="checkbox"/> DEFESA
TÍTULO DO TRABALHO: “Desenvolvimento De Um Protótipo Para Inspeção De Tubos Isolados Por Meio Da Técnica Não Destrutiva De Correntes Parasitas Pulsadas”	

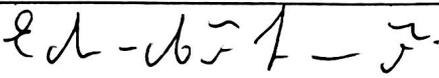
PARECER:

O aluno demonstrou comprometimento e proatividade no decorrer do curso de mestrado. O produto desenvolvido tem potencial comercial e científico com grau de desenvolvimento suficiente para concessão do título de mestre.

DECISÃO:

APROVADO APROVADO COM RESTRIÇÕES REPROVADO

Salvador – BA, 18 de dezembro de 2023

 Prof. Dr. Ivan Costa da Silva Orientador PPGEM/IFBA	 Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho Examinador Externo SENAI/CIMATEC
 Prof. Dr. Davi Franco Rego Examinador Interno IFBA	 Prof. Dr. Eduardo Furtado Simas Filho Examinador Externo PPGEE/UFBA

Resumo da qualificação da pesquisa apresentada ao IFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Desenvolvimento de um protótipo para inspeção de tubos isolados por meio da técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas

João Carlos Simões Queiroz

Dezembro/2023

Orientador: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva.

Programa: Engenharia de Materiais

No contexto industrial, tubulações, tanques e trocadores de calor desempenham papéis fundamentais, mas com o tempo, esses componentes vitais sofrem degradação devido às mudanças microestruturais e à corrosão sob isolamento, que acarreta na perda de espessura do ativo. Muitas vezes, esses problemas são difíceis de identificar visualmente, tornando as manutenções periódicas custosas, sendo comum a substituição de peças com vida útil remanescente ou um problema mais grave, que é a possível ocorrência de uma falha estrutural destrutiva. Para solucionar esse desafio, os ensaios não destrutivos (ENDs) são empregados, permitindo a detecção de defeitos sem comprometer a funcionalidade dos equipamentos. Uma abordagem eficaz é a técnica de correntes parasitas pulsadas (PEC – *Pulsed eddy currents*), que se baseia na lei de indução eletromagnética de Faraday. Atualmente, empresas oferecem equipamentos de PEC, mas o desenvolvimento de uma alternativa nacional, eficiente e acessível, é essencial para atender às demandas da indústria brasileira, proporcionando flexibilidade e soluções personalizadas. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo nacional de PEC para atender às necessidades específicas da indústria do país. Foram realizados testes em dois corpos de prova com diâmetros e volumes de defeitos diferentes, variando-se a altura do *lift-off* em 16, 21 e 24 mm. Os sinais capturados pelo protótipo foram classificados utilizando o decaimento do sinal e o valor de pico. Os defeitos com o *lift-off* de 16 mm foram medidos com sucesso. Com 21 mm de *lift-off* foi possível separar somente a região sem defeito das com defeito. Com 24 mm não foi possível fazer a medição. Também foram capturados sinais com o equipamento da EddyFi e os resultados foram comparados com o protótipo desenvolvido.

Palavras-chave: Correntes parasitas pulsadas; Tubulação Isoladas; Ensaios Não Destrutivos; Corrosão

Abstract of the research qualification submitted to the IFBA as part of the requirements for obtaining a master's degree in Materials Engineering.

Development of a prototype for tube inspection using the non-destructive technique Pulsed Eddy Currents.

João Carlos Simões Queiroz

Dezember/2023

Advisor: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva.

Department: Materials Engineering

In the industrial context, pipes, tanks and heat exchangers play fundamental roles, but over time, these vital components suffer degradation due to microstructural changes and corrosion under insulation, which leads to a loss of thickness in the asset. Often, these problems are difficult to identify visually, making periodic maintenance costly, and it is common to replace parts with a useful life remaining or a more serious problem, which is the possible occurrence of a destructive structural failure. To solve this challenge, non-destructive testing (NDT) is used, allowing defects to be detected without compromising the functionality of the equipment. One effective approach is the pulsed eddy current (PEC) technique, which is based on Faraday's law of electromagnetic induction. Currently, companies offer PEC equipment, but the development of a national, efficient and affordable alternative is essential to meet the demands of Brazilian industry, providing flexibility and customized solutions. This work aims to develop a national PEC prototype to meet the specific needs of the country's industry. Tests were carried out on two specimens with different diameters and defect volumes, varying the lift-off height by 16, 21 and 24 mm. The signals captured by the prototype were classified using signal decay and peak value. Defects with a lift-off of 16 mm were successfully measured. With a lift-off of 21 mm, it was possible to separate only the region without defects from those with defects. At 24 mm, classification was not possible. Signals were also captured using EddyFi equipment and the results were compared with the prototype developed.

Keywords: Pulsed eddy currents; Insulated tubes; Nondestructive Testing; Corrosion.

*A conclusão deste trabalho resume-se em dedicação.
Dedicação que vi ao longo dos anos em cada um dos
professores deste curso, a quem dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de dar mais um passo significativo na minha vida.

Também, quero expressar minha gratidão ao meu orientador, Ivan Costa da Silva, e à professora Claudia Teresa Teles Farias, em especial por sua paciência e por me incentivarem nos momentos em que minha motivação flutuava.

Sou grato ao PPGEM e ao GPEND por oferecer um suporte tão valioso para estudantes de ensaios não destrutivos.

Não posso deixar de mencionar meu amigo Ygor Tadeu Bispo dos Santos, que me apoiou na realização dos ensaios, compartilhou conhecimentos sobre ensaios não destrutivos e me deu conselhos valiosos nos momentos mais desafiadores.

Agradecer ao SENAI – CIMATEC por me permitir utilizar o equipamento LIFT para fazer a captura de sinais.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais, que desde a minha infância me incentivaram a acreditar que o estudo e o conhecimento são não apenas necessários, mas também nossas maiores riquezas.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos.....	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Princípio básico da técnica.....	17
2.2. Propriedades dos materiais que influenciam a técnica	19
2.2.1. Condutividade elétrica	19
2.2.2. Permeabilidade magnética.....	20
2.2.3. Excitação.....	20
2.2.4. Distância da peça (<i>lift-off</i>).....	21
2.3. Modelos de sondas.....	23
2.3.1. Sonda diferencial com núcleo de ar	23
2.3.2. Sonda diferencial com núcleo de ferrite.....	24
2.3.3. Sonda com sensores de estado sólido.....	25
2.3.4. Resumo das características das sondas.....	27
2.4. Principais parâmetros para análise	28
2.4.1. Valor de pico	28
2.4.2. Tempo do valor de pico.....	29
2.4.3. Decaimento do sinal.....	31
2.4.4. Tempo até atingir o zero.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. Materiais.....	35
3.1.1. Corpos de prova.....	35
3.1.2. Unidade de controle e processamento.....	36
3.1.3. Placa conversora analógico para digital	37
3.1.4. Tela	39
3.1.5. Teclado wireless	39
3.1.6. Fontes de alimentação.....	40
3.1.7. Programas utilizados.....	40
3.1.7.1. Visual Studio Code.....	40
3.1.7.2. Python 3.....	41
3.1.7.3. VNC Viewer.....	41
3.1.7.4. LTspice.....	41
3.1.7.5. EasyEDA	42
3.1.7.6. FreeCAD.....	42
3.1.8. Eddyfi - Lyft.....	42
3.1.9. Resumo dos custos.....	43
3.2. Métodos	44
4. RESULTADOS	46
4.1. Programação em Python 3 (Interface com o usuário).....	46
4.2. Sistema eletrônico.....	50
4.3. Sonda	56
4.4. Caixa do aparelho.....	57
4.5. Testes.....	59
4.5.1. Corpo de prova 1	59
4.5.1.1. Teste usando <i>lift-off</i> de 16 mm	59
4.5.1.2. Teste usando <i>lift-off</i> de 21 mm	61

4.5.1.3.	Teste usando <i>lift-off</i> de 24 mm	63
4.5.2.	Corpo de prova 2	67
4.5.2.1.	Teste usando <i>lift-off</i> de 16 mm	67
4.5.2.2.	Teste usando <i>lift-off</i> de 21 mm	69
4.5.2.3.	Teste usando <i>lift-off</i> de 24 mm	72
4.5.3.	Análise de erro.....	75
4.5.3.1.	Corpo de prova 1	76
4.5.3.1.1.	Erro usando o valor de pico.....	76
4.5.3.1.2.	Erro usando o coeficiente de decaimento exponencial.....	76
4.5.3.1.3.	Erro usando o coeficiente de decaimento do Ln(V).....	77
4.5.3.2.	Corpo de prova 2	78
4.5.3.2.1.	Erro usando o valor de pico.....	78
4.5.3.2.2.	Erro usando o coeficiente de decaimento exponencial.....	78
4.5.3.2.3.	Erro usando o coeficiente de decaimento do Ln(V).....	79
5.	CONCLUSÃO	80
6.	REFERÊNCIAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio da técnica de PEC. Adaptada de (Sophian et al., 2017).....	17
Figura 2 - Relação entre a largura do pulso com as correntes parasitas. Adaptada de (J. Li et al., 2015b).....	21
Figura 3 - Efeito do <i>lift-off</i> na medição de espessura. Adaptada de (Tian & Sophian, 2005a).	22
Figura 4 - Ponto de LOI no sinal de PEC. Adaptada de (D. Park et al., 2012).	23
Figura 5 - Modelagem de sonda diferencial. Adaptada de (Cadeau & Krause, 2009).	24
Figura 6 - Sonda diferencial com duas bobinas sensores (Shin et al., 2009).	24
Figura 7 - Sondas com três configurações de ferrite. Adaptada de (Arjun et al., 2015).	25
Figura 8 - (a) Sonda circular com 4 sensores GMR; (b) Sinais das 4 sondas. Adaptada de (Majidnia et al., 2014).....	26
Figura 9 - (a) Sonda circular com sensor Hall; (b) PCA do sinal. Adaptada de (Tian et al., 2005).	27
Figura 10 - Variação do valor de pico de acordo com a espessura da chapa. Adaptada de (Zhao et al., 2019).	28
Figura 11 - Variação do valor de pico com relação a tensão. Adaptada de (Morozov et al., 2010).	29
Figura 12 - Tempo de subida do pico. Adaptada de (He et al., 2010).....	30
Figura 13 - Variação do tempo de pico com relação ao <i>lift-off</i> . Adaptada de (Yang et al., 2020).	30
Figura 14 - Variação do tempo de pico com relação a espessura de parede. Adaptada de (Z. Xu et al., 2012).	31
Figura 15 - Sinal de PEC em função de $\ln[V(t)]$. Adaptada de (Ulapane, Thiyagarajan, et al., 2019)	32
Figura 16 - Sinal de PEC usando sensor Hall. Adaptada de (Praphaphankul et al., 2023).....	33
Figura 17 - Relação do tempo de pico e tempo que atingiu o zero. Adaptada de (He et al., 2011).....	34
Figura 18 - Desenhos do CP 1. Medidas em milímetros.....	35
Figura 19 - Desenhos do CP 2. Medidas em milímetros.....	36
Figura 20 - Raspberry pi com os periféricos.	37
Figura 21 - Placa conversora analógico para digital.....	38
Figura 22 - Diagrama de blocos da USB-204 (Computing, 2019).....	38
Figura 23 - Tela XPT2046.....	39

Figura 24 - Teclado sem fio.....	39
Figura 25 - (a) Fonte do tipo colmeia. (b) Fonte para o Raspberry pi.	40
Figura 26 - Eddyfi Lyft. (a) Lyft. (b) Sondas. (c) Tabela para seleção de sonda. Fonte: eddyfi.com/en/product/lyft (adaptada).....	43
Figura 27 - Fluxograma dos metodos utilizados para desenvolvimento do equipamento.	44
Figura 28 - Fluxograma do processamento do sinal.....	46
Figura 29 - Tela inicial do programa do equipamento. (a) Sinal com escala linear. (b) Sinal com escala em função do logaritimo natural da tensão. (c) Sinal com escala linear com referência.....	47
Figura 30 - Tela inicial do programa com marcações. (a) Principais funções. (b) Configurações. (c) Valor de decaimento.	48
Figura 31 - Sequência de ações ao pressionar o botão de capturar.....	49
Figura 32 - Sequência de ações ao pressionar o botão de referência.....	49
Figura 33 - Sequência de ações ao pressionar o botão de salvar.	50
Figura 34 - Sequência de ações ao selecionar o tipo de plotagem.....	50
Figura 35 - Circuito de potência.	51
Figura 36 - Circuito de simulação no LTspice.....	52
Figura 37 - Sinais da simulação do circuito. (a) Pulso de entrada do Mosfet. (b) Sinal da bobina sensora. (c) Sinal na bobina emissora.....	53
Figura 38 - (a) Face superior da PCB. (b) Face inferior da PCB. (c) Modelagem da PCB. (d) PCB crua usinada. (e) Face superior com os componentes. (f) Face inferior com os componentes.	54
Figura 39 - Esquemático dos componentes do equipamento.	55
Figura 40 - Disposição dos componentes no equipamento.	56
Figura 41 - Vista explodida da sonda utilizada.....	56
Figura 42 - Dimensões da sonda em mm. (a) Carretel externo. (b) Carretel interno. (c) Ferrite.	57
Figura 43 - Sonda. (a) Sonda na case. (b) Sonda fora da case.	57
Figura 44 - Modelo 3D da caixa do equipamento.	58
Figura 45 - Dimensões da caixa do equipamento.....	58
Figura 46 - Foto do equipamento ao lado do CP 1.	59
Figura 47 - Sonda sobre a o isolamento.....	60

Figura 48 - Sinais capturados com 16 mm de <i>lift-off</i> . (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	61
Figura 49 - Sonda sobre o isolamento mais 5 mm.....	62
Figura 50 - Sinais capturados com 16 mm de <i>lift-off</i> . (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	63
Figura 51 - Sonda sobre a o isolamento mais 8 mm.	64
Figura 52 - Sinais capturados com 16 mm de <i>lift-off</i> . (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	65
Figura 53 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 4.	66
Figura 54 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 5.	66
Figura 55 - Sonda sobre a o <i>lift-off</i> de 16 mm.	68
Figura 56 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	69
Figura 57 - Sonda sobre a o Lift-off de 21 mm.	70
Figura 58 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	71
Figura 59 - Sonda sobre a o Lift-off de 24 mm.	72
Figura 60 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.	73
Figura 61 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 9.	74
Figura 62 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 10.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros e da influência dos tipos de sondas.....	27
Tabela 2 - Custos dos componentes para montagem do equipamento.....	43
Tabela 3 - Afastamento da sonda em relação a superfície metálica dos CPs.	59
Tabela 4 - Coeficientes de decaimento dos sinais exponenciais (V/s) x 10 ⁻⁴	65
Tabela 5 - Coeficientes de decaimento dos sinais em logaritmo natural (Ln(V)/s) x 10 ⁻⁴	66
Tabela 6 - Medição de espessura com 16 mm de <i>lift-off</i>	67
Tabela 7 - Medição de espessura com 21 mm de <i>lift-off</i>	67
Tabela 8 - Medição de espessura com 24 mm de <i>lift-off</i>	67
Tabela 9 - Coeficientes de decaimento dos sinais exponenciais (V/s) x 10 ⁻⁴	73
Tabela 10 - Coeficientes de decaimento dos sinais em logaritmo natural (Ln(V)/s) x 10 ⁻⁴	74
Tabela 11 - Medição de espessura com 16 mm de <i>lift-off</i>	75
Tabela 12 - Medição de espessura com 21 mm de <i>lift-off</i>	75
Tabela 13 - Medição de espessura com 24 mm de <i>lift-off</i>	75
Tabela 14 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 11.	76
Tabela 15 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 12.	77
Tabela 16 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 13.	78
Tabela 17 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 14.	78
Tabela 18 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 15.....	79
Tabela 19 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 16.....	79

1. INTRODUÇÃO

Quando ouve-se falar em indústrias, lembra-se logo das máquinas, dos grandes tanques e trocadores de calor. Todos esses equipamentos são como músculos que auxiliam no processo de produção. Porém, com o passar do tempo esses componentes vitais começam a se degradar, seja pela redução a espessura de uma chapa, por conta dos agentes de processos (Pawar et al., 2020) ou corrosão sob isolamento (CUI - Corrosion under insulation), fenômeno que ocorre quando a umidade é retida sob isolamentos térmicos, revestimentos ou proteções externas, criando um ambiente propício para a corrosão de metais. A CUI pode ser especialmente perigosa, pois muitas vezes é invisível a olho nu, o que dificulta sua detecção precoce (Cao et al., 2023). Mudanças na estrutura cristalina do material (Santos et al., 2020) também podem fragilizar o material, a ponto de causar falhas catastróficas (N. Xu et al., 2020).

Com o intuito de reduzir os riscos, são realizadas manutenções periódicas em pontos críticos do sistema, nos quais muitas vezes, as peças são substituídas sem que seja realizado uma investigação do seu estado atual. Este procedimento é bastante custoso, pois, na maioria das vezes, as peças substituídas ainda têm parte da sua vida útil e não prejudicam a segurança do ativo.

Os desafios mencionados são extremamente complexos, quase impossíveis de serem identificados visualmente ou devido à inacessibilidade. Por esse motivo, os ensaios não destrutivos (ENDs) oferecem uma abordagem para descobrir ou localizar esses defeitos em equipamentos, sem prejudicar sua utilização posterior. São utilizados para garantir o pleno funcionamento e qualidade da peça estudada, podendo ser empregados desde a captação da matéria prima, na etapa fabril ou durante a operação (Deepak et al., 2021) (El Masri & Rakha, 2020) (Queiroz et al., 2021). Utilizando os ENDs em pontos específicos da planta, pode-se obter um mapeamento das condições dos equipamentos e desenvolver um plano de manutenção mais eficaz e menos custoso (Gómez de León Hijes et al., 2020).

Uma maneira de realizar a inspeção é por meio da técnica de correntes parasitas pulsadas (PEC – do inglês *Pulsed Eddy Currents*), que utiliza os princípios da lei de indução de Faraday para gerar sinais (Sophian et al., 2017). A técnica apresenta uma disponibilidade para automação, como mostrado em (F. Xie et al., 2021), que utilizou PEC para detecção automática de defeitos no cordão de solda de um cilindro de um vaso de pressão. Outra vantagem é que a sonda de PEC não precisa estar em contato com a peça, como mostrado em (Sha et al., 2021), para separar rolamentos tratados termicamente por ordem de dureza. A técnica também pode

ser utilizada para determinar a perda de espessura em tubulações revestidas, como estudado em (Kishore et al., 2018)

Atualmente existem duas grandes empresas que fornecem um aparelho de PEC no mercado. A empresa Eddyfi comercializa o Lyft, que possibilita realizar medição de espessura de peças com até 4 polegadas e *lift-off* de 12 polegadas, a depender a sonda utilizada. São comercializadas diversas sondas de tamanhos e aplicações distintas, com possibilidade de sondas com finalidade subaquática. O software para o processamento dos sinais coletadas também é fornecido pela empresa, mas tem uma anuidade. O valor cotado desse aparelho é de USD 48.835,00 (Technologies, 2023).

A Ether NDE comercializa um equipamento com capacidade de medir espessura de até 2.5 polegadas e um *lift-off* de até 2.5 polegadas. Apresenta software próprio para processamento do sinal e tem uma diversidade de tipos de sondas, para ambientes marinhos e terrestres (NDE, 2023).

Diante deste cenário, o desenvolvimento de um equipamento de correntes parasitas pulsadas nacional, com alta eficiência energética e baixo custo, é uma alternativa interessante para a disseminação da técnica. Essa solução também possibilitaria uma maior flexibilidade para as empresas, que poderiam desenvolver soluções personalizadas para suas necessidades específicas.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desse projeto é desenvolver um protótipo de equipamento para o emprego da técnica PEC para detectar corrosão em tubulações isoladas.

1.2. Objetivos específicos

- Confeccionar uma placa de circuito impresso para controle e captura do sinal de PEC;
- Desenvolver o projeto e construir um protótipo para inspecionar tubos;
- Implementar rotinas para processamento de sinais capazes de identificar e quantificar a perda de espessura no material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

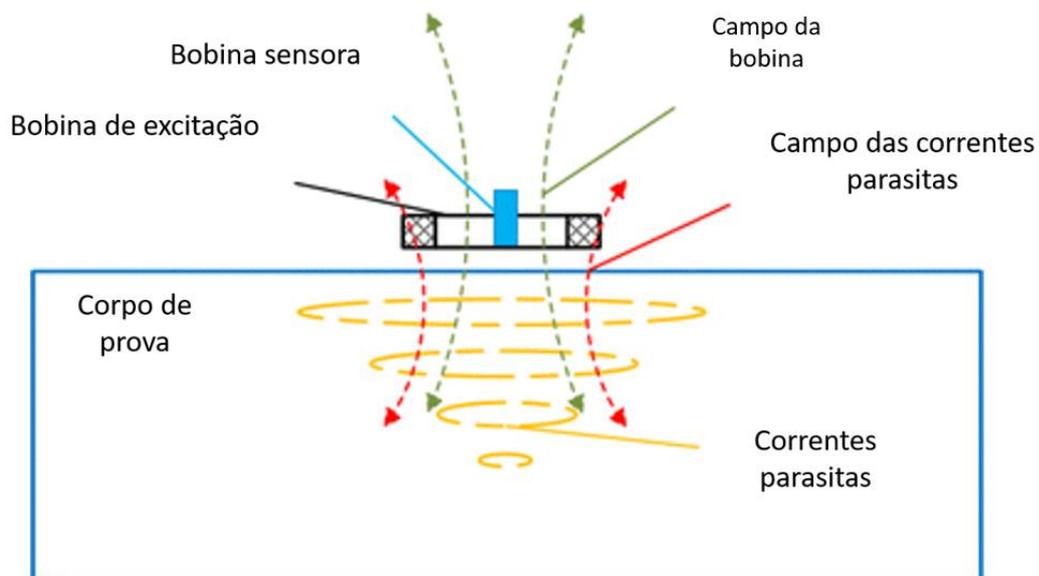
Esta seção de revisão bibliográfica destina-se a estabelecer uma base sólida de conhecimento sobre os princípios fundamentais da técnica de PEC, as propriedades dos

materiais que influenciam a técnica, os modelos de sondas e os parâmetros que ajudam na classificação e análise do sinal.

2.1. Princípio básico da técnica

O princípio da técnica PEC é mostrado na Figura 1. Segundo a Lei de Maxwell-Ampère, quando uma bobina é excitada por um pulso, um diferencial de tensão é produzido entre seus terminais e conseqüentemente há movimento de elétrons, que produzem um campo eletromagnético alternado (B_1). Quando esse campo se aproxima de um material ferromagnético, surgem correntes de Foucault (i_2), penetrando o material, que por sua vez produzem um campo eletromagnético (B_2) contrário a B_1 .

Figura 1 - Princípio da técnica de PEC. Adaptada de (Sophian et al., 2017).



A resposta de tensão da bobina sensora é a diferença entre os campos B_1 e B_2 ao longo do tempo, que dependerá de informações do material, como a mudança da microestrutura, espessura, defeitos e trincas existentes no metal a ser inspecionado (Hosseini & Lakis, 2012) (Yu et al., 2020).

Quando um defeito se encontra a uma profundidade em que as correntes parasitas não conseguem alcançar, sua detecção torna-se inviável. De acordo com a teoria, o campo eletromagnético primário que adentra o material condutor diminui à medida que a profundidade aumenta, e a densidade das correntes parasitas diminui exponencialmente com o aumento da profundidade (Yunze He Bin Gao & (Auth.), 2017). Esse fenômeno é conhecido como profundidade de penetração ou "*skin depth*" em inglês. A profundidade padrão de penetração,

representada como δ , é definida como a profundidade na qual a intensidade das correntes parasitas é reduzida a $(1/e) \times 100\%$ do seu valor superficial, onde "e" é igual ao número de Euler (Alamin et al., 2012). O valor de δ é calculado através da seguinte equação:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

Onde,

- f é a frequência [Hz]
- μ é a permeabilidade magnética [Henry/metro]
- σ é a condutividade elétrica [Siemens/metro]

Através da equação 1 é possível entender o efeito da frequência no sinal de PEC, quando a frequência aumenta o campo penetra menos no material e não é possível detectar os defeitos mais profundos. Também é possível entender a mudança do sinal em materiais com diferenças na microestrutura, pois os parâmetros de permeabilidade magnética e condutividade são afetados com a mudança da estrutura do metal.

Para materiais ferromagnéticos, a tensão induzida na bobina sensora pode ser descrita pela Equação 2, conforme adaptado de (X. Chen & Lei, 2015) (Huang et al., 2011).

$$v(t) = \frac{I_0 k_e \frac{\pi^2 t}{\mu_0 \mu_r \sigma d^2}}{\sigma \mu_r^2 d^3} \quad (2)$$

Onde I_0 é a amplitude do pulso da corrente de excitação, K_e é o coeficiente relativo ao acoplamento magnético das bobinas de excitação e sensora, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, μ_r permeabilidade magnética do condutor, σ a condutividade elétrica e d é parede espessura do condutor. Podemos reescrever a Equação 2 de uma maneira mais simples, onde a tensão na bobina de detecção pode ser definida como uma soma de termos exponenciais dados pela Equação 3 (Ulapane, Alempijevic, et al., 2018) (Mardaninejad & Safizadeh, 2019).

$$V(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i e^{-c_i t} \quad (3)$$

Na Equação 3, β_i representa o parâmetro de amplitude do sinal e C_i representa o parâmetro de decaimento, que pode ser descrito pela constante de difusão da corrente parasita para um condutor com espessura d .

2.2. Propriedades dos materiais que influenciam a técnica

Múltiplos elementos exercem influência direta ou indireta nas correntes parasitas geradas em um material metálico exposto a um campo magnético que muda ao longo do tempo. Portanto, ao empregar correntes de parasitas para a análise de metais, é essencial considerar várias variáveis.

2.2.1. Condutividade elétrica

A condutividade influencia como as correntes parasitas são induzidas em resposta a variações de um campo eletromagnético aplicado. Quanto maior for a condutividade, maiores serão as densidades de correntes (Yan & Chen, 2023).

Também é um fator crucial que influencia a profundidade de penetração dessas correntes. Materiais mais condutores permitem uma penetração mais profunda das correntes parasitas, enquanto materiais menos condutores restringem essa penetração a camadas superficiais. Essa característica é fundamental na inspeção não destrutiva de materiais, onde a detecção de imperfeições ou discontinuidades é baseada nas respostas das correntes parasitas às variações do campo eletromagnético aplicado (Lin et al., 2023).

A equação 4 apresenta que a condutividade elétrica é o inverso da resistividade, demonstrada na equação 5.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{RA}{I} \quad (5)$$

Onde,

- ρ é a resistibilidade [$\Omega \cdot m/A$];
- R é a resistência [Ω];
- A é a área [Metros];
- I é a corrente elétrica [Amperes].

2.2.2. Permeabilidade magnética

A permeabilidade é a capacidade que um material tem de permitir a passagem das linhas de campo. Quanto maior for o valor de permeabilidade, maior será a profundidade da penetração das correntes de Foucault. Para metais não ferrosos, tais como cobre, latão e alumínio, a permeabilidade relativa (μ_r) é tida como 1, e então, a permeabilidade é igual à permeabilidade em espaço livre (μ_0) (Z. Xu et al., 2023) (X. Chen et al., 2020).

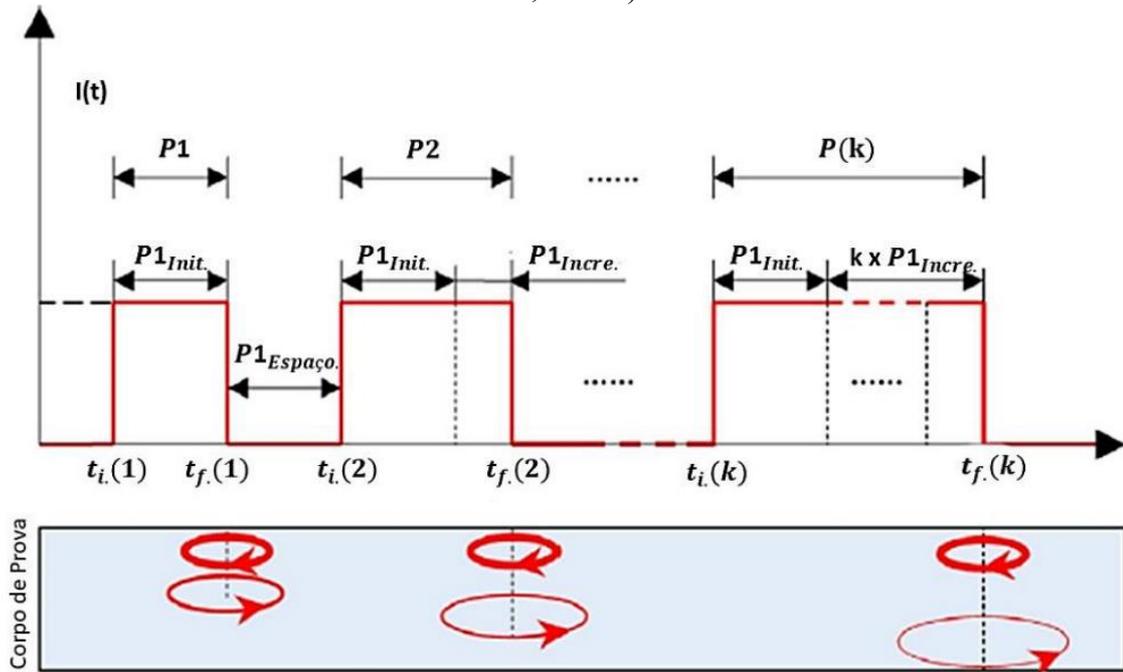
Para metais ferrosos, a permeabilidade relativa pode ter valores na ordem de centenas e isto gera uma variação muito grande no fluxo das correntes parasitas na face do material. Em alguns casos, a permeabilidade do material pode variar devido ao fato deste estar sobre tensões localizadas, aquecimento, entre outros fatores (Zhou et al., 2017) (Tian et al., 2013).

Outro fator a ser considerado é o tipo de material que está sendo exposto ao campo eletromagnético variante. Existem seis tipos diferentes de classificação de materiais levando em consideração suas características magnéticas e como os seus elétrons se organizam quando estão submetidos a um campo magnéticos (Cantú, 2014).

2.2.3. Excitação

Em PEC a excitação é composta por uma sequência de pulsos retangulares, onde pode-se variar a frequência, a largura e amplitude de pulso. A mudança dessas variáveis alteram o comportamento das correntes parasitas, como a largura do pulso que foi estudado e apresentado na Figura 2 em (J. Li et al., 2015b), onde é possível observar que a duração do pulso de excitação afeta diretamente a profundidade em que as correntes parasitas pulsadas conseguem penetrar. Quanto mais longa for a duração de cada pulso, maior será a profundidade em que essas correntes parasitas serão geradas. Isso, por sua vez, amplia a capacidade de avaliação em profundidade durante o ensaio, sem a necessidade de modificar a frequência de excitação dos pulsos (Abidin et al., 2009).

Figura 2 - Relação entre a largura do pulso com as correntes parasitas. Adaptada de (J. Li et al., 2015b).

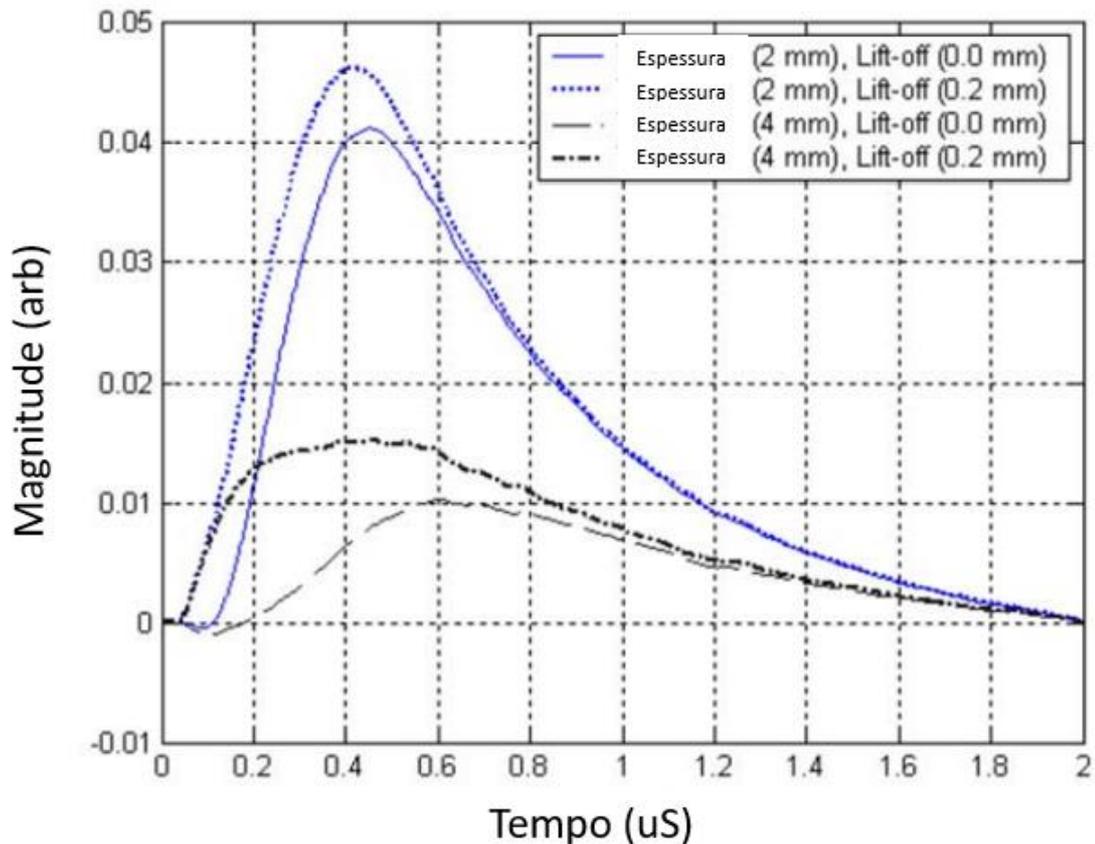


2.2.4. Distância da peça (*lift-off*)

A distância entre a base da bobina e a superfície da peça é conhecido como *lift-off* e pode afetar significativamente a precisão e a confiabilidade das medições realizadas por PEC. O problema do *lift-off* ocorre quando há uma variação na distância entre a bobina de PEC e a superfície do material condutor durante a captura dos sinais. Essa distância pode variar em função de imperfeições na superfície do material, irregularidades de superfície, vibrações ou mudanças na orientação da bobina. Quando o *lift-off* não é controlado ou compensado, ele pode introduzir erros nas medições, como a mudança da amplitude do sinal (Huang & Wu, 2014) (J. Li et al., 2015a) (Wen et al., 2018).

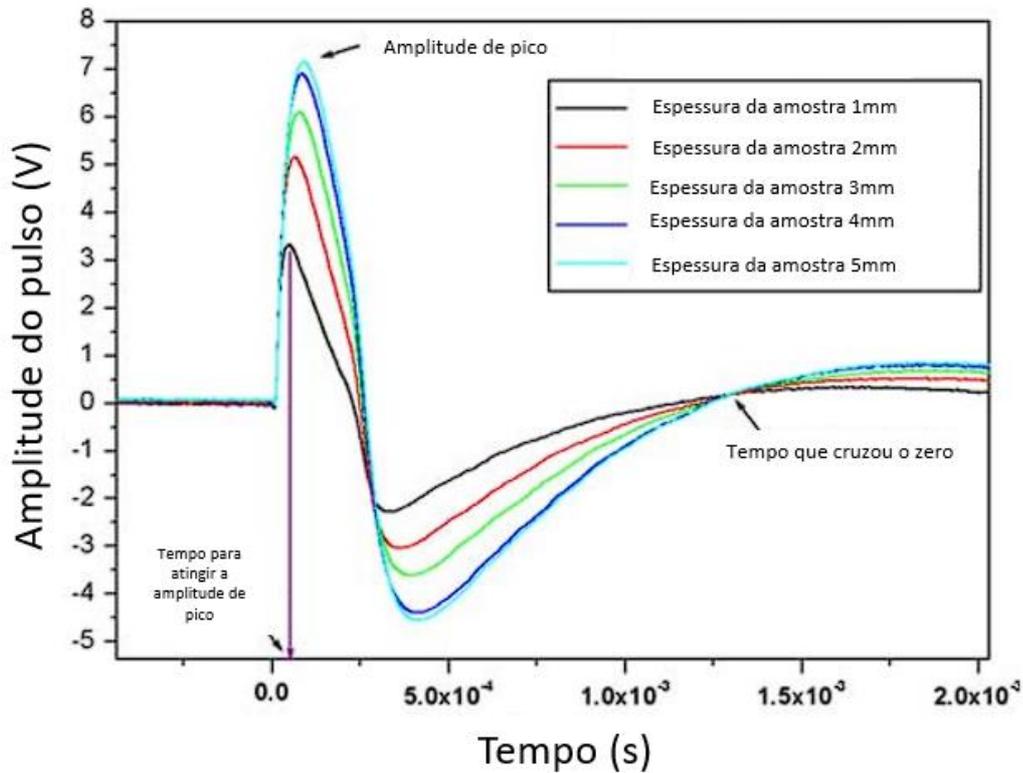
No estudo mencionado em (Tian & Sophian, 2005b), investigou-se o impacto da variação na distância entre a sonda e a amostra, em dois corpos de teste. A Figura 3 ilustra como essa variação no *lift-off* pode influenciar os sinais obtidos pela técnica PEC. É evidente que o *lift-off* tem um efeito predominante na fase inicial dos sinais. Isso ocorre porque o tempo do sinal está relacionado com a distância percorrida pelo campo magnético, conforme descrito em (Tian & Sophian, 2005a). Portanto, qualquer alteração na separação entre a sonda e a amostra afetará principalmente o início dos sinais. A distorção nos sinais ressalta que as informações podem ser facilmente mascaradas pelo efeito do *lift-off* (H. ; Chen et al., 2023).

Figura 3 - Efeito do *lift-off* na medição de espessura. Adaptada de (Tian & Sophian, 2005a).



Em (D. Park et al., 2012) foi estudado o LOI (*lift-off point of intersection*) que é o ponto onde acontece a intercepção dos sinais com diferentes valores de *lift-off*. Os autores fizeram experimentos em um corpo de prova com variações de espessura e na camada de isolamento, o que consequentemente alterou o valor do *lift-off*. A Figura 4 mostra que o sinal de PEC observado inclui os efeitos destes dois termos. Um vem da variação da espessura da amostra e o outro é a espessura do isolamento. É difícil separar a porção destes dois termos do sinal PEC observado porque o sinal PEC depende não apenas da espessura da amostra, mas também da espessura do isolador, por conta disso foi utilizado o LOI. O deslocamento temporal do sinal PEC não foi observado pela variação da espessura do isolamento, mas ocorreu pela variação da espessura da amostra. O tempo para atingir o pico de amplitude aumentou com a espessura da amostra, mas não dependeu da espessura do isolante. Isto pode ser usado para separar o efeito de irregularidade da superfície usando PEC relacionado a redução da parede da tubulação e à corrosão sob o isolamento.

Figura 4 - Ponto de LOI no sinal de PEC. Adaptada de (D. Park et al., 2012).



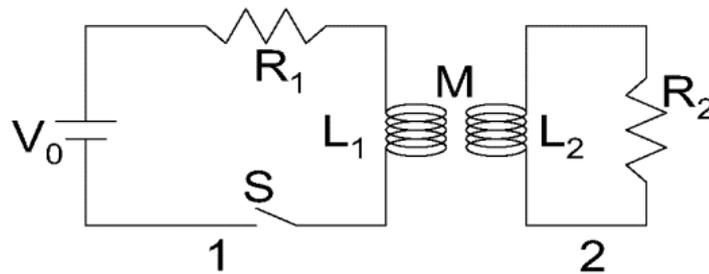
2.3. Modelos de sondas

Uma das maiores vantagens do ensaio de correntes parasitas reside na possibilidade de moldar as sondas de acordo com a inspeção necessária. Isso pode ser alcançado tanto por meio de experimentação prática quanto por meio de modelagem numérica. As sondas mais utilizadas são as diferenciais, que são constituídas por duas bobinas e recebem esse nome pois a resposta do sinal é a diferença entre os sinais de cada uma das bobinas. Estas são classificadas de acordo com o modo de operação e a configuração da bobina (Pereira, 2020). As principais variações são apresentadas nas seções seguintes:

2.3.1. Sonda diferencial com núcleo de ar

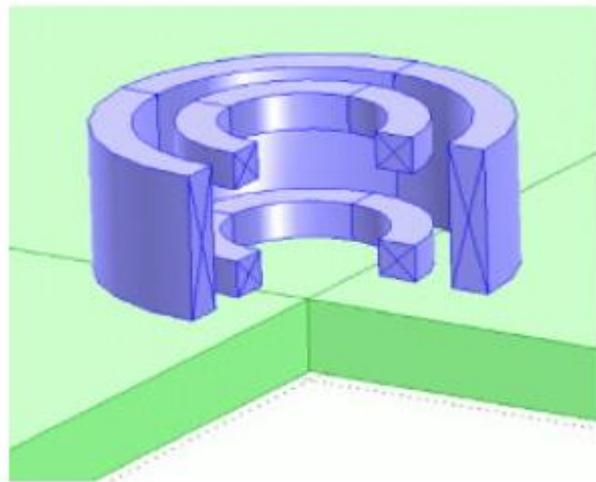
São os tipos de sondas mais comuns utilizada nos trabalhos, apresentam um núcleo sem nenhum material metálico (Song et al., 2023). Esse sistema pode ser modelado como na Figura 5, onde V_0 é a tensão na bobina emissora, R_1 e R_2 são resistores do sistema, L_1 e L_2 são as indutâncias do sistema e S é o sistema de chaveamento.

Figura 5 - Modelagem de sonda diferencial. Adaptada de (Cadeau & Krause, 2009).



Em (Shin et al., 2009) foi estudado o efeito da utilização de uma bobina emissora e duas bobinas sensora para detectar a perda de material, Figura 6. Esse arranjo de bobinas mostrou que as características relacionadas com o tempo, tais como o tempo até o pico e o tempo de passagem por zero correspondem bem à espessura e à condutividade da placa. Também foi estudado o ponto de intercessão do sinal, conhecido como LOI.

Figura 6 - Sonda diferencial com duas bobinas sensores (Shin et al., 2009).



2.3.2. Sonda diferencial com núcleo de ferrite

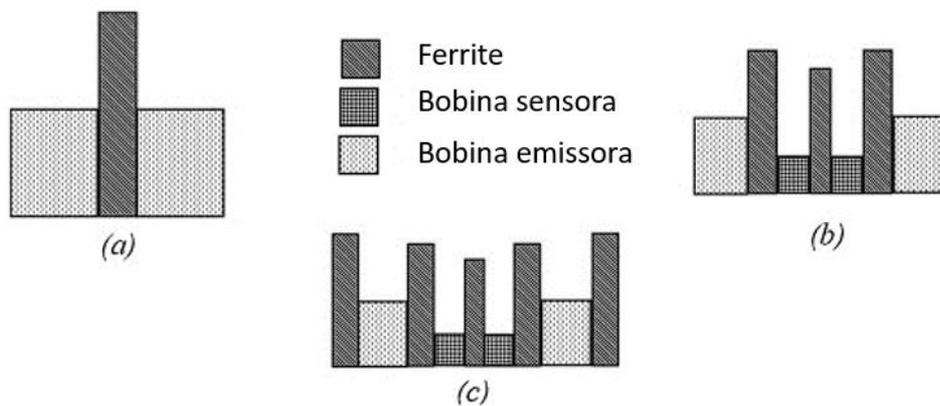
Ferrite é um termo que se refere a um grupo de materiais cerâmicos ferromagnéticos compostos principalmente de óxido de ferro (Fe_3O_4) ou óxido de ferro misturado com outros elementos. Esses materiais são conhecidos por suas propriedades magnéticas, como alta permeabilidade magnética e baixa condutividade elétrica. Em sondas de PEC são frequentemente usadas como núcleos magnéticos, pois ajudam a concentrar e direcionar o

campo magnético, melhorando a eficiência desses dispositivos (Y. Liu et al., 2018), (Slobodnk, 2017).

Em (Hachi et al., 2023) foi estudado o efeito da ferrite em sondas. Os autores realizaram diversos ensaios em bobinas com e sem núcleo de ferrite. Foram estudadas características dos sinais para conseguir classificar chapas com espessuras variadas. O experimento mostrou que as sondas com ferrite apresentaram as amplitudes mais altas por conta do aumento de fluxo magnético, o que ajudou na classificação dos corpos de prova.

Os autores de (Arjun et al., 2015) concentraram-se na otimização da sonda de PEC para a detecção de defeitos sub-superficiais localizados a mais de 4 mm da superfície em uma chapa de aço inoxidável AISI tipo 316 com 8 mm de espessura. Os desempenhos de uma sonda absoluta com núcleo de ferrite, uma sonda bobina-bobina com núcleo de ferrite e uma sonda bobina-bobina com núcleo de ferrite e blindagem externa foram comparados. A Figura 7 mostra o posicionamento dos componentes da sonda. A sensibilidade de detecção da sonda otimizada foi estudada usando entalhes usinados introduzidos em diferentes profundidades e obtiveram bons resultados.

Figura 7 - Sondas com três configurações de ferrite. Adaptada de (Arjun et al., 2015).



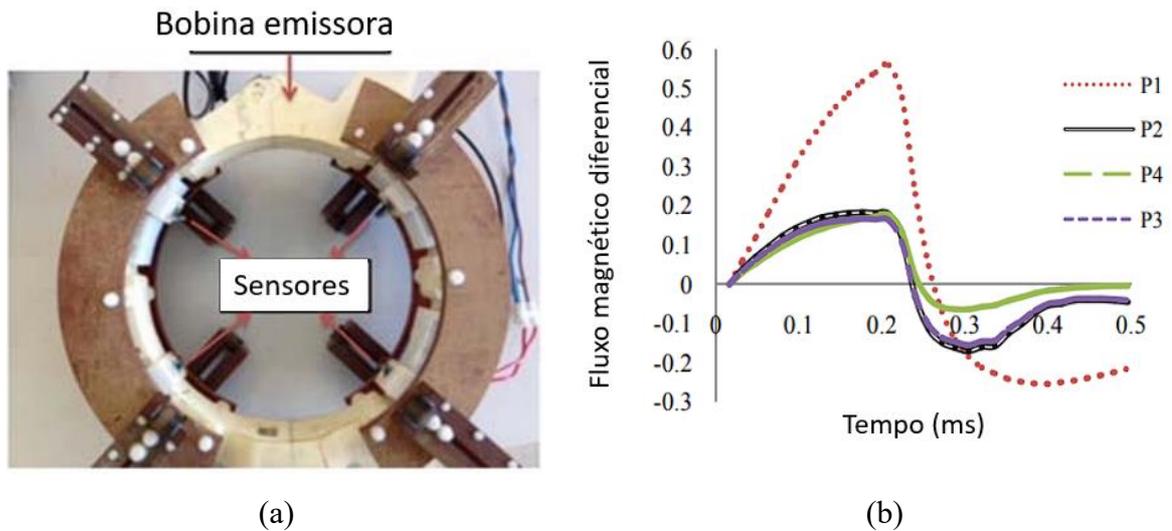
2.3.3. Sonda com sensores de estado sólido

As sondas que utilizam sensores de estado sólido são compostas por uma bobina excitadora e um sensor, geralmente GMR (Magnetorresistência gigante) ou Hall. O sensor GMR é um tipo de sensor que aproveita o efeito da magnetorresistência gigante para medir campos magnéticos com alta precisão e sensibilidade (Mandache, 2014). A magnetorresistência gigante é um fenômeno que ocorre em certos materiais, especialmente em camadas finas de

metais ferromagnéticos separadas por camadas de material não magnético. Quando uma corrente elétrica passa por essas camadas finas, a resistência elétrica do material varia dependendo da direção do campo magnético aplicado a ele. Em outras palavras, a resistência elétrica do material aumenta ou diminui em resposta às mudanças no campo magnético (NVE, 2023), (Rao et al., 2017).

Em (Majidnia et al., 2014) os autores desenvolveram uma sonda circular com quatro sensores GMR no centro, Figura 8 (a). A sonda proposta envolve toda a geratriz do tubo, o que permite uma maior área de inspeção. O corpo de prova tinha três tipos de defeito. A Figura 8 (b) é apresenta o sinal dos sensores GMR, é possível observar que o sensor P1 estava logo acima do defeito.

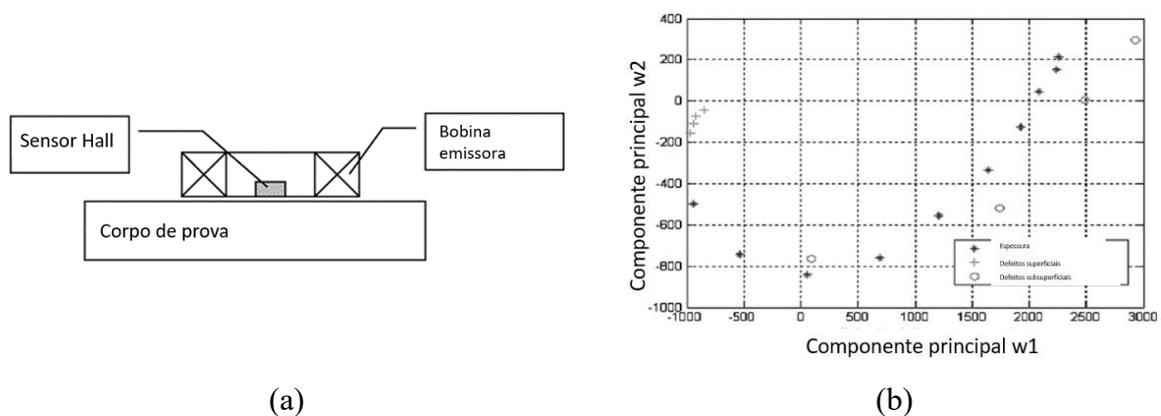
Figura 8 - (a) Sonda circular com 4 sensores GMR; (b) Sinais das 4 sondas. Adaptada de (Majidnia et al., 2014).



O sensor Hall é um dispositivo eletrônico que detecta campos magnéticos e é baseado no Efeito Hall, um fenômeno físico descoberto por Edwin Hall em 1879. O sensor de efeito Hall é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações devido à sua capacidade de medir campos magnéticos com precisão e sensibilidade. A operação do sensor de Efeito Hall é fundamentada no seguinte princípio: quando uma corrente elétrica flui através de um condutor, geralmente uma placa fina de material semicondutor, e é exposta a um campo magnético perpendicular a essa corrente, ocorre uma deflexão dos elétrons devido à força de Lorentz (D.-G. Park et al., 2016). Isso cria uma diferença de potencial perpendicular à corrente e ao campo magnético, conhecida como a tensão de Hall. A magnitude dessa tensão de Hall é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético aplicado (Y. Li et al., 2008), (Piao et al., 2019).

Em (Tian et al., 2005) foi utilizada uma sonda de excitação com um sensor Hall no centro, Figura 9 (a). Os sinais capturados foram utilizados para determinar a perda de espessura e a presença de defeitos superficiais e subsuperficiais. A técnica de processamento chamada PCA (*Principal component analysis*) foi utilizada para simplificar a complexidade em conjuntos de dados, tornando-os mais compreensíveis enquanto mantém as características essenciais. Na Figura 9 (b) é possível observar que foram criados grupos de defeitos.

Figura 9 - (a) Sonda circular com sensor Hall; (b) PCA do sinal. Adaptada de (Tian et al., 2005).



2.3.4. Resumo das características das sondas

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros e influências das sondas abordadas nas seções anteriores.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros e da influência dos tipos de sondas

	Características	Influências
Diferencial com núcleo de ar	<ul style="list-style-type: none"> • Sonda mais comum; • Núcleo sem nenhum material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinal só com influência do meio a ser inspecionado.
Diferencial com núcleo de ferrite	<ul style="list-style-type: none"> • Sonda mais comum; • Interior com uma peça de ferrite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentra e direciona o fluxo magnético; • Melhora a eficiência da sonda.
Com sensores de estado sólido	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor GMR; • Sensor Hall. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisa de um circuito dedicado para os sensores. • Maior sensibilidade.

2.4. Principais parâmetros para análise

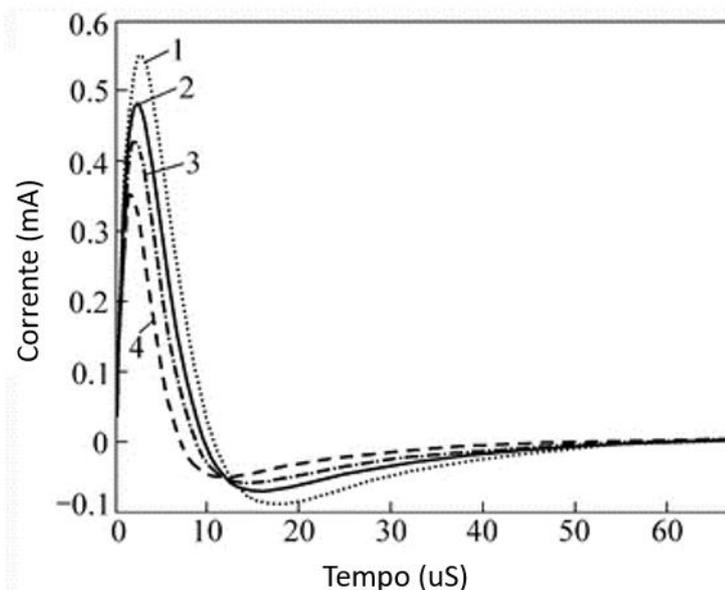
A análise dos sinais de PEC é essencial para a caracterização das regiões inspecionadas. Parâmetros como valor de pico, tempo do valor de pico, decaimento do sinal e tempo até atingir o zero são fundamentais para compreender as variações dos sinais. As seções a seguir descrevem esses parâmetros.

2.4.1. Valor de pico

O valor de pico é um ponto do sinal elétrico que se refere ao valor mais alto atingido em relação a um ponto de referência, geralmente o valor zero. Essa medida é importante no estudo do sinal elétrico, pois fornece informações cruciais sobre a amplitude máxima, o que pode indicar variações no sinal padrão, possibilitando classificações de materiais (Tian & Sophian, 2005a).

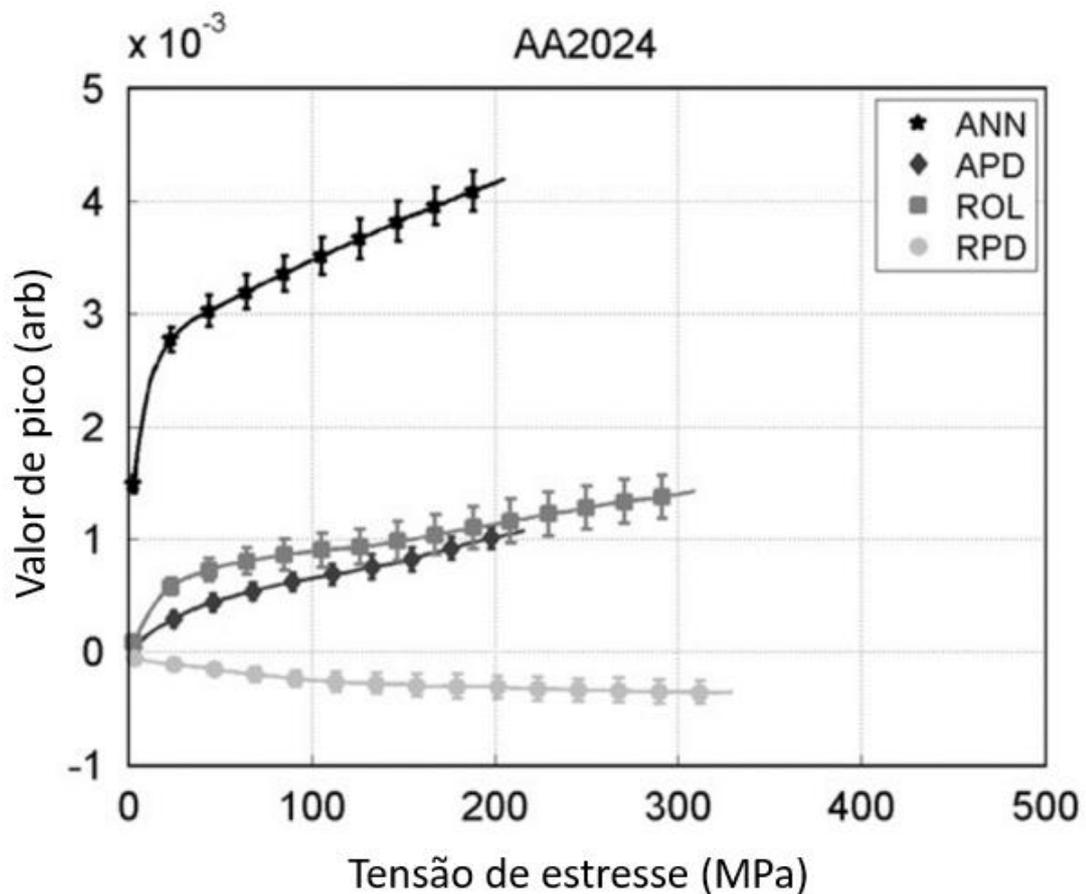
Em (Zhao et al., 2019) foi realizado um estudo da variação do valor de pico do sinal com diferentes espessuras de uma chapa de alumínio utilizando uma bobina como sensor, na Figura 10 o autor manteve o *lift-off* de 5 mm em todos os sinais e foi modificando a espessura da chapa. No sinal 1 foi utilizada uma chapa com 1 mm; sinal 2, uma chapa de 0,8 mm; sinal 3, uma chapa de 0,6 mm e sinal 4, uma chapa de 0,2 mm. É possível observar a mudança do sinal com relação a espessura da chapa.

Figura 10 - Variação do valor de pico de acordo com a espessura da chapa. Adaptada de (Zhao et al., 2019).



Em (Morozov et al., 2010) foi estudado o efeito de tensionamento em ligas de alumínio. O valor do pico foi utilizado para fazer a classificação de diferentes formas de tratamento da linha de alumínio AA-2024 e determinar a existência de tensões residuais. A captura do sinal foi utilizando um sensor do tipo Hall. A Figura 11 mostra os resultados obtidos na pesquisa e é possível observar a mudança da amplitude o pico quando a tensão de tração é aumentada.

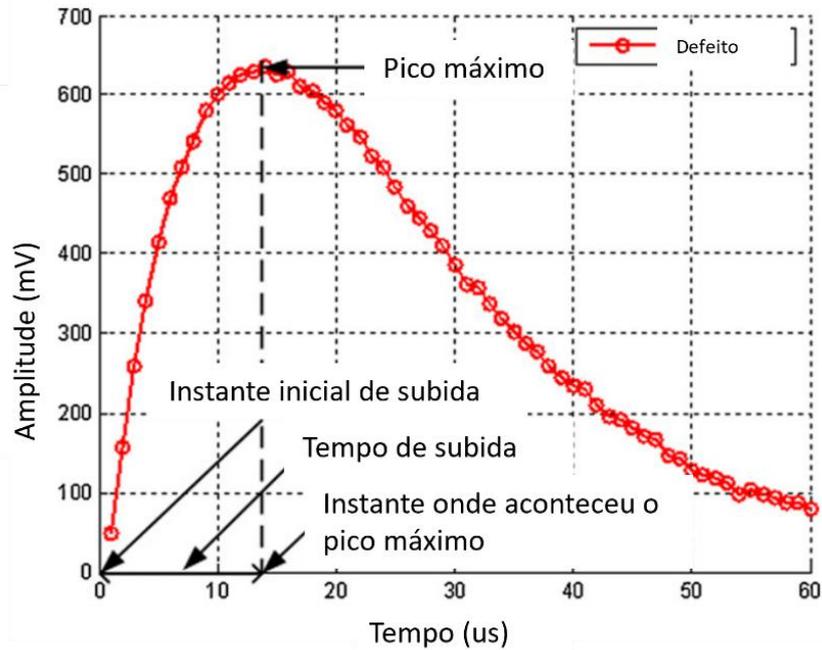
Figura 11 - Variação do valor de pico com relação a tensão. Adaptada de (Morozov et al., 2010).



2.4.2. Tempo do valor de pico

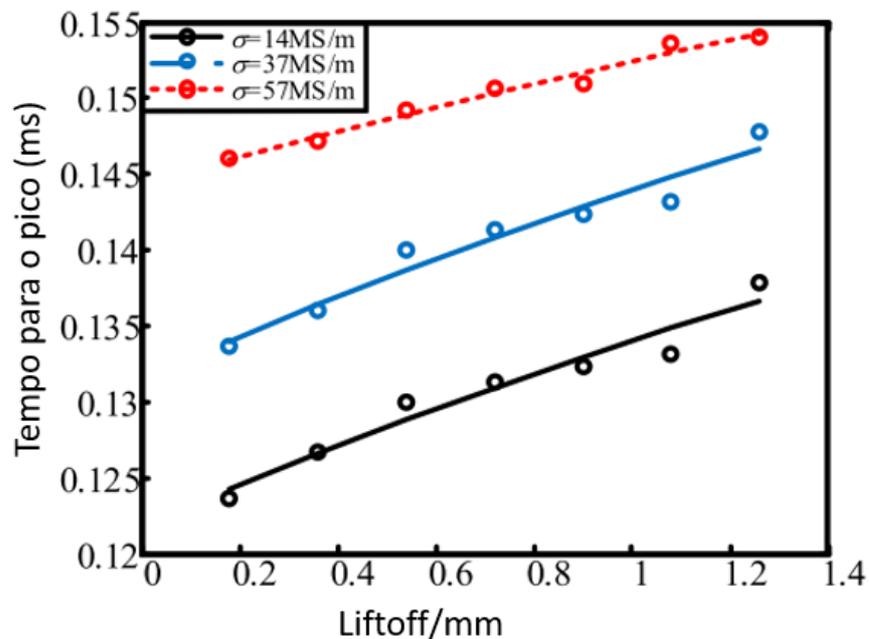
O tempo do valor de pico é o instante em que a tensão ou corrente de um sinal elétrico atinge seu valor máximo, ou seja, a amplitude máxima em relação a um ponto de referência, geralmente zero volts, como indicado na Figura 12. Na análise de sinais, o tempo de pico é usado para determinar a fase do sinal e identificar características temporais importantes, como atrasos ou deslocamentos temporais (X. Chen & Niu, 2022).

Figura 12 - Tempo de subida do pico. Adaptada de (He et al., 2010).



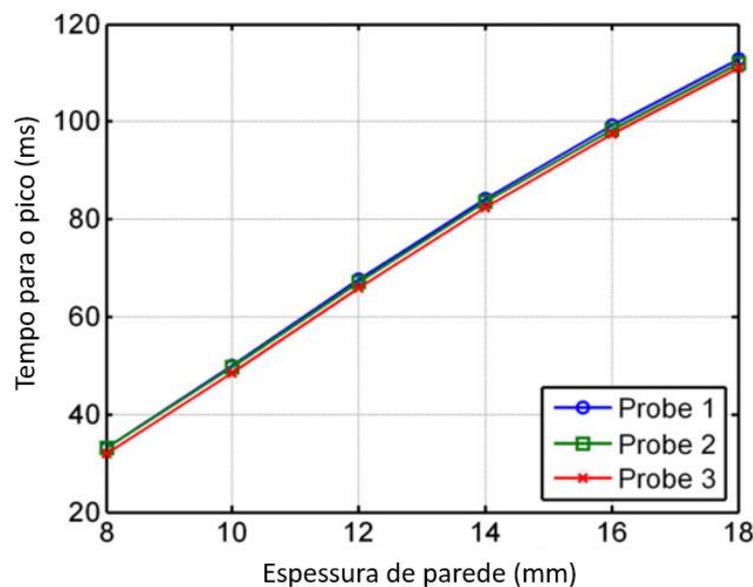
Em (Yang et al., 2020) foi analisado o efeito do tempo de pico com relação ao *lift-off* em três materiais com valores de condutividades diferentes. A Figura 13 representa os resultados obtidos e é possível ver o aumento no deslocamento do tempo de pico, com *lift-off* maiores o sinal tem um deslocamento maior.

Figura 13 - Variação do tempo de pico com relação ao *lift-off*. Adaptada de (Yang et al., 2020).



Em (Z. Xu et al., 2012) foi estudado a relação de três sondas na classificação de espessura em tubulações isoladas, segundo os autores o tempo até o pico é independente da espessura do isolamento e tem uma variação linear em até 60% da espessura da peça. A Figura 14 ilustra os resultados usando essas três sondas. Pode-se observar que os valores do tempo até o pico em cada espessura da parede do tubo são quase idênticos para todas as sondas.

Figura 14 - Variação do tempo de pico com relação a espessura de parede. Adaptada de (Z. Xu et al., 2012).



2.4.3. Decaimento do sinal

O decaimento de um sinal elétrico exponencial é um fenômeno comum em eletrônica que descreve a diminuição ou enfraquecimento exponencial da amplitude de um sinal com o tempo (Sun et al., 2023). Esse tipo de decaimento é caracterizado por uma curva exponencial, que é uma função matemática onde o sinal diminui de forma proporcional à sua taxa de decaimento (Cheng, 2012). A equação 3 apresenta o modelo matemático para o decaimento do sinal de descarga de uma bobina, mais conhecido como um circuito RL (resistor e indutor).

Em (Ulapane et al., 2017) a equação 3 é estudada mais a fundo para determinar a espessura da peça de acordo com a taxa de decaimento. O autor expressa em logaritmo natural, conforme mostrado na equação 6.

$$\ln [V(t)] = \ln \left[\sum_{i=1}^{\infty} b_i e^{(-c_i t)} \right] \quad (6)$$

Para trabalhar em regiões do sinal mais afastado do valor de pico é considerado um instante com $t \gg 0$, reduzindo a equação 6 para:

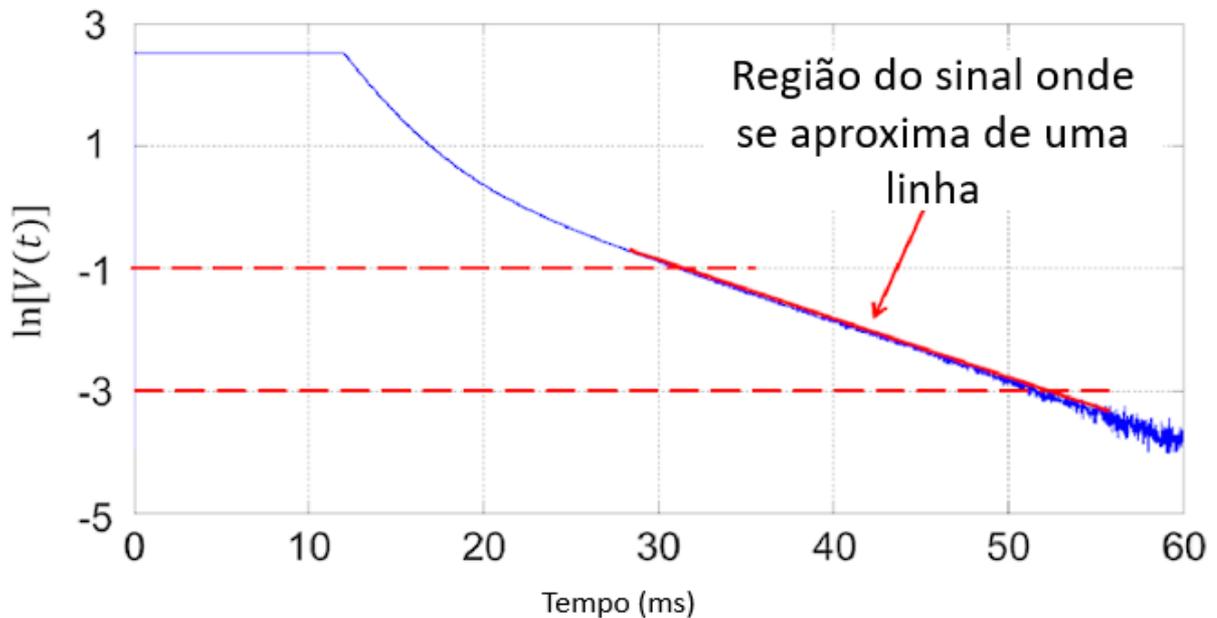
$$\ln[V(t)]|_{t \gg 0} \approx \ln[b_1 e^{(-c_1 t)}] \quad (7)$$

Onde,

- C_1 é a constante de domínio do tempo;
- B_1 é o coeficiente do termo exponencial.

A equação 7 sugere que o comportamento do decaimento do sinal em um tempo muito maior que zero num material ferromagnético deve aproximar-se de uma linha reta com um gradiente negativo quando expresso na sua forma logarítmica, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Sinal de PEC em função de $\ln[V(t)]$. Adaptada de (Ulapane, Thiyagarajan, et al., 2019)



Aplicando a primeira derivada na equação 7 é possível separar o coeficiente de domínio do tempo de decaimento do sinal, como demonstrando na equação 8.

$$\left. \frac{d \ln[V(t)]}{dt} \right|_{t \gg 0} \approx -C_1 \quad (8)$$

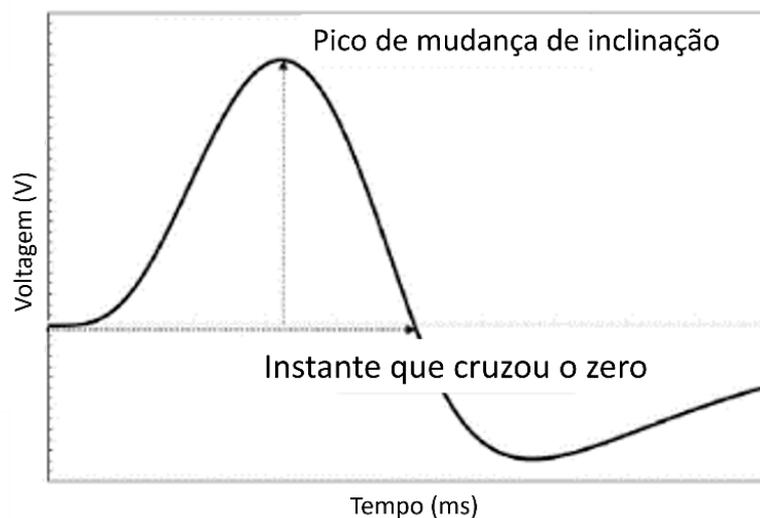
Em (Nguyen et al., 2018), (Ulapane, Nguyen, et al., 2018), (Ulapane, Wickramanayake, et al., 2019) os autores determinaram que o inverso da equação 8 é uma característica, denominada de β (equação 9) que equivale ao gradiente absoluto do sinal logarítmico, comportando-se como uma linha reta. Além disso, os resultados simulados e experimentais sugerem que β tem a qualidade desejável de ter baixa sensibilidade ao *lift-off*, o que faz de β uma opção adequada para aplicações de inspeção de tubos críticos onde a descolagem desconhecida é um desafio predominante.

$$\beta = \frac{1}{C_1} \quad (9)$$

2.4.4. Tempo até atingir o zero

O tempo até atingir o zero é o tempo desde o ponto inicial até o próximo ponto zero da resposta em tempo diferencial (Yang, Binfeng; Luo, Feilu; Han, 2006), como indicado na Figura 16. O tempo em que o sinal atingiu zero volts é influenciado por diversos fatores, como a constante de tempo do circuito RL representado por C_i na equação 3 (McAllister, 2023).

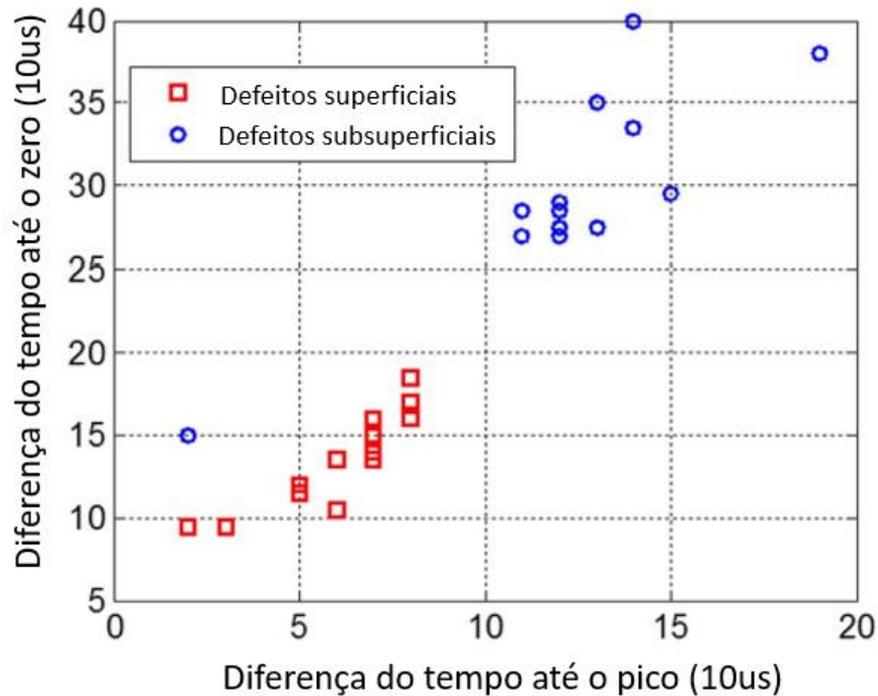
Figura 16 - Sinal de PEC usando sensor Hall. Adaptada de (Praphaphankul et al., 2023)



Em (He et al., 2011) foi investigado a presença de defeitos superficiais e subsuperficiais em amostras de liga Al-Mn 3003 utilizando o método de correlacionar o tempo até atingir o zero volts e o tempo que atingiu o pico. Os resultados experimentais mostram que o método foi eficaz para classificar os defeitos tanto em estruturas de camada única quanto em estruturas de

duas camadas. A Figura 17 mostra uma nuvem de pontos e é possível observar a separação entre os dois tipos de defeitos estudados.

Figura 17 - Relação do tempo de pico e tempo que atingiu o zero. Adaptada de (He et al., 2011).



Na seção de revisão bibliográfica, foram abordados os princípios da técnica de PEC, as propriedades dos materiais que afetam a resposta do sinal, os principais parâmetros de análise e os modelos de sondas. Foi destacada a influência de propriedades dos sensores utilizados nas sondas. Além disso, a revisão discutiu a importância de parâmetros como amplitude, frequência, largura de pulso entre outras. Esses conhecimentos estabelecem uma base conceitual crucial para a pesquisa e análise subsequentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais, instrumentos e procedimentos utilizados durante o desenvolvimento da pesquisa, oferecendo uma visão abrangente do caminho metodológico adotado para o desenvolvimento do equipamento e atendendo aos objetivos estabelecidos para a dissertação.

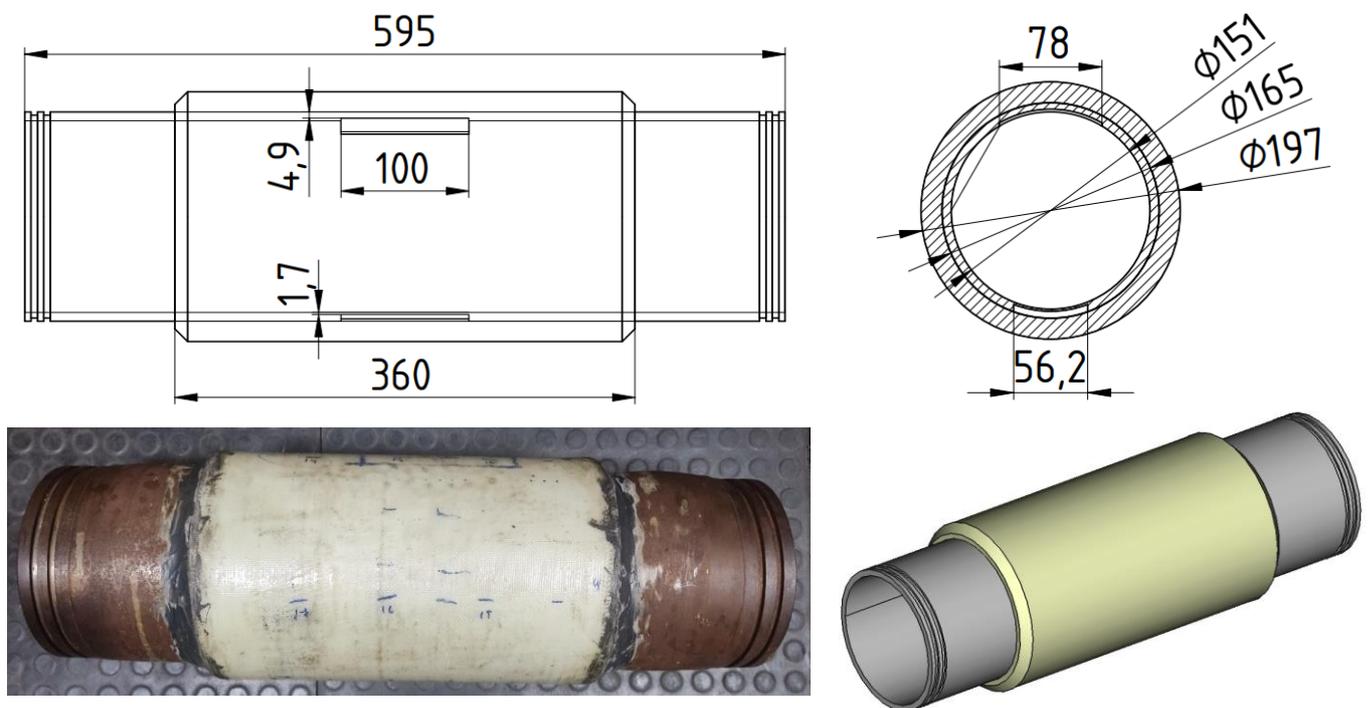
3.1. Materiais

Nesta seção serão apresentados os corpos de prova que foram utilizados para realizar os experimentos e os sistemas que compõem o equipamento de PEC.

3.1.1. Corpos de prova

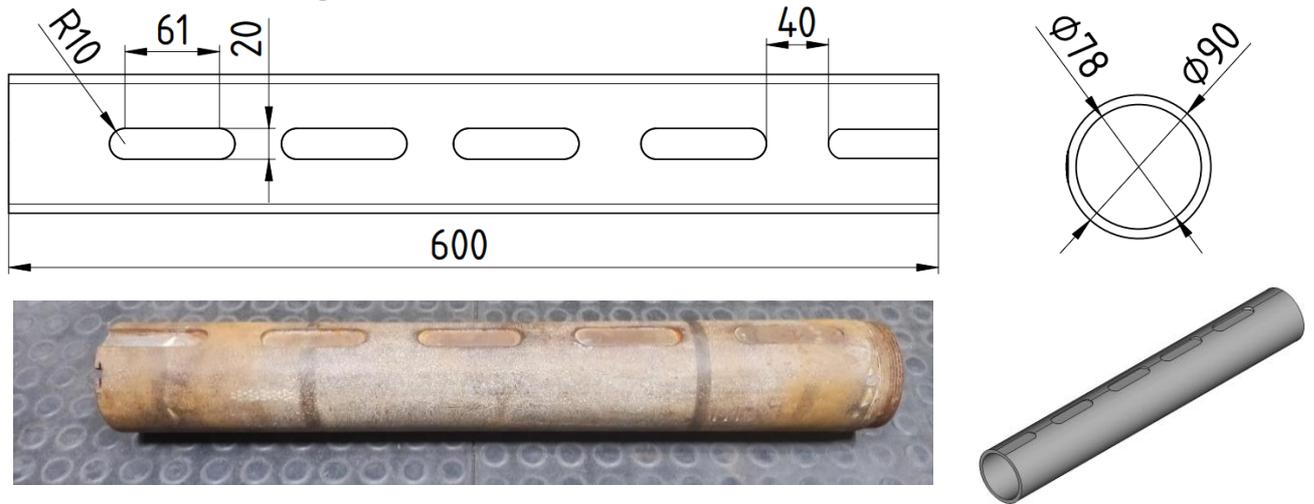
Foram utilizados dois corpos de prova (CP) para fazer os experimentos, ambos possuem isolamento e descontinuidades usinadas. O CP 1 tem duas descontinuidades, uma na parte interna e outra na parte externa do tubo, como apresentado na Figura 18. O material do tubo é de aço carbono 1020 e o seu isolamento é de compósito reforçado com fibra. Esse CP é interessante porque é possível entender o comportamento do sinal de PEC em defeitos internos e externos do tubo.

Figura 18 - Desenhos do CP 1. Medidas em milímetros.



O CP 2 é um tubo de aço 1020. Para simular perda de espessura foram entalhados 5 degraus na parte externa do tubo, começando de 1 mm até 5mm, diminuindo 1 mm em cada passo, como mostra a Figura 19. O interessante desse CP é o estudo do sinal com pouca variação de perda de massa.

Figura 19 - Desenhos do CP 2. Medidas em milímetros.



3.1.2. Unidade de controle e processamento

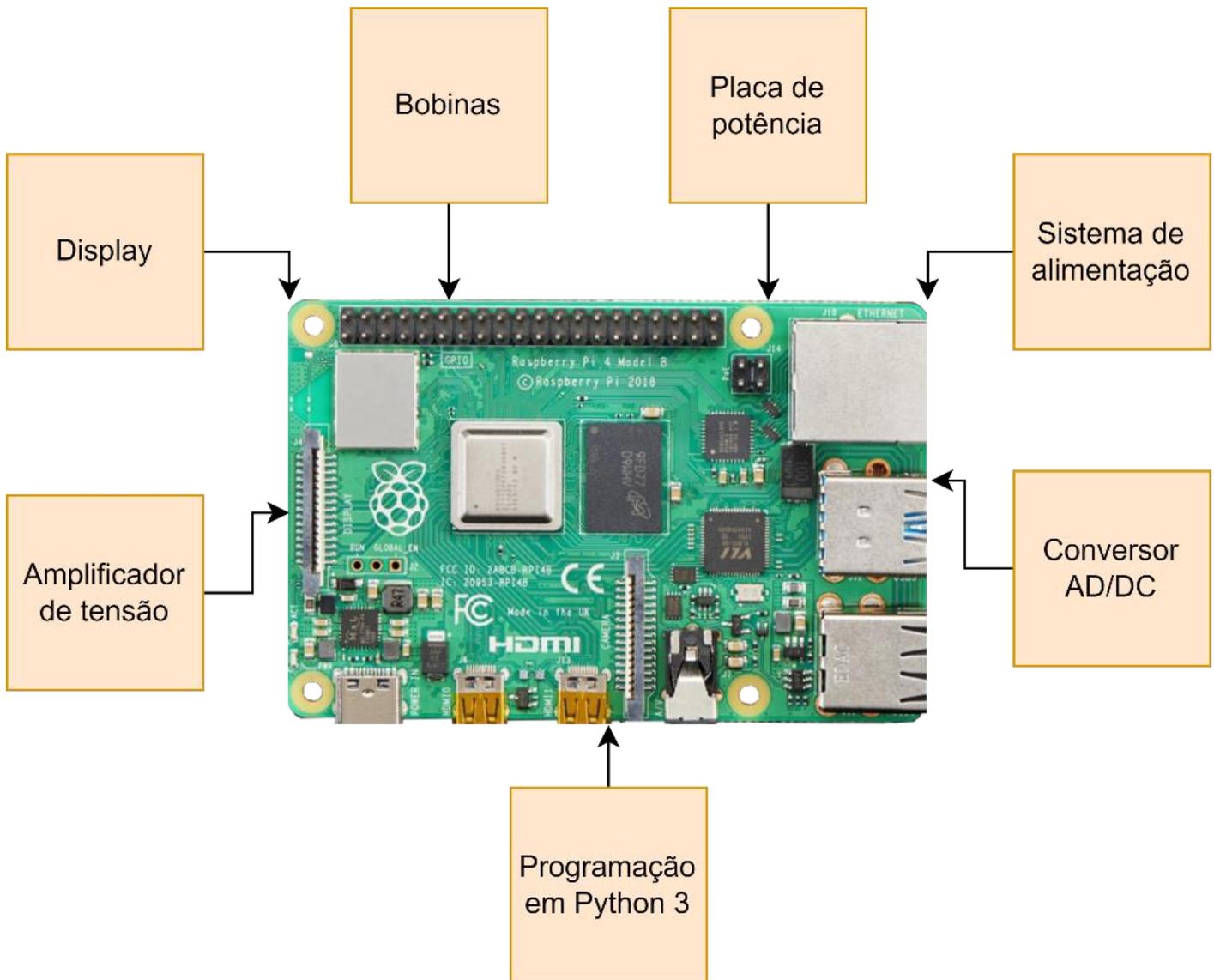
A unidade de processamento, ou CPU, é o coração de um computador e desempenha um papel central na execução de instruções de programas, processamento de dados, controle do fluxo do programa, gerenciamento de memória, coordenação de entrada e saída, temporização, sincronização e resposta a interrupções. É responsável por executar operações matemáticas e lógicas, garantir a ordem adequada das operações e assegurar que o computador funcione de maneira coordenada e eficaz, sendo essencial para o funcionamento de qualquer sistema computacional (Lemonaki, 2021). Para realizar todo o controle do equipamento foi utilizado um Raspberry pi 4®.

O Raspberry pi 4® conta com um processador *Broadcom* BCM2711 quad-core Cortex-A72 de 64 bits, com *clock* de 1,5 GHz e 4 GB de memória RAM. Processador gráfico *VideoCore VI*. Quatro portas USB, sendo 2 USB 3.0. Possui duas conexões de saída de vídeo. Conta com 40 pinos de GPIO para conectar sensores e dispositivos externos (Pi, 2023).

Existem diversas distribuições Linux que são compatíveis com o Raspberry, a utilizada no trabalho foi a Raspbian que é um sistema operacional baseado no Debian/Linux projetado especificamente para o Raspberry Pi. O Raspbian foi desenvolvido para tirar o máximo proveito do hardware do Raspberry Pi e oferecer uma experiência de uso otimizada para essa plataforma pois permite a implantação de várias linguagens de programação como Python 3 e C/C+ (Raspbian, 2023).

A Figura 20 apresenta os periféricos que são controlados pelo Raspberry pi 4, cada periférico tem suas especificações detalhadas nas próximas seções.

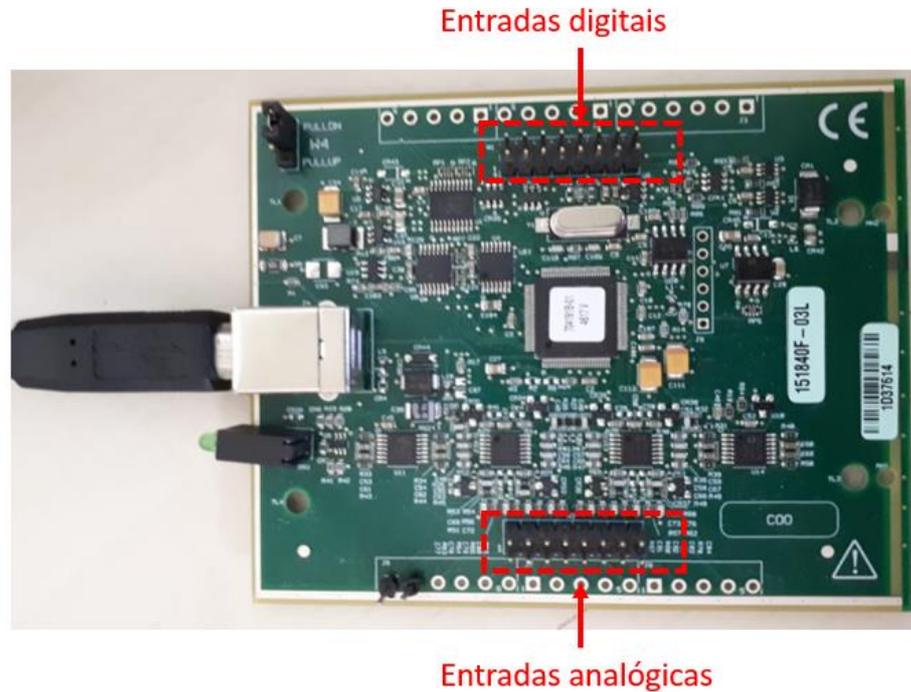
Figura 20 - Raspberry pi com os periféricos.



3.1.3. Placa conversora analógico para digital

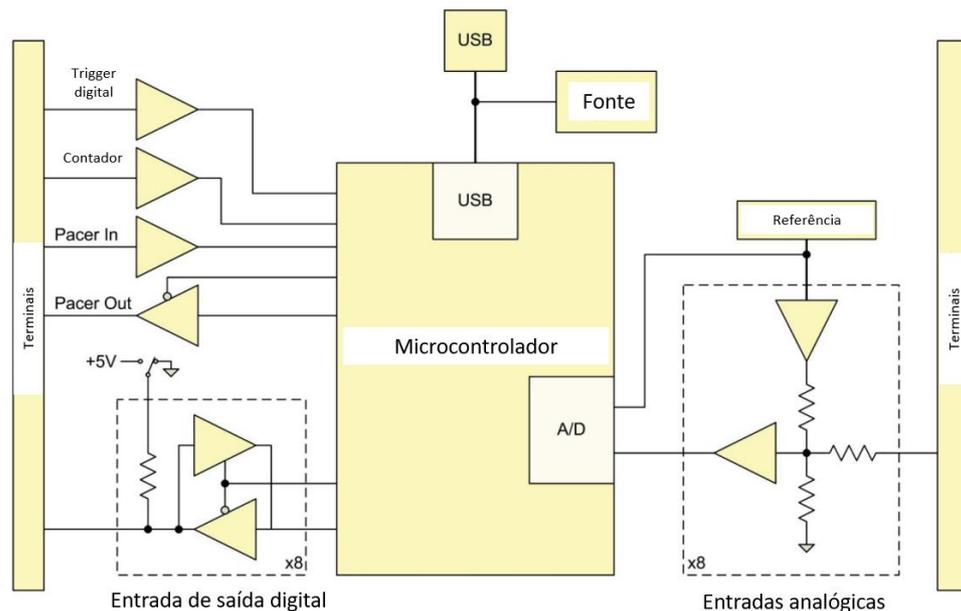
Uma placa de aquisição de dados (AD) é um componente eletrônico utilizado para coletar informações de sensores analógicos e convertê-las em dados digitais que podem ser processados por um computador ou outro dispositivo digital. Essas placas são comumente usadas em uma variedade de aplicações, como medições científicas, controle industrial, automação, monitoramento ambiental e muitos outros campos (Smith, 2022). Neste trabalho foi utilizada a placa AD USB-204 da *MC Measurement Computing*, Figura 21.

Figura 21 - Placa conversora analógico para digital.



O diagrama de blocos da USB-204 é apresentado na Figura 22. A placa possui oito canais analógicos independentes de 12-bits, com uma taxa de amostragem máxima de 500KS/s (a taxa utilizada no projeto foi a máxima), um contador de 32-bits, um *trigger* digital e oito canais digitais independentes (Computing, 2019).

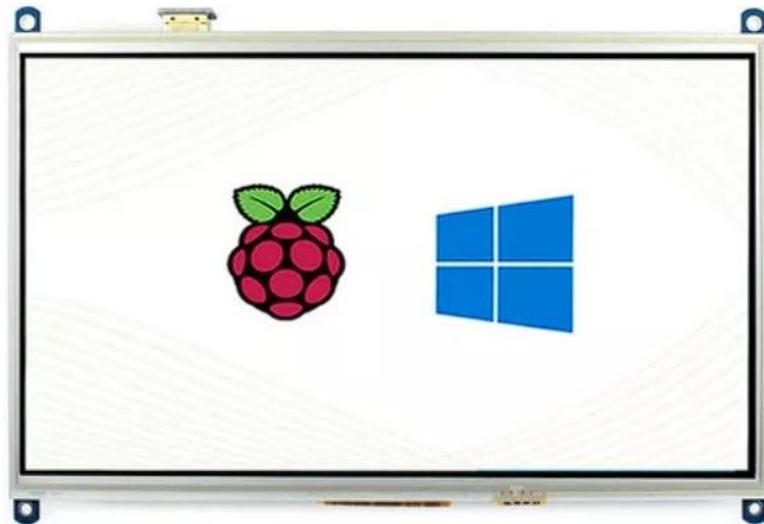
Figura 22 - Diagrama de blocos da USB-204 (Computing, 2019).



3.1.4.Tela

Foi utilizada uma tela sensível ao toque, modelo XPT2046 produzida pelo XPT. Apresenta a resolução de 1024x600 pixels com 10,1 polegadas, tem conexão HDMI e tensão de 5V (XPT, 2023).

Figura 23 - Tela XPT2046.



3.1.5.Teclado wireless

Foi utilizado um teclado sem fio como um completo para interação com o protótipo, Figura 24.

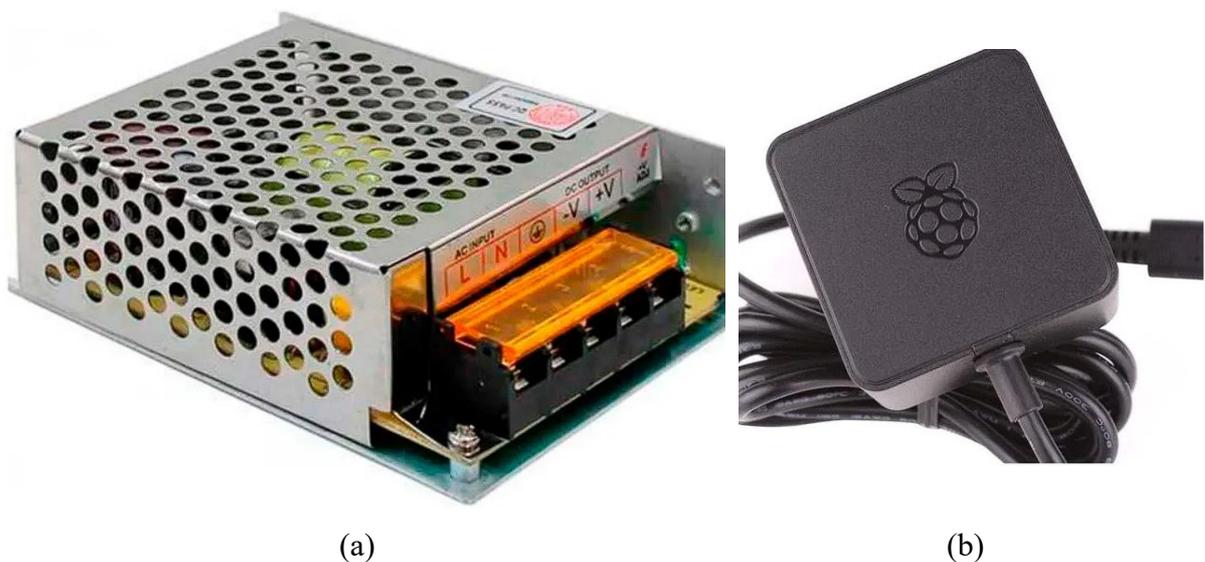
Figura 24 - Teclado sem fio.



3.1.6. Fontes de alimentação

Para fazer a alimentação de todo o sistema de potência foi utilizada uma fonte do tipo colmeia com entrada de 100 até 220 volts e saída de 12 volts e 10 amperes contínuos, Figura 25 (a). Para o Raspberry foi utilizada uma fonte indicada pelo fornecedor, com 5 volts e 3 amperes, Figura 25 (b). No equipamento a fonte do Raspberry foi desmontada para ajudar na acomodação das partes internas.

Figura 25 - (a) Fonte do tipo colmeia. (b) Fonte para o Raspberry pi.



3.1.7. Programas utilizados

Para desenvolvimento do programa de interface com o usuário (IHM), controle do sistema de excitação da bobina e captura do sinal foram utilizados *softwares* gratuitos que são descritos a seguir.

3.1.7.1. Visual Studio Code

O Visual Studio Code (VScode) é um editor de código-fonte desenvolvido pela Microsoft para Windows, Linux e macOS. Inclui suporte para depuração, controle de versionamento Git incorporado, realce de sintaxe, complementação inteligente de código, snippets e refatoração de código. É um software livre e de código aberto.

Nesse trabalho o VScode foi utilizado para a escrita do código em Python 3, para o gerenciamento dos arquivos via *Secure Socket Shell* (SSH) e *debug* de código.

3.1.7.2.Python 3

Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada de script, imperativa, orientada a objetos, funcional, de tipagem dinâmica e forte. Foi desenvolvida por Guido Van Rossum em 1991. Atualmente, possui um modelo de desenvolvimento comunitário, aberto e gerenciado pela organização sem fins lucrativos Python Software Foundation (Python, 2023).

As principais bibliotecas utilizadas foram:

- Pyqt5 para a parte gráfica.
- Matplotlib para plotar os sinais.
- Numpy para realizar contas matemáticas.
- Rpi para gerenciar as entradas e saídas do Raspberry pi.
- Scipy para aplicar filtros matemáticos.
- Utdaq para comunicação com a placa AD.

Para auxílio no desenvolvimento da interface gráfica foi utilizado o *Qt desing*, software gratuito disponibilizado pelos programadores da biblioteca *Pyqt5*.

3.1.7.3.VNC Viewer

O VNC Viewer é uma aplicação de software que permite aos usuários acessarem remotamente um computador ou dispositivo a partir de outro local, proporcionando uma experiência de desktop remoto. Ele opera com base no protocolo VNC (*Virtual Network Computing*) e permite visualização e controle do computador remoto como se estivesse fisicamente presente. Com o VNC Viewer, os usuários podem operar o equipamento mesmo estando em outro país, basta ter uma conexão com a internet. Foi utilizado nesse trabalho para proporcionar todo o controle do equipamento de forma remota.

3.1.7.4.LTspice

O LTspice® é um software de simulação SPICE gratuito, desenvolvido pela Analog Devices, com recursos de captura de esquema e visualização de formas de onda, projetado para melhorar a simulação de circuitos analógicos. Sua interface gráfica de captura de esquema permite a análise de esquemas e resultados de simulação, que podem ser explorados ainda mais por meio do visualizador de formas de onda integrado.

Nesse trabalho o LTspice foi utilizado para fazer as simulações dos circuitos elétricos do equipamento.

3.1.7.5.EasyEDA

O EasyEDA é uma plataforma de design de circuitos online que oferece uma abordagem simplificada para criar esquemas e layouts de PCB (Placa de Circuito Impresso). Com uma interface de usuário amigável e baseada na web. Oferece possibilidade de moldar a PCB de diversas formas e fazer um projeto 3D para visualização do projeto. Nesse trabalho o EasyEDA foi utilizado para o projeto da PCB.

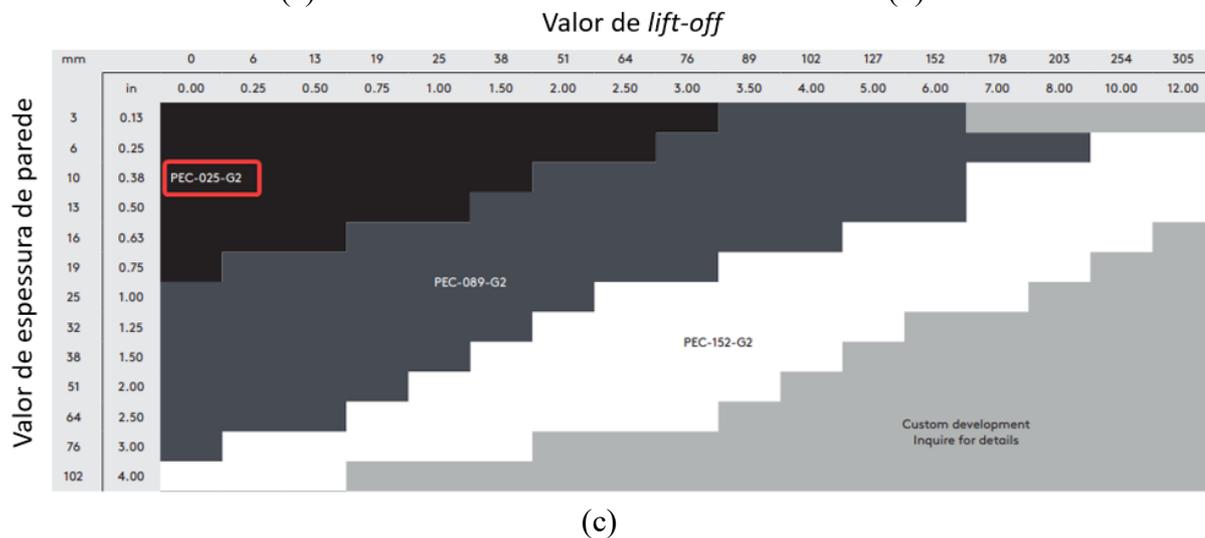
3.1.7.6.FreeCAD

O FreeCAD é um software de modelagem paramétrica 3D de código aberto, projetado para criação de modelos CAD (*Computer-Aided Design*) em uma variedade de aplicações, desde design de produtos até engenharia mecânica. Com uma comunidade ativa de desenvolvedores e uma interface de usuário amigável, o FreeCAD oferece ferramentas poderosas para criar modelos 3D precisos e complexos, permitindo que os usuários controlem parâmetros e relações para modificar facilmente seus projetos. Além disso, ele suporta uma ampla gama de formatos de arquivo, tornando-o compatível com outros softwares de CAD populares. O FreeCAD é uma escolha valiosa para profissionais e entusiastas que procuram uma solução de CAD gratuita e flexível. Foi utilizado nesse trabalho para a modelagem das bobinas e da caixa do equipamento.

3.1.8.Eddyfi - Lyft

O equipamento comercial Lyft (Figura 26 (a)) tem a proposta de realizar inspeção por PEC, fazer a estimativa de perda de espessura e mostrar os resultados em um mapa de cores tanto na tela do aparelho como em um arquivo que pode ser aberto em um programa proprietário com licenças anuais. São comercializadas três sondas singulares com tamanhos diferentes, tanto para o ambiente terrestre como subaquático. Para esse trabalho foi utilizada a sonda modelo “PEC-025-G2” (apontada na Figura 26 (b)) pois ela está apta para trabalhar entre 3 e 19 mm de espessura e entre 0 e 76 mm de *lift-off*. A Figura 26 (c) mostra um mapa para utilização das sondas. Em destaque está a sonda escolhida.

Figura 26 - Eddyfi Lyft. (a) Lyft. (b) Sondas. (c) Tabela para seleção de sonda. Fonte: eddyfi.com/en/product/lyft (adaptada).



3.1.9. Resumo dos custos

A Tabela 2 discrimina o valor dos componentes utilizados para a confecção do equipamento, apresentando no valor total de R\$: 5.013,03. Não foram contabilizados os custos com equipe de desenvolvimento e nem da utilização dos equipamentos do Instituto Federal da Bahia. Valores com estimativa para o mês de novembro de 2023, com o dólar a R\$ 4,90.

Tabela 2 - Custos dos componentes para montagem do equipamento.

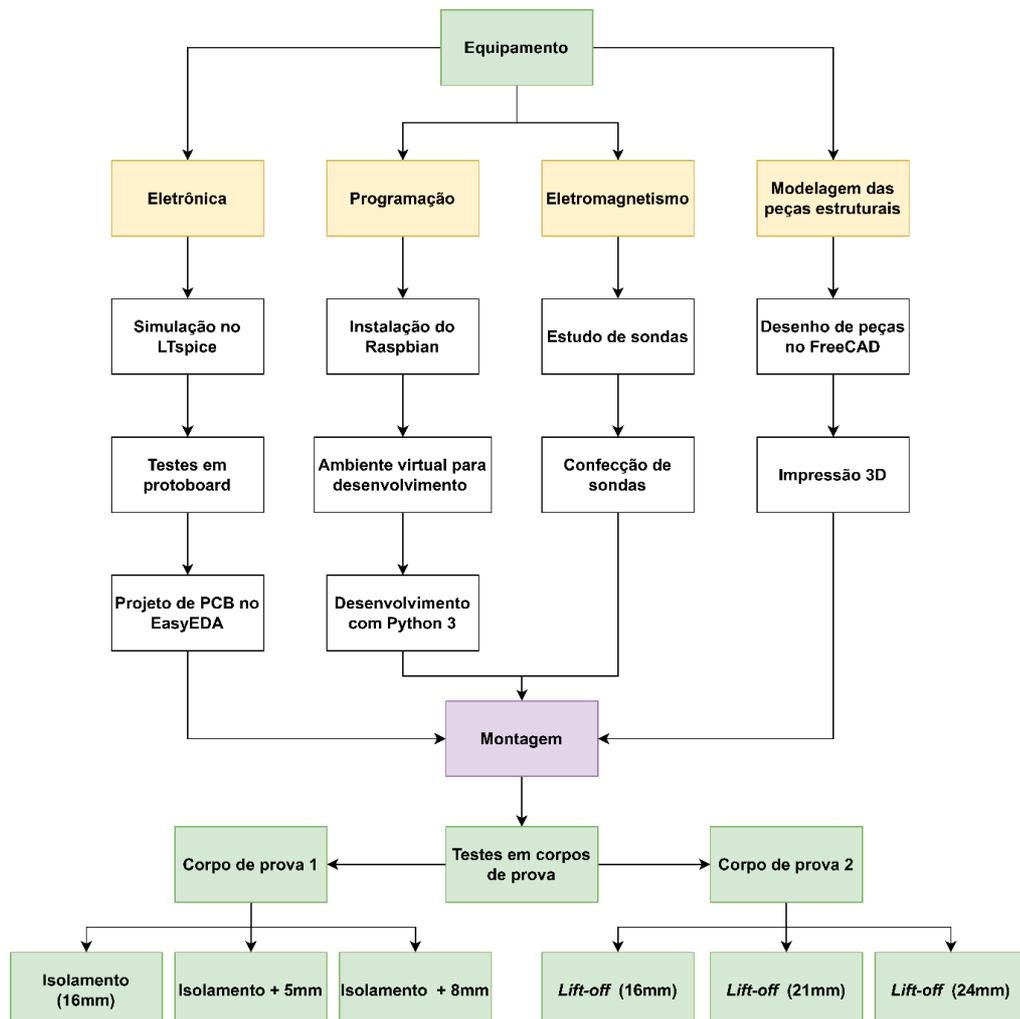
Dispositivos	Valor
Raspberry pi 4	R\$ 789,90
Tela sensível ao toque	R\$ 1.309,06
Fonte colmeia	R\$ 188,10
Fonte Raspberry pi	R\$ 138,90
Cobre esmaltado	R\$ 123,25
PCB do sistema de excitação x 5 peças	R\$ 140,87

Componentes do sistema de excitação	R\$ 50,00
Material para impressão 3D	R\$ 210,00
Ferrite	R\$ 34,80
Placa AD USB-204	R\$ 1.849,25
Baterias 18650	R\$ 88,00
Conectores	R\$ 50,00
Teclado Wireless	R\$ 40,90
Total	R\$ 5.013,03

3.2. Métodos

Neste tópico serão apresentados os métodos utilizados para a confecção do equipamento que foi dividido em quatro grupos: eletrônica, programação, eletromagnetismo e modelagem. A Figura 27 mostra o fluxograma com os passos utilizados para a realização dos testes em bancada até a montagem final do equipamento e os testes realizados. A seguir serão discutidos os passos de cada grupo.

Figura 27 - Fluxograma dos metodos utilizados para desenvolvimento do equipamento.



Na parte eletrônica do sistema foram realizados: simulação do circuito utilizando o LTspice, nessa etapa foram testados diversos circuitos e coletados sinais de saída dos componentes, que devem ser esperados na bancada; testes na protoboard utilizando gerador de sinais e osciloscópio; projeto da PCB no EasyEDA, com o circuito definido foi realizado o processo de alocação dos componentes na PCB e enviado os arquivos *gerber* para a empresa Griffus fazer a confecção da placa.

Em programação do sistema foram realizados: a instalação do sistema operacional Raspbian no Raspberry pi 3 e configuração para acessos aos periféricos, calibração da tela sensível ao toque e instalação de *drivers* da placa USB-204. A segunda etapa foi a configuração o ambiente de programação do VScode, com utilização da linguagem Python 3, tanto no Raspberry quanto em um notebook para acesso remoto. A última etapa foi a programação em Python 3 da interface do usuário, dos periféricos de acionamento da bobina e da leitura do sinal analógico da bobina sensora.

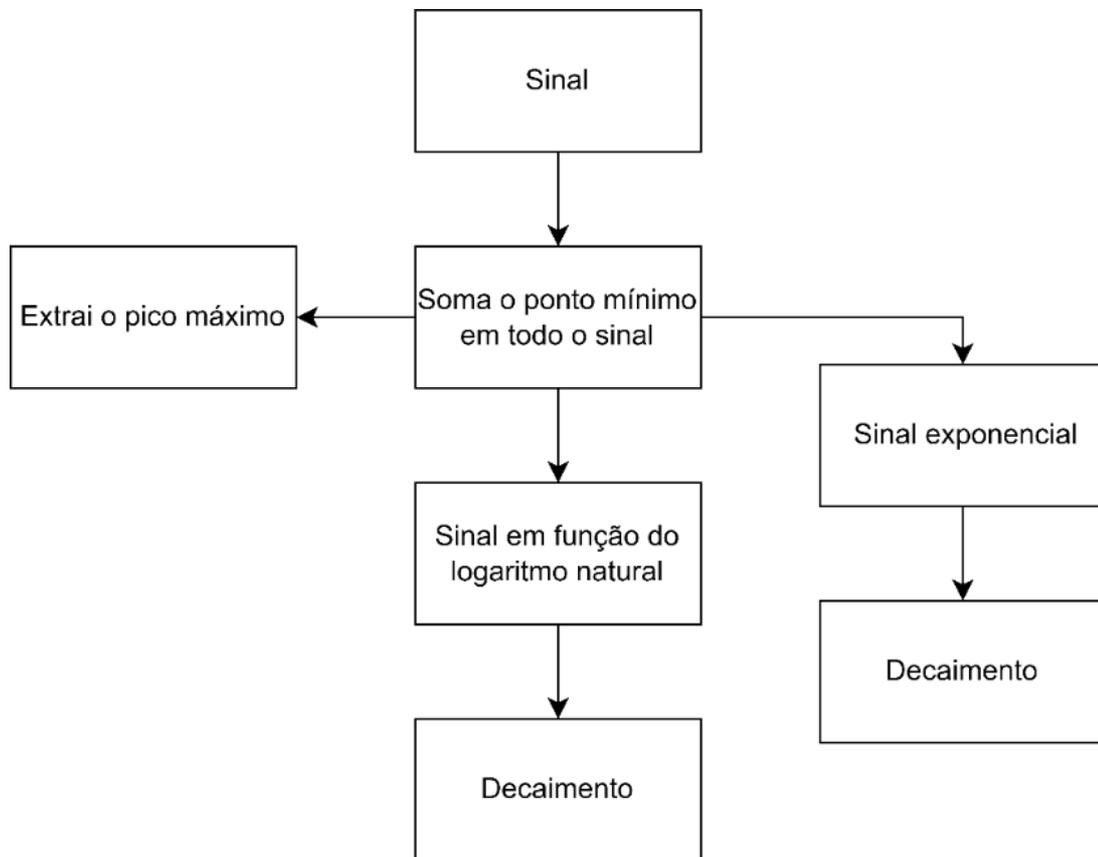
Na parte de eletromagnetismo, foram realizados: o estudo das sondas de inspeção em formato, posicionamento, quantidades de voltas, diâmetro do fio, tensão de excitação, tipos de núcleos e sensores. Na segunda etapa foi realizada a confecção da sonda.

A modelagem das peças estruturais do equipamento foi realizada em duas etapas: desenhos das peças do equipamento utilizando o FreeCAD e a impressão utilizando impressora 3D.

Ao final da montagem, foram realizados testes nos corpos de prova 1 e 2. No CP1 foram capturados sinais com o isolamento presente de 16 mm, com o isolamento mais 5 mm e com o isolamento mais 8 mm de *lift-off*. No CP2, foram capturados sinais com 16, 21 e 24mm de *lift-off*. Os sinais coletados em cada condição foram analisados tanto em função do logaritmo natural quanto em escala linear. Também foram capturados sinais com o equipamento Lyft, com os mesmos corpos de prova e a as mesmas variações de *lift-off*.

O sinal é processado pelo programa do equipamento e indica na tela o valor do decaimento na área selecionada para análise. No fluxograma da Figura 28 são apresentados os passos do processamento. Primeiro o sinal digitalizado é somado com o seu valor mínimo para garantir que o não existam valores negativos, o que implicaria na função do logaritmo natural. Já nessa primeira etapa, os valores de pico são coletados e de acordo com o que está configurado no equipamento, é mostrado o sinal em função do logaritmo natural ou em sua forma exponencial e é calculado o valor do decaimento de acordo com a equação 8.

Figura 28 - Fluxograma do processamento do sinal



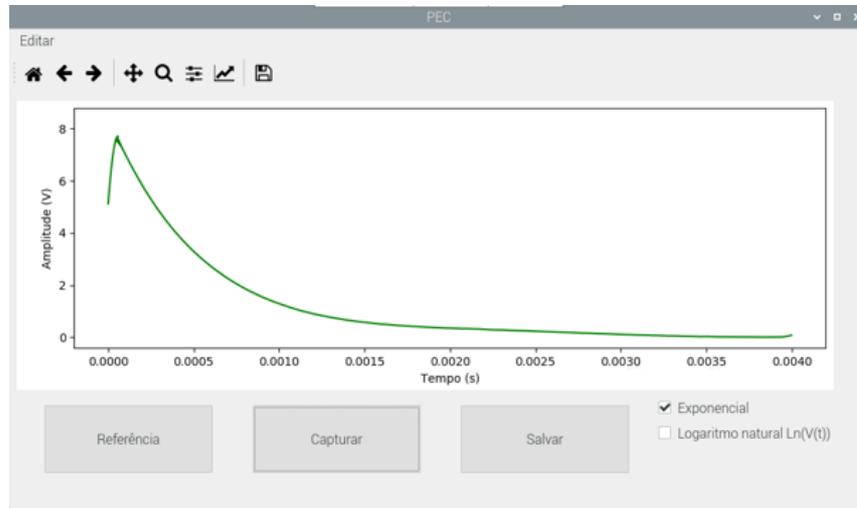
Os principais passos para os métodos da confecção do equipamento foram descritos nesta seção e na próxima serão apresentados os resultados obtidos.

4. RESULTADOS

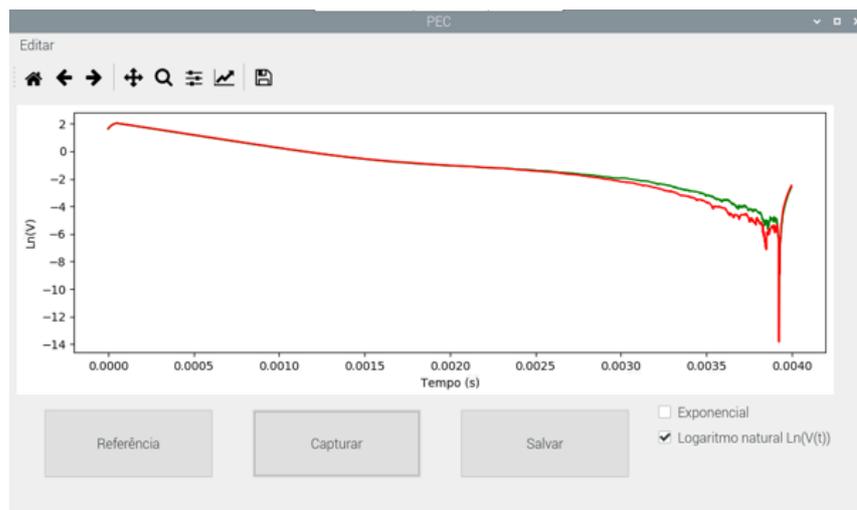
4.1. Programação em Python 3 (Interface com o usuário)

A interface com o usuário foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Python 3 em um ambiente de desenvolvimento Linux. Com o programa o usuário tem a possibilidade de visualização em tempo real do sinal capturado, sem a necessidade de exportar para algum programa de visualização gráfica. É possível alterar a forma de visualização do sinal, optando por exponencial, vide Figura 29 (a). É possível salvar uma referência de base para comparar os sinais em diferentes condições, Figura 29 (b). O usuário pode exportar os dados coletados em um arquivo de texto. Parâmetros de excitação também podem ser editados, como a frequência e o *duty cycle*.

Figura 29 - Tela inicial do programa do equipamento. (a) Sinal com escala linear. (b) Sinal com escala linear com referência.



(a)



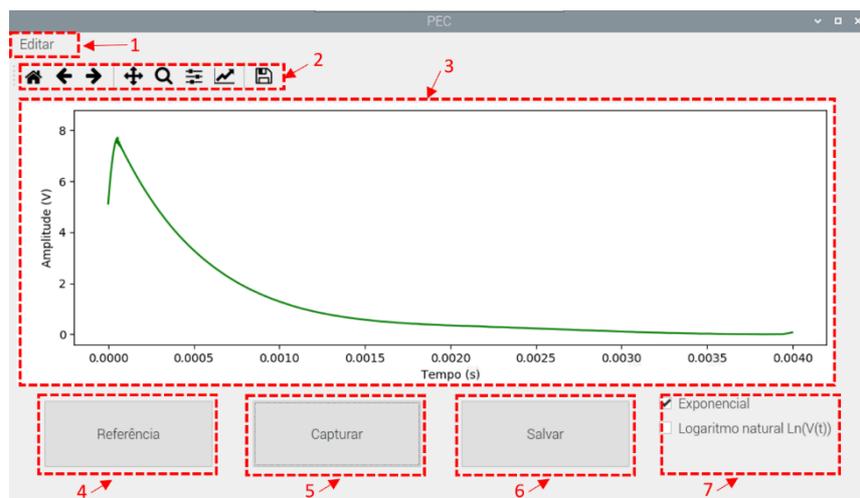
(b)

Na Figura 30 são marcadas as ações que podem ser utilizadas no programa. Cada marcação é explicada abaixo.

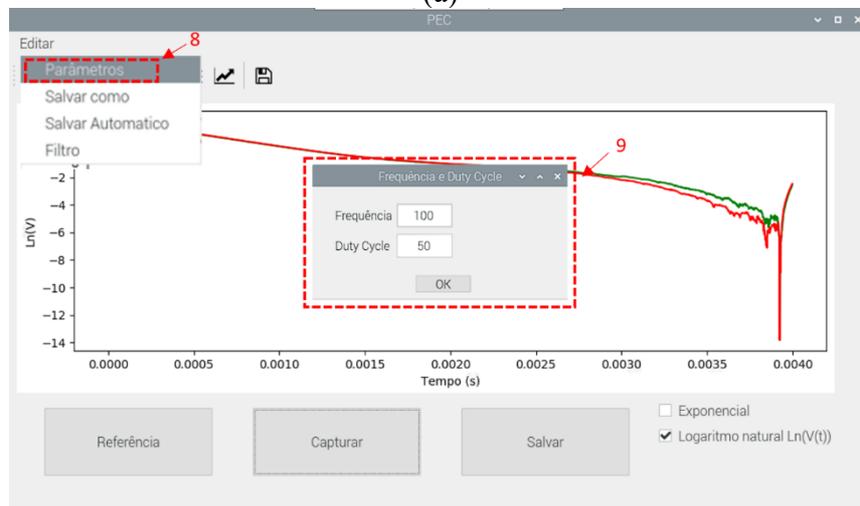
1. Editar: Ao clicar neste botão o usuário abre o menu de edição do aparelho, onde é possível editar os parâmetros de excitação, local de salvar os sinais, salvar de forma automática e aplicar o filtro Savitzky-Golay.
2. Edição do gráfico: Nesta aba o usuário tem ferramentas para manipular o gráfico do sinal, como aplicar zoom, movimentar e salvar uma imagem.
3. Área do gráfico: Região onde o sinal é plotado.

4. Referência: Botão onde o usuário salva um sinal de referência para comparação com os próximos que serão capturados.
5. Capturar: Botão onde o usuário captura o sinal.
6. Salvar: Botão onde o usuário salva o sinal.
7. Exponencial/Logaritmo natural: Botão onde o usuário configura se o sinal apresentado será exponencial ou em função do logaritmo natural.
8. Parâmetros: Botão para acessar o menu de parâmetros para modificar a excitação da sonda.
9. Menu de frequência e *duty cycle*: Menu onde o usuário modifica a excitação da sonda.
10. Indicação do decaimento e inverso do decaimento: Esse valor só aparece quando o usuário dá zoom em um local do gráfico.

Figura 30 - Tela inicial do programa com marcações. (a) Principais funções. (b) Configurações. (c) Valor de decaimento.



(a)



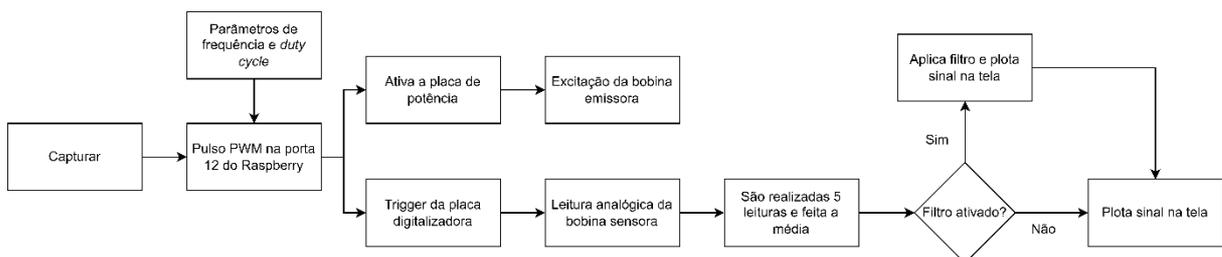
(b)



(c)

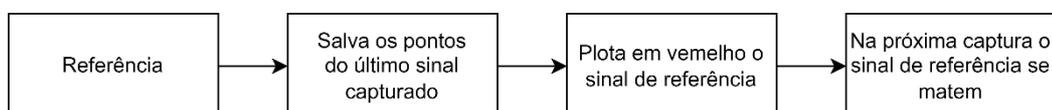
A sequência de ações ao pressionar-se o botão de capturar é apresentado na Figura 31. Ao pressionar, o software gera o pulso PWM na porta 12 do Raspberry pi com os parâmetros de frequência e *duty cycle* que por padrão são de 100 Hz e 50% respectivamente. O pulso satura o Mosfet da placa de potência, que por sua vez excita a bobina emissora. A placa digitalizadora entra em modo de captura e quando o valor de trigger é atingido (2.5VDC) o sinal começa a ser convertido de analógico para digital, são feitas 5 leituras e realizada a média. Se o parâmetro do filtro estiver ativado é aplicado o filtro Savitzky-Golay, para suavizar o sinal, e o sinal é plotado, se não o sinal é plotado como capturado.

Figura 31 - Sequência de ações ao pressionar o botão de capturar.



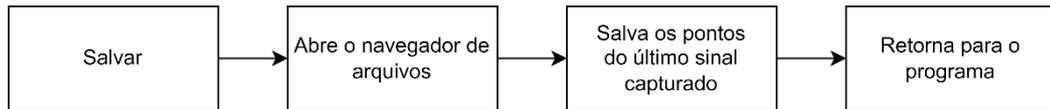
Ao clicar no botão de referência o programa executa das ações da Figura 32. Para plotar o sinal de referência o usuário já deve ter capturado um sinal. Esse sinal é salvo em uma variável de referência e sempre será plotado na cor vermelha quando outros sinais foram capturados.

Figura 32 - Sequência de ações ao pressionar o botão de referência.



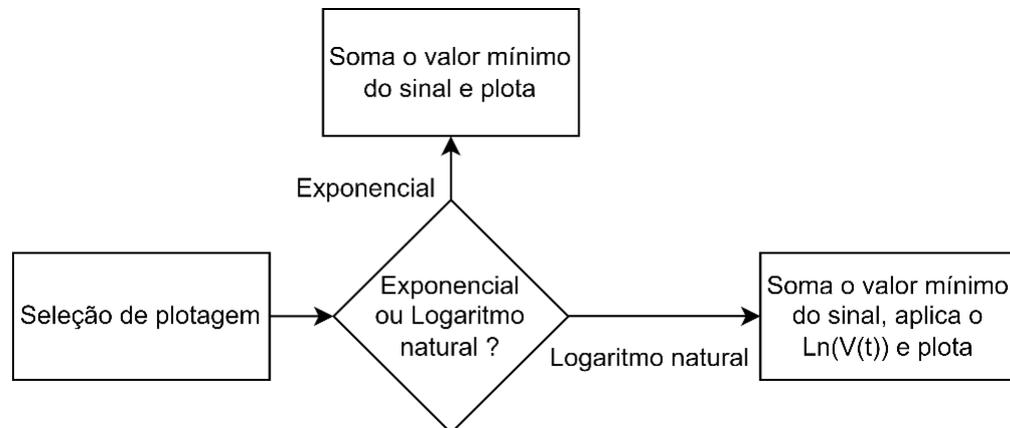
Quando o botão salvar é pressionado o programa executa as ações da Figura 33. O navegador de arquivos é aberto, o usuário digita o nome do arquivo e salva os pontos de amplitude e tempo do sinal no formato de texto em um arquivo “.txt” com valores separados por ponto e vírgula. Depois de criar o arquivo o programa retorna para a página inicial.

Figura 33 - Sequência de ações ao pressionar o botão de salvar.



Quando o usuário seleciona se deseja o sinal exponencial ou em função do logaritmo natural o programa executa das ações da Figura 34. Se selecionado a forma linear o programa soma o valor mínimo do sinal para que o sinal esteja totalmente positivo e quando é selecionado em função do logaritmo natural o programa também soma o valor mínimo, aplica o $\ln(V(t))$ e plota o sinal na tela.

Figura 34 - Sequência de ações ao selecionar o tipo de plotagem.



4.2. Sistema eletrônico

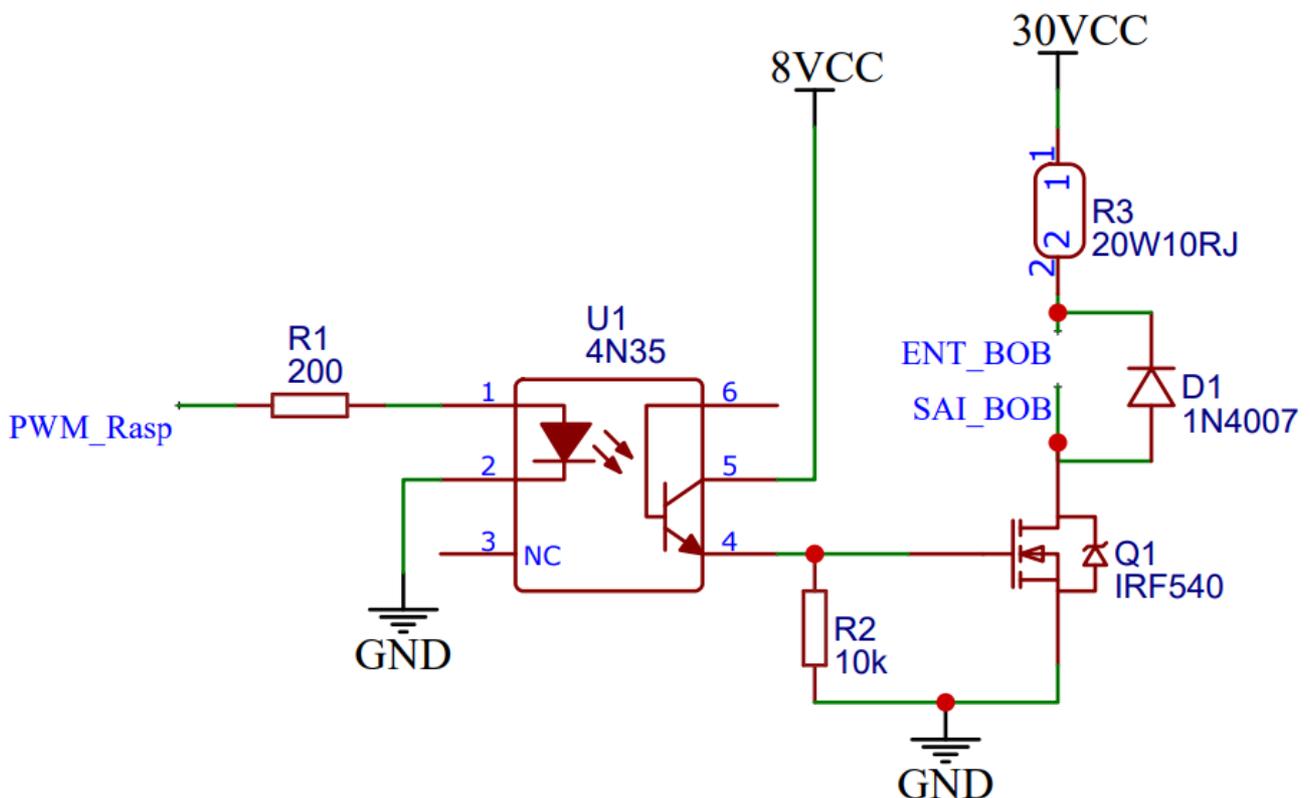
O sistema eletrônico é composto pelo Raspberry pi, placa de potência, pela placa USB-204, tela sensível ao toque e fontes de alimentação.

A placa de potência é um componente eletrônico utilizado para controlar e gerenciar a distribuição de energia elétrica em dispositivos eletrônicos, máquinas industriais e sistemas de automação. Essas placas desempenham um papel fundamental na conversão e regulação da energia elétrica para garantir o funcionamento adequado de vários componentes e circuitos em

um sistema. Nesse trabalho o sistema de potência foi desenvolvido para o controle da excitação da bobina.

A Figura 35 mostra o esquema elétrico projetado para a excitação. O Raspberry pi trabalha com níveis lógicos de 3.3 V e 16 mA por porta, a partir desses dados foi possível calcular o resistor 1 (R1) com 200Ω e $\frac{1}{4}$ W. Esse resistor é utilizado para limitar a corrente que aciona o optoacoplador (U1) modelo 4N35. O optoacoplador é utilizado para isolar um lado do circuito de outra parte, nesse caso isola o Raspberry pi do sistema de potência do Mosfet (Q1) modelo IRF540. O componente Q1 foi escolhido por conta da sua robustez, tensão limite de 100 V e resistência de $0,077 \Omega$ entre o *drain* e o *source*. O resistor R2 de $10 \text{ K}\Omega$ e $\frac{1}{4}$ W foi utilizado para fazer ligar o *gate* de Q1 com o 0 V durante a ausência de tensão positiva, *pull down*. O resistor R3 de 10Ω e 20 W foi utilizado para reduzir a constante de tempo do sistema e o nível de tensão presente na bobina. D1 é um diodo modelo 1N4007, mais conhecido como diodo de roda livre e foi utilizado para evitar o efeito de ondulação *Ripple*, protegendo o sistema de picos de tensão durante a descarga da bobina. A bobina é inserida em ENT_BOB e SAI_BOB, que são conectores do tipo borne.

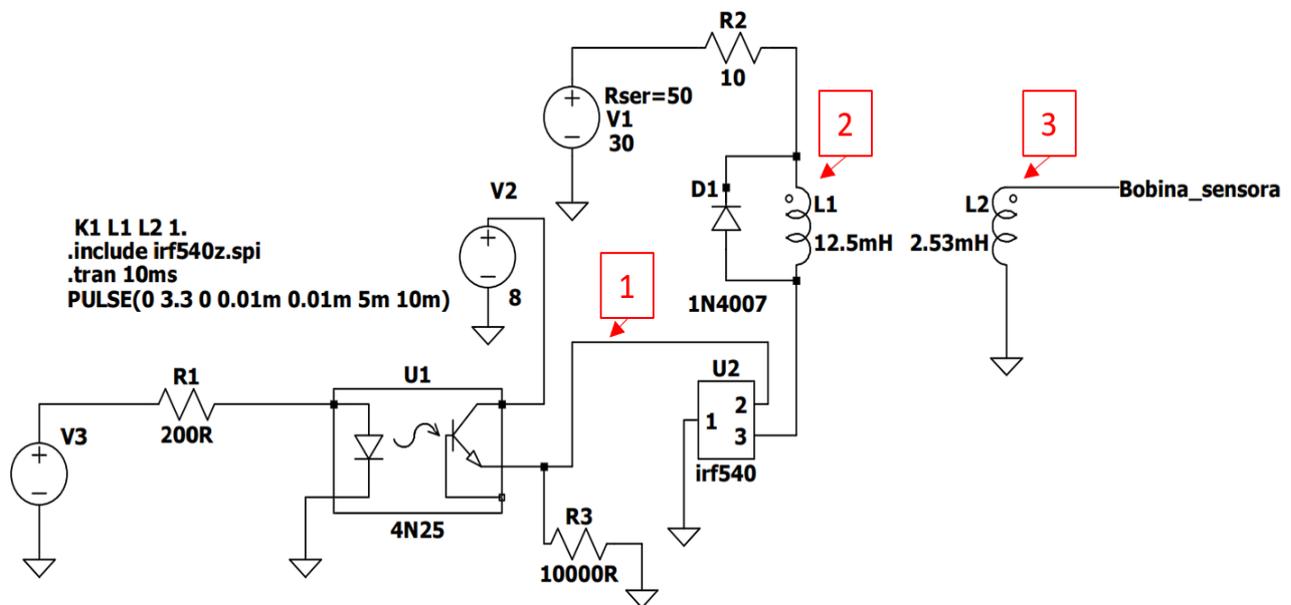
Figura 35 - Circuito de potência.



Com o esquemático elétrico projetado, foram feitas simulações do circuito utilizando o LTspice, como mostrado na Figura 36. Os parâmetros de simulação foram:

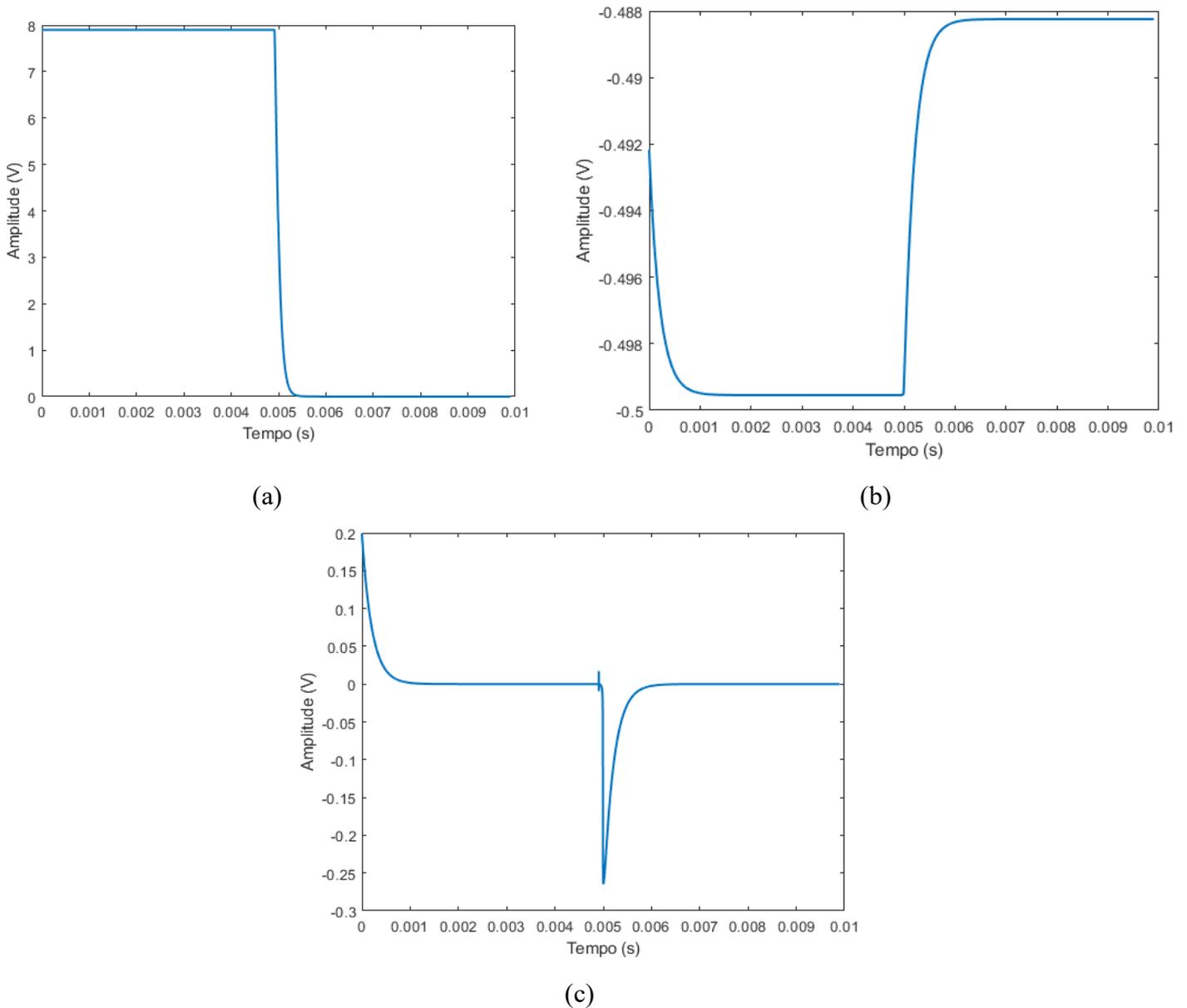
- O coeficiente de acoplamento entre as bobinas foi de 1 (acoplamento perfeito);
- Tempo de simulação foi de 10 ms e 1 ns para cada interação;
- Pulso quadrado de 0 V até 3.3 V, com tempo de subida e descida de 0.01 ms, *duty cycle* de 50 % e frequência de 100 Hz;
- A bobina de excitação foi configurada para 12.5 mH e a sensora com 2.53 mH;
- As fontes foram configuradas com 50 Ω de resistência interna.

Figura 36 - Circuito de simulação no LTspice.



Os pontos 1, 2 e 3 em vermelho foram analisados para estudar o comportamento do circuito no simulador. A Figura 37 (a) mostra o pulso quadrado capturado no ponto 1, esse pulso irá saturar o Mosfet irf540, fazendo com que a corrente percorra a bobina excitadora (L1). Na Figura 37 (b) é medida a tensão na bobina emissora (L1), onde é possível observar a variação de tensão durante o chaveamento e como consequência a variação do fluxo magnético. Na Figura 37 (c) é apresentado a tensão na bobina sensora (L2), fica evidente o efeito da lei de Lenz que, quando houver uma variação de fluxo magnético sobre um condutor fechado, surgirá, nesse condutor, um campo magnético que se oporá a tal variação. É possível observar uma perturbação no sinal poucos instantes antes da parte negativa. Essa perturbação é uma característica do circuito que também foi percebida na bancada.

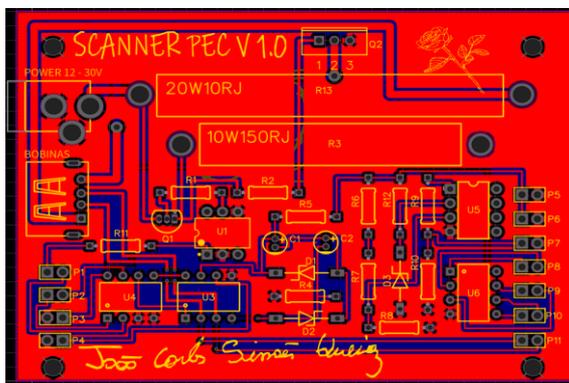
Figura 37 - Sinais da simulação do circuito. (a) Pulso de entrada do Mosfet. (b) Sinal da bobina sensora. (c) Sinal na bobina emissora.



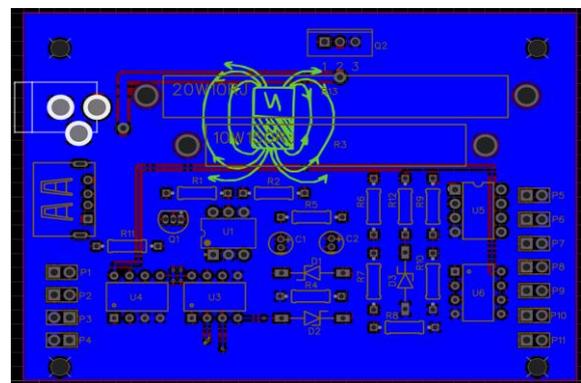
No terceiro passo foi realizado o projeto da PCB no EasyEDA, a placa é o “coração” do equipamento. É por ela que a sonda é excitada e qualquer variação de tensão ou ruído que aconteça no circuito incide no sinal de resposta. Os componentes utilizados no passo anterior foram posicionados e soldados na placa que tem dimensões de 91 mm x 65 mm. Na Figura 38 (a) é apresentada a disposição dos componentes e as trilhas na parte superior da PCB. As trilhas foram dimensionadas para a passagem da corrente máxima requerida de 1A. Os componentes com alta dissipação de calor foram posicionados na parte superior para facilitar a refrigeração. A Figura 38 (b) mostra a face inferior da PCB e a Figura 38 (c) ilustra o desenho 3D de como é a disposição dos componentes pós soldagem. Na Figura 38 (d) é apresentado a PCB crua

usinada que foi confeccionada pela empresa Griffus PCB a partir do arquivo *gerber* enviado. A Figura 38 (e) e (f) apresenta, respectivamente, a face superior e inferior da PCB com os componentes soldados. Nota-se a ausência de alguns componentes na PCB que não foram citados durante o projeto do esquemático e da simulação, isso se dá porque essa placa será utilizada para projetos futuros.

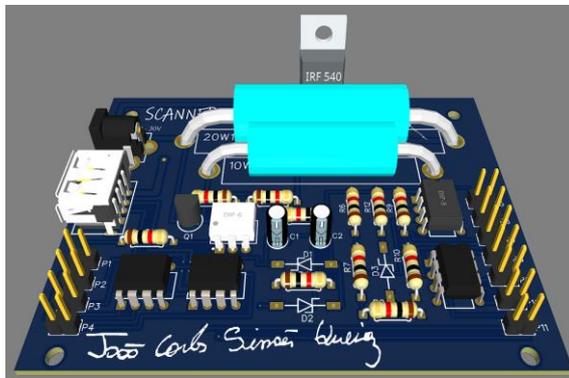
Figura 38 - (a) Face superior da PCB. (b) Face inferior da PCB. (c) Modelagem da PCB. (d) PCB crua usinada. (e) Face superior com os componentes. (f) Face inferior com os componentes.



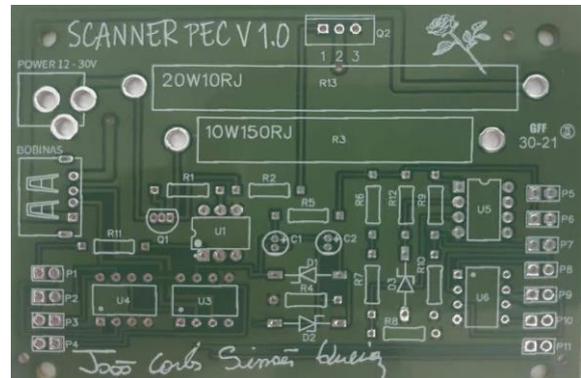
(a)



(b)



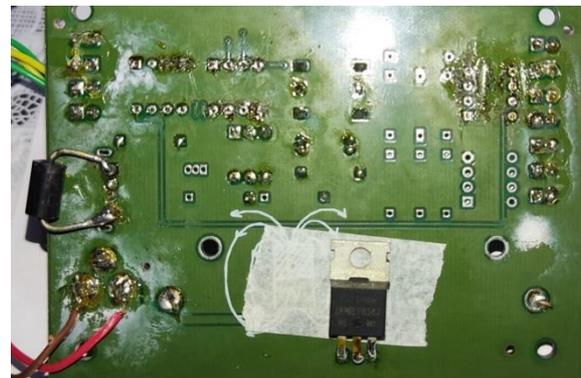
(c)



(d)



(e)

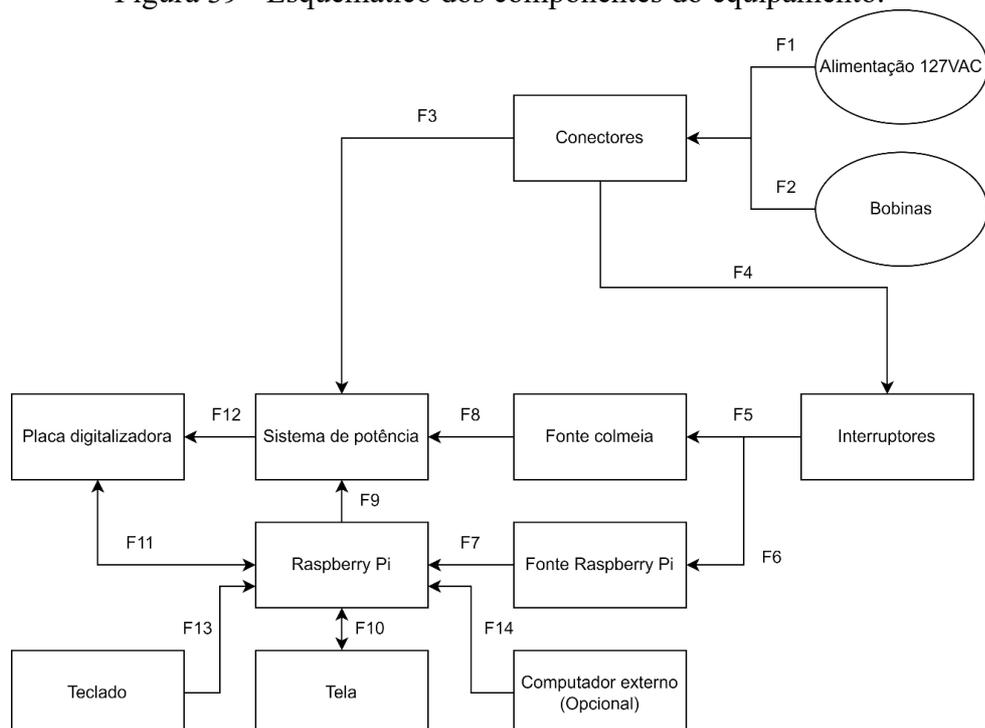


(f)

O esquemático pode ser visto na Figura 39 mostra o esquemático dos componentes no equipamento, onde cada um está ligado:

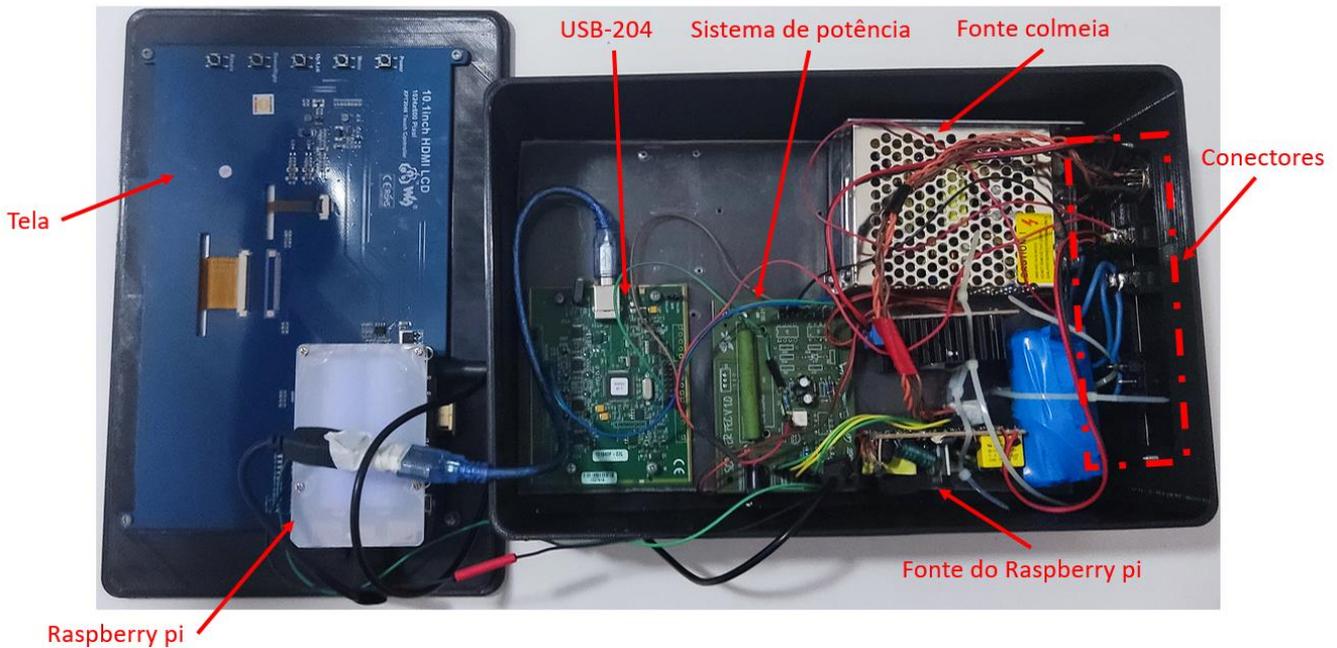
- F1 é a ligação do conector de 127 Volts alternados (VAC);
- F2 é o conector de 4 vias da bobina;
- F3 é a ligação da bobina com o sistema de excitação;
- F4 é a ligação de 127 VAC para o interruptor das fontes chaveadas;
- F5 e F6 é a ligação em paralelo do interruptor gangorra com as fontes chaveadas;
- F7 é a alimentação de 5 VDC independente para o Raspberry Pi;
- F8 é a ligação de 12 VDC para o sistema de potência;
- F9 ligação de controle de PWM do Raspberry Pi com o sistema de potência, foi utilizada a GPIO 12 do processador;
- F10 é a ligação USB e HDMI com a tela sensível ao toque;
- F11 a ligação de comunicação via USB da placa digitalizadora com o Raspberry Pi;
- F12 é o envio de dados do sistema de potência para a placa digitalizadora (sinal da bobina e *trigger*);
- F13 é a ligação via USB/*wireless* do teclado;
- F14 é uma ligação opcional que utiliza o programa *VNC Viewer* para proporcionar a utilização do equipamento a distância utilizando a internet.

Figura 39 - Esquemático dos componentes do equipamento.



A Figura 40 mostra a disposição dos componentes citados acima dentro da caixa do equipamento.

Figura 40 - Disposição dos componentes no equipamento.



4.3. Sonda

A sonda desenvolvida foi do modelo bobina-bobina concêntrica com núcleo de ferrite, como mostra a Figura 41. O carretel interno foi enrolado com 250 voltas e indutância de 12,5mH, o externo com 500 voltas e indutância de 2,53mH de cobre esmaltado AWG 30. A dimensões da sonda pode ser vista na Figura 42.

Figura 41 - Vista explodida da sonda utilizada.

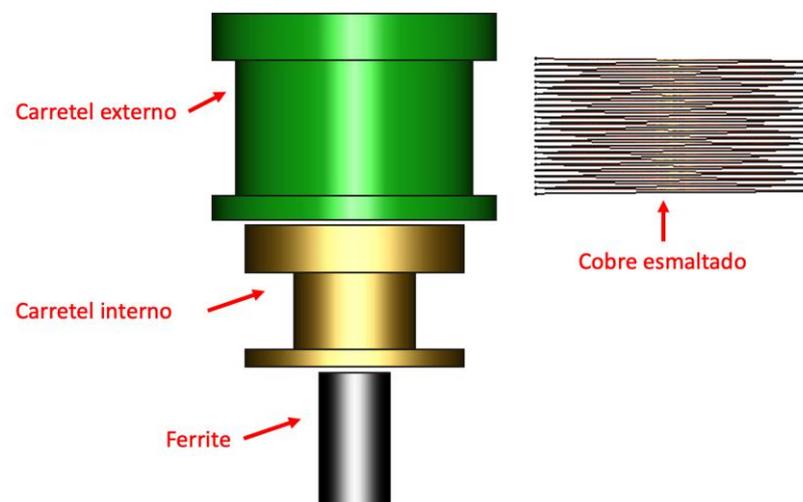
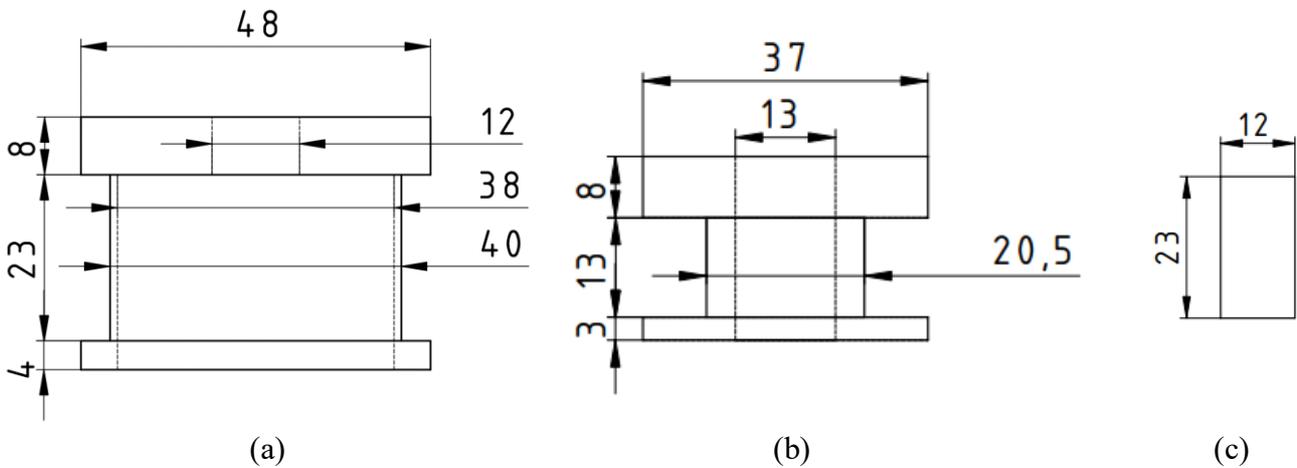
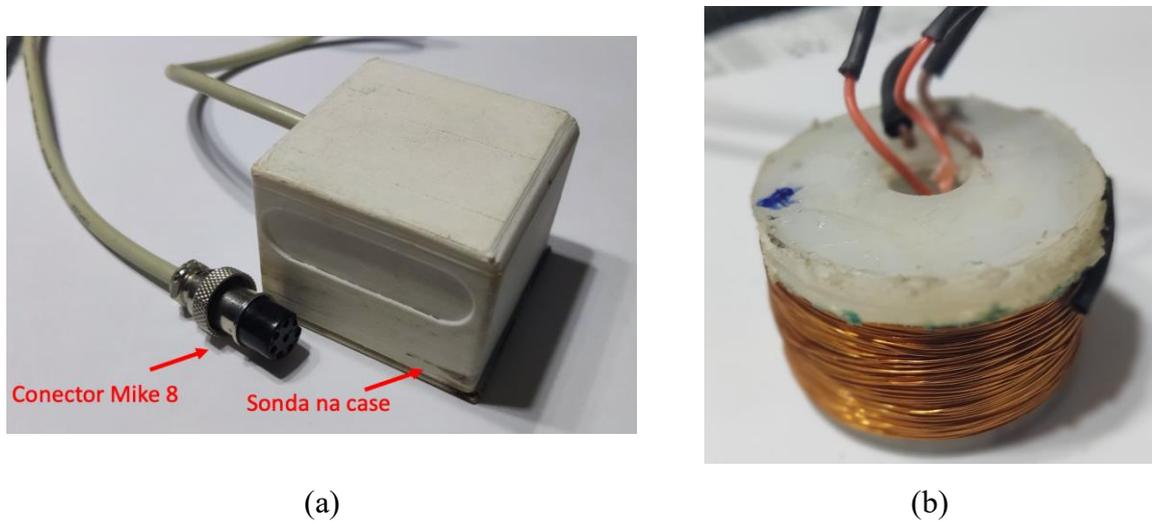


Figura 42 - Dimensões da sonda em mm. (a) Carretel externo. (b) Carretel interno. (c) Ferrite.



A sonda foi condicionada dentro de um estojo para melhor manuseio e utiliza um conector Mike 8 para fácil encaixe no aparelho, Figura 43 (a). A Figura 43 (b) mostra a sonda fora do estojo.

Figura 43 - Sonda. (a) Sonda na case. (b) Sonda fora da case.



4.4. Caixa do aparelho

A Figura 44 mostra o modelo 3D da caixa do equipamento que foi modelado no software FreeCAD. A Figura 45 mostra as dimensões: altura 196 mm, comprimento 157,96 mm e largura 300,49 mm. A

Figura 44 - Modelo 3D da caixa do equipamento.

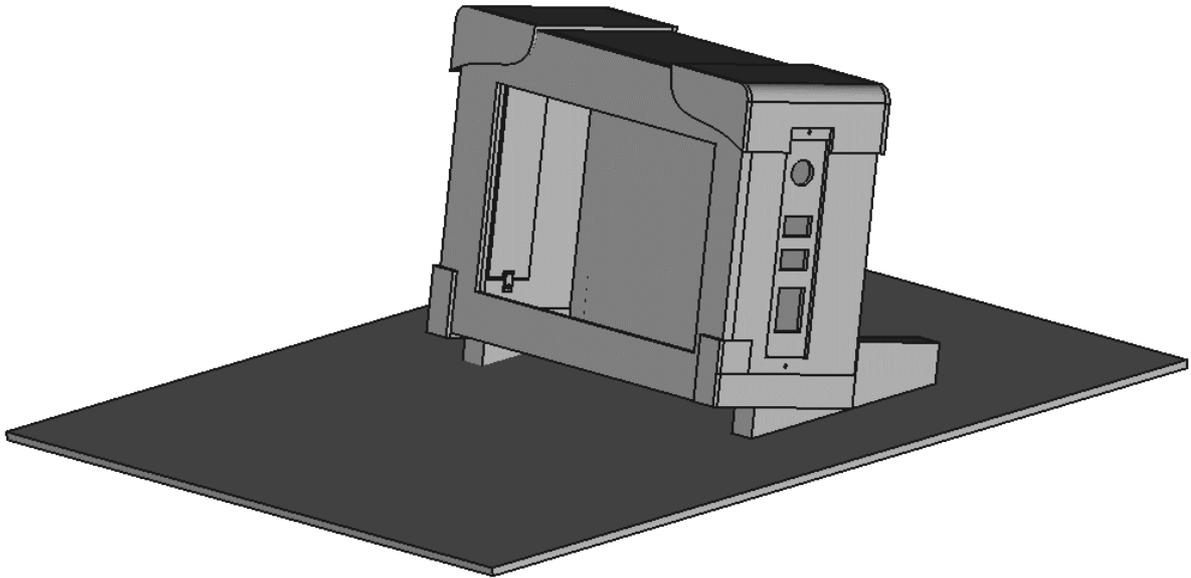
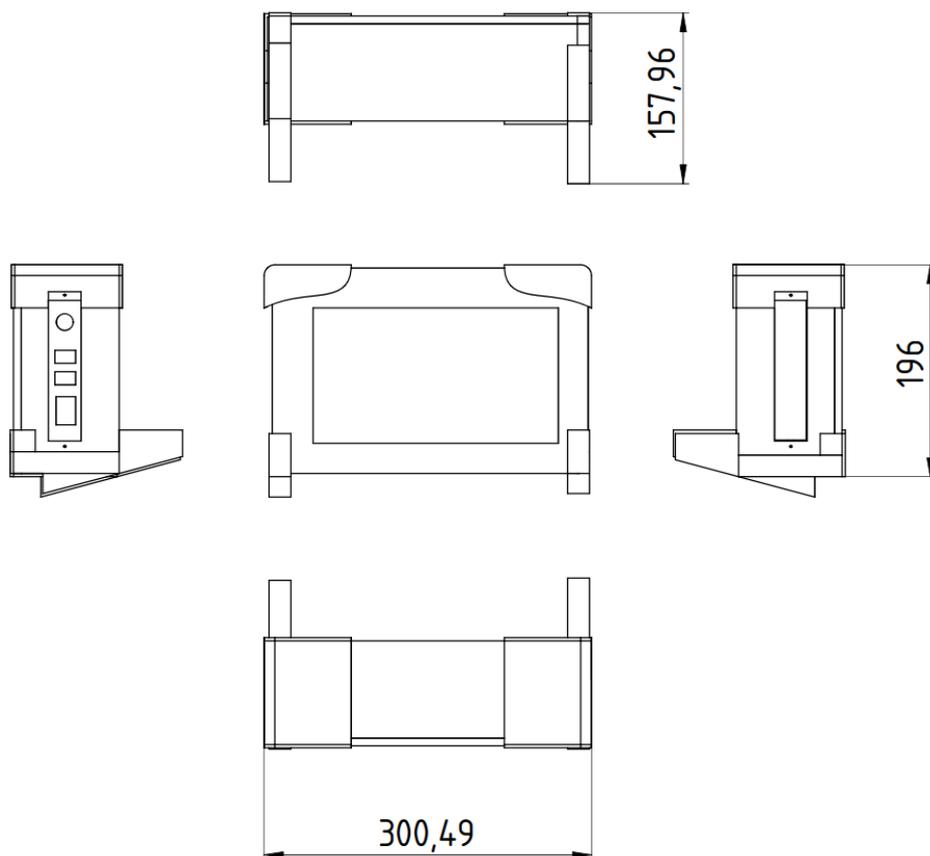
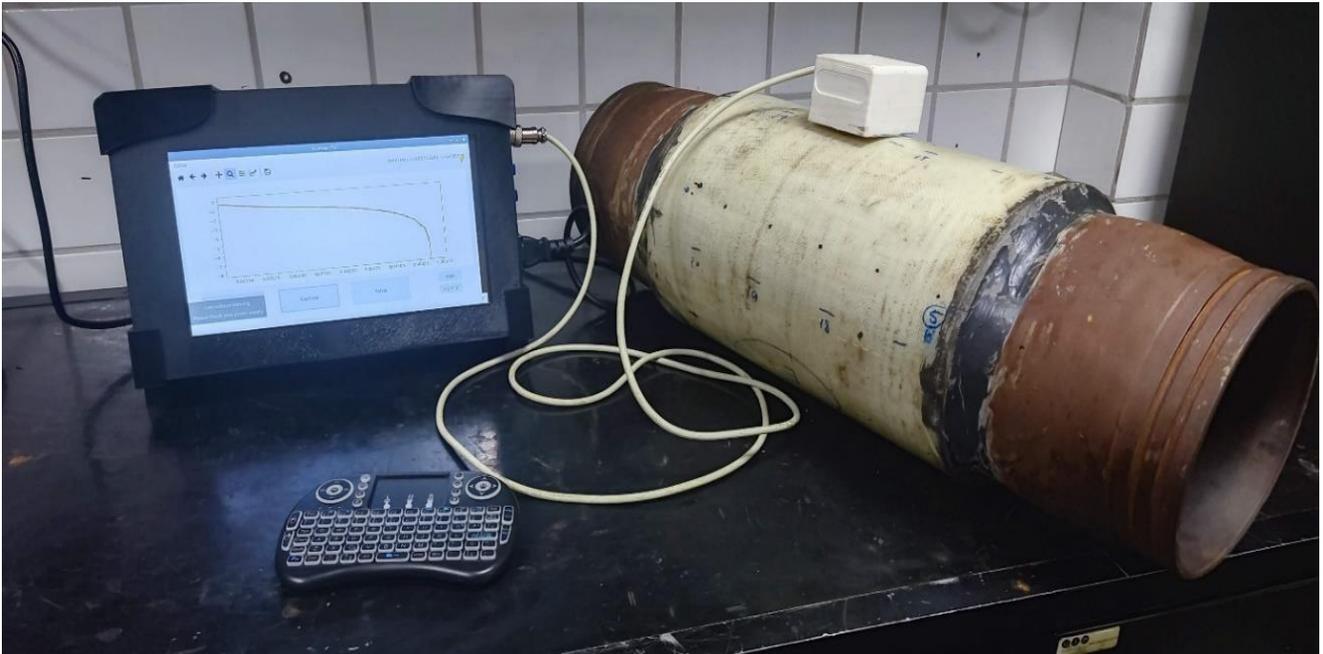


Figura 45 - Dimensões da caixa do equipamento.



A Figura 46 mostra uma foto do equipamento ao lado do CP 1, é possível observar também o teclado sem fio e a sonda posicionada acima do isolamento. A tela do aparelho exibe o programa desenvolvido com a plotagem de um sinal em função do logaritmo natural.

Figura 46 - Foto do equipamento ao lado do CP 1.



4.5. Testes

Foram realizados testes em ambos os corpos de prova com o objetivo de compreender o efeito do afastamento da sonda em relação à superfície de inspeção. Foram capturados sinais com diferentes valores de *lift-off*, conforme apresentados na Tabela 3. Além disso, os sinais foram analisados tanto de forma exponencial como em função do logaritmo natural. Também foram capturados sinais no equipamento comercial Lyft, adquirindo a espessura dada na tela do aparelho.

Tabela 3 - Afastamento da sonda em relação a superfície metálica dos CPs.

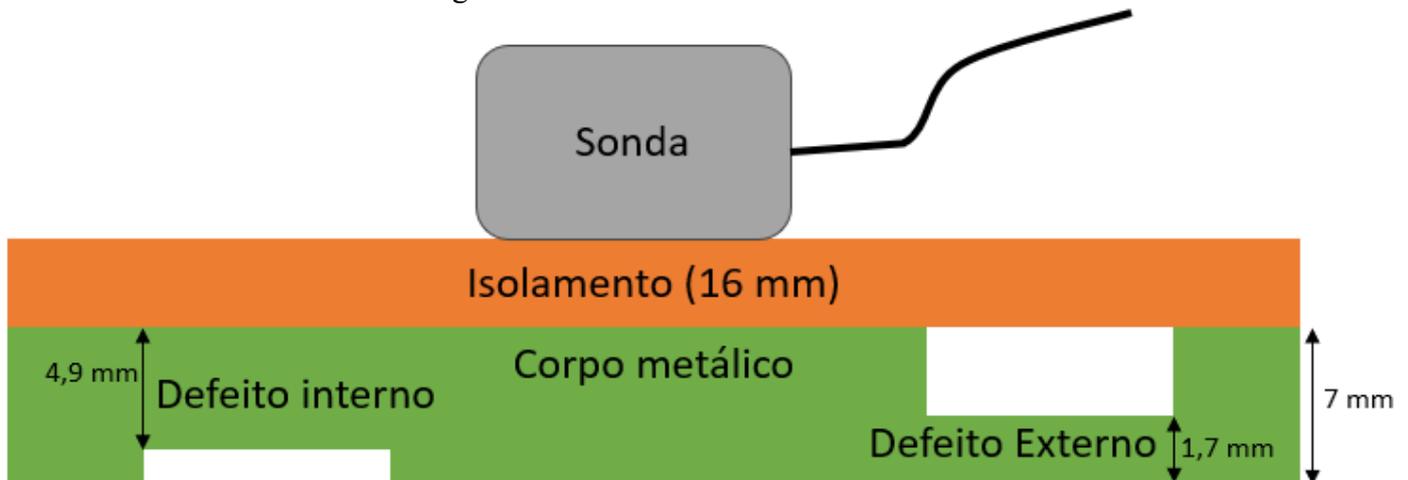
	CP 1	CP 2
Captura 1	Isolamento (16 mm)	<i>lift-off</i> de 16mm
Captura 2	Isolamento + 5 mm (21mm)	<i>lift-off</i> de 21mm
Captura 3	Isolamento + 8 mm (24mm)	<i>lift-off</i> de 24mm

4.5.1. Corpo de prova 1

4.5.1.1. Teste usando *lift-off* de 16 mm

O primeiro sinal capturado no CP1 foi com a sonda sobre o isolamento como mostra a Figura 47.

Figura 47 - Sonda sobre a o isolamento.

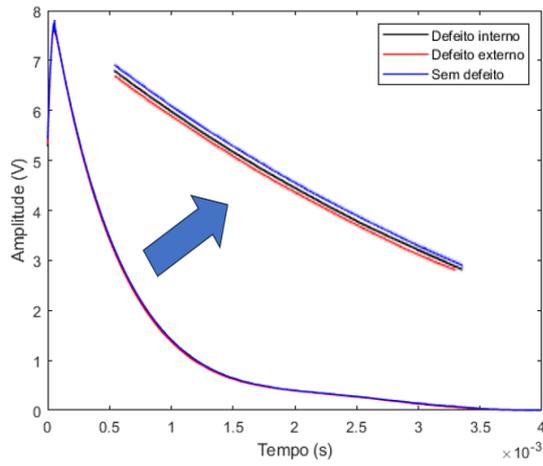


A Figura 48 (a) mostra o sinal somado com o valor mínimo. Em preto é o sinal capturado na região do defeito interno, em vermelho na região do defeito externo e em azul em uma região sem defeito. É possível observar que a amplitude do sinal sem defeito está mais elevada que os demais. O valor do pico também demonstra essa característica, Figura 48 (b).

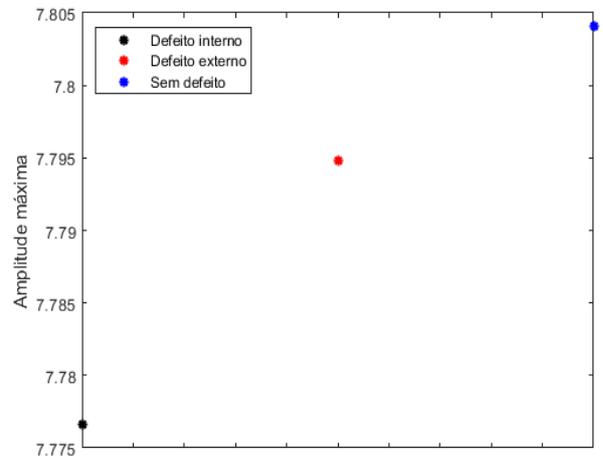
Foi escolhido uma posição no sinal onde o decaimento se apresentou mais acentuado para fazer a classificação, destacado na Figura 48 (a), onde o sinal da região sem defeito tem uma amplitude maior que as outras regiões. É possível separar as três regiões, onde o sinal do defeito interno está no meio por conta da maior presença de material metálico que na região de defeito externo. Na Tabela 4 são apresentados os valores de decaimento. O sinal que mais decaiu foi do defeito externo, por conta da redução de massa metálica, em seguida foi a região com defeito interno e por último sem defeito.

A Figura 48 (c). mostra o sinal em função do logaritmo natural, nessa forma do sinal é mais perceptível a amplitude do sinal da região sem defeito. Também foi selecionado uma região onde teve maior diferença de decaimento, Figura 48 (d). A Tabela 5 mostra os valores de decaimento do sinal, a região sem defeito apresentou o maior decaimento, contudo não houve uma diferença acentuada entre os sinais de defeitos internos e externos.

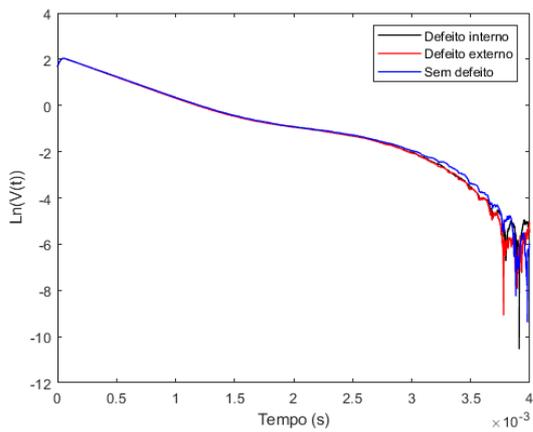
Figura 48 - Sinais capturados com 16 mm de *lift-off*. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



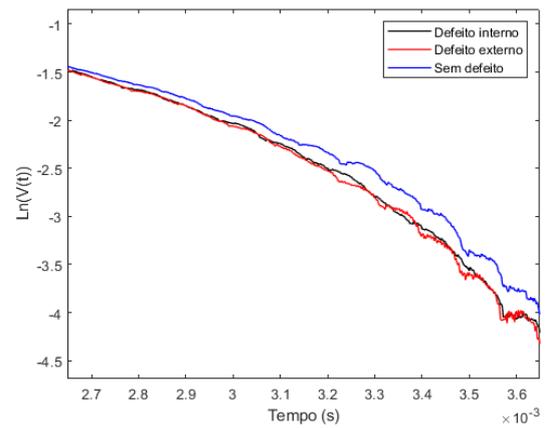
(a)



(b)



(c)

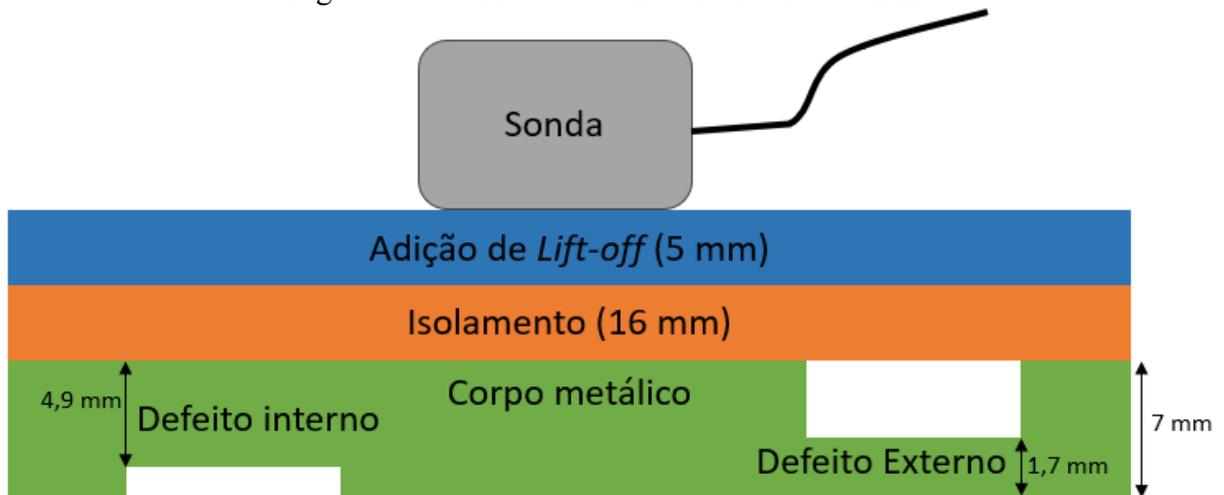


(d)

4.5.1.2. Teste usando *lift-off* de 21 mm

O segundo conjunto de sinais foram coletados com adição de 5 mm no isolamento já presente no CP1, totalizando 21 mm de *lift-off*, conforme a Figura 49.

Figura 49 - Sonda sobre o isolamento mais 5 mm.

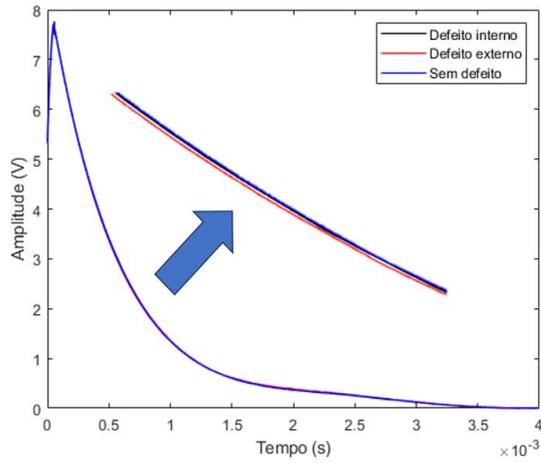


A Figura 50 (a) mostra o sinal exponencial capturado com *lift-off* de 21 mm. Nessa condição o sinal da região sem defeito tem uma amplitude mais semelhante com relação aos sinais dos defeitos interno e externo. Por conta do aumento do *lift-off* tem menos linhas de campo eletromagnético interagindo com o material, com isso o sinal perde amplitude. O valor do pico também demonstra essa característica, Figura 50 (b).

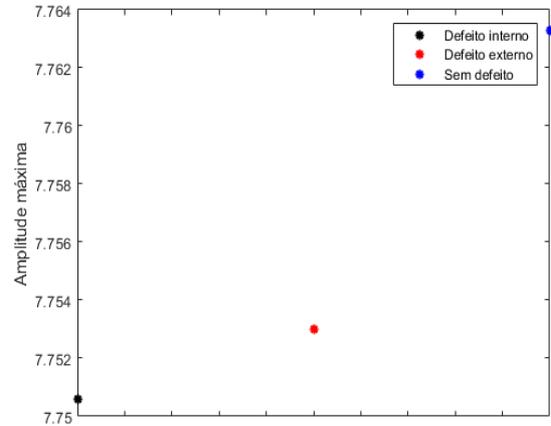
Foi escolhido uma posição no sinal onde o decaimento se apresentou mais acentuado para fazer a classificação, destacado na Figura 50 (a), nessa condição não é mais possível distinguir a região sem defeito da região do defeito interno por conta da profundidade da perda de massa em relação a superfície de medição. Na Tabela 4 são apresentados os valores de decaimento. O sinal que mais decaiu foi do defeito interno, em seguida foi a região sem defeito e por último a região com defeito externo.

A Figura 50 (c) mostra o sinal em função do logaritmo natural, nessa forma do sinal é mais perceptível a amplitude da região sem defeito. Também foi selecionado uma região onde teve maior diferença de decaimento, Figura 50 (d). A Tabela 5 mostra os valores de decaimento do sinal, a região sem defeito apresentou o maior decaimento, em seguida foi o sinal na região de defeito interno e por último o sinal de defeito externo. Se o sinal fosse janelado em 3.5 ms existira uma separação das regiões.

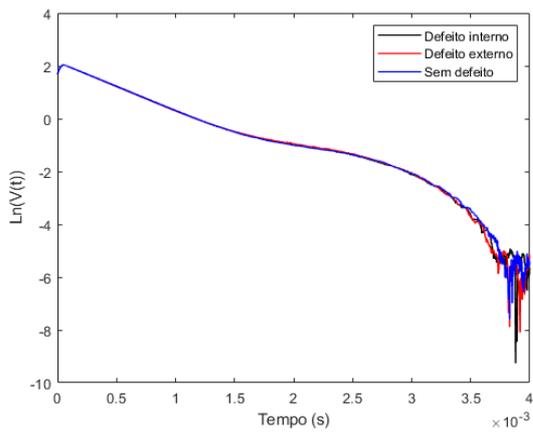
Figura 50 - Sinais capturados com 16 mm de *lift-off*. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



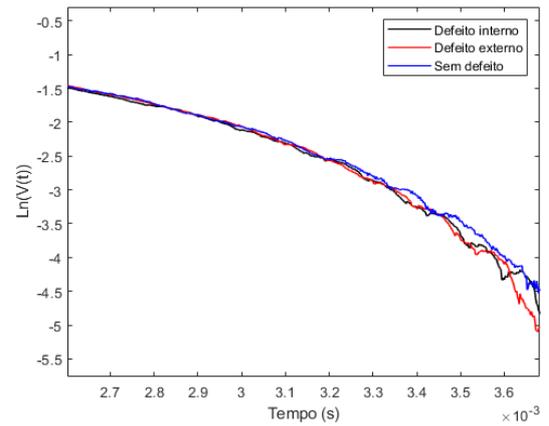
(a)



(b)



(c)

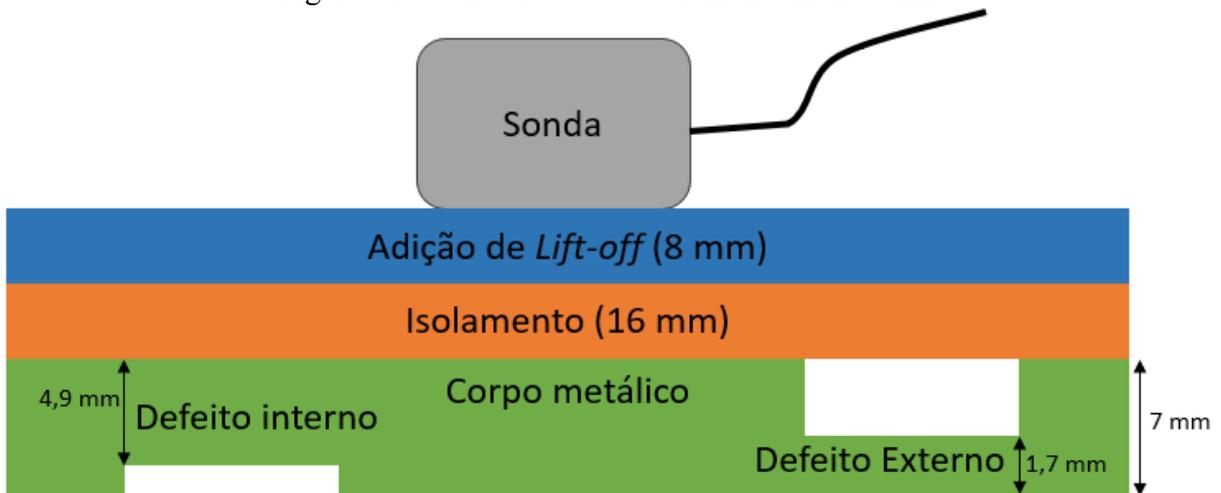


(d)

4.5.1.3. Teste usando *lift-off* de 24 mm

O terceiro conjunto de sinais foi coletado com adição de 8 mm no isolamento já presente no CP1, totalizando 24 mm de *lift-off*, conforme a Figura 51.

Figura 51 - Sonda sobre a o isolamento mais 8 mm.

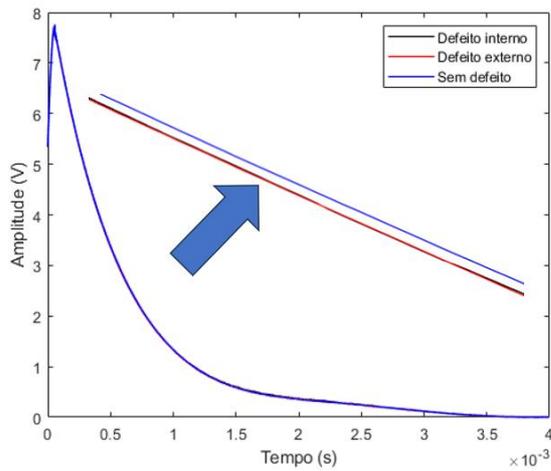


A Figura 52 (a) mostra o sinal exponencial capturado com *lift-off* de 24 mm. Nessa condição os sinais apresentam amplitudes semelhantes, por conta do aumento do *lift-off* poucas linhas de campo interagem com o material, a sonda não consegue diferenciar as regiões. Os valores do pico, Figura 52 (b), estão bem próximos, sem uma diferença expressiva para conseguir classificar.

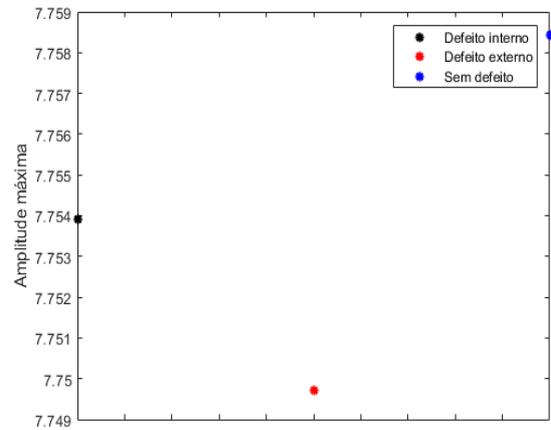
Foi escolhido uma posição no sinal onde o decaimento se apresentou mais acentuado para fazer a classificação, destacado na Figura 52 (a), onde é possível ver a diferença, contudo os níveis de voltagem estão muito próximos. Na Tabela 4 são apresentados os valores de decaimento. O sinal que mais decaiu foi do defeito externo, por conta da maior distância até a parede metálica. Já o decaimento da região sem defeito e defeito interno foram semelhantes, prejudicando a separação.

A Figura 52 (c) mostra o sinal em função do logaritmo natural, nessa forma do sinal também é difícil fazer a classificação das regiões inspecionadas. Também foi selecionado uma região onde deve maior diferença de decaimento, Figura 52 (d). A Tabela 5 mostra os valores de decaimento do sinal, as regiões apresentaram valores semelhantes.

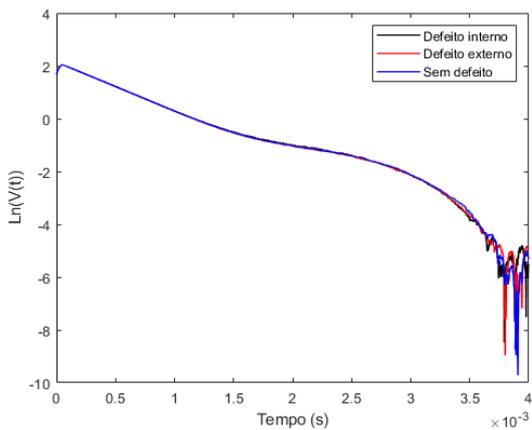
Figura 52 - Sinais capturados com 16 mm de *lift-off*. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



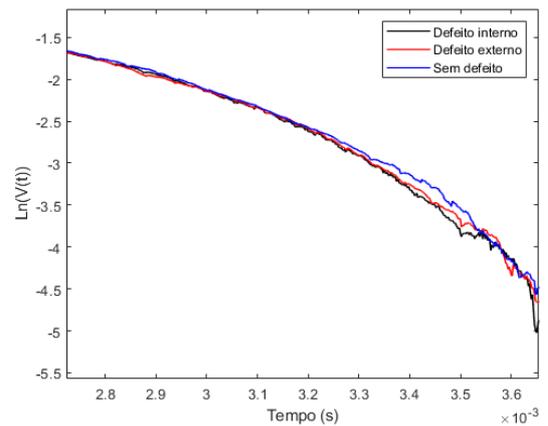
(a)



(b)



(c)



(d)

Um resumo dos coeficientes de decaimento é apresentado nas Tabela 4 e Tabela 5, exponencial e em função do logaritmo natural respectivamente. Nas Figura 53 e Figura 54 é apresentado os dados em forma gráfica.

Tabela 4 - Coeficientes de decaimento dos sinais exponenciais (V/s) $\times 10^{-4}$.

<i>lift-off</i>	Defeito interno	Defeito externo	Sem defeito
16 mm	2,56813	2,57958	2,55588
21 mm	4,77493	4,58655	4,68059
24 mm	3,92847	4,05648	3,95928

Figura 53 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 4.

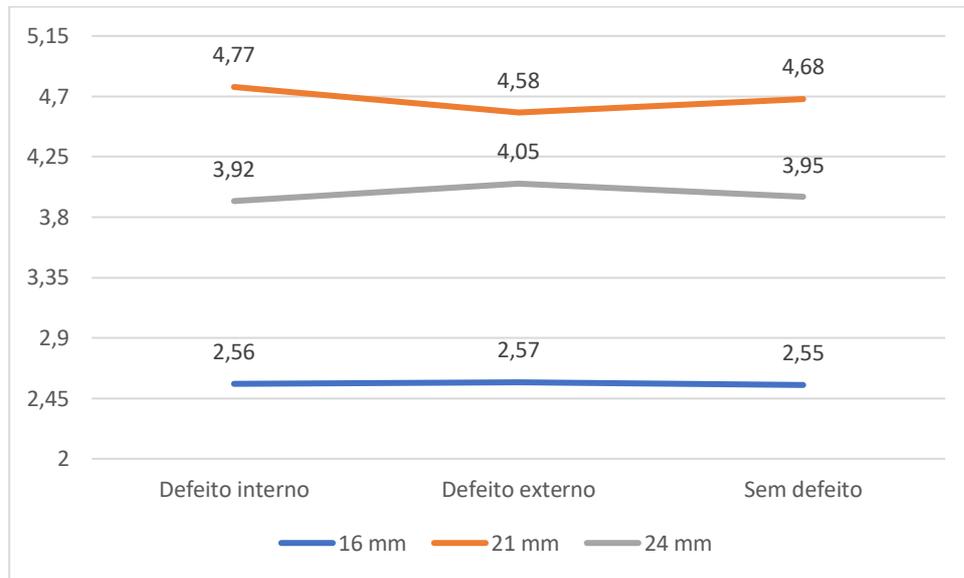
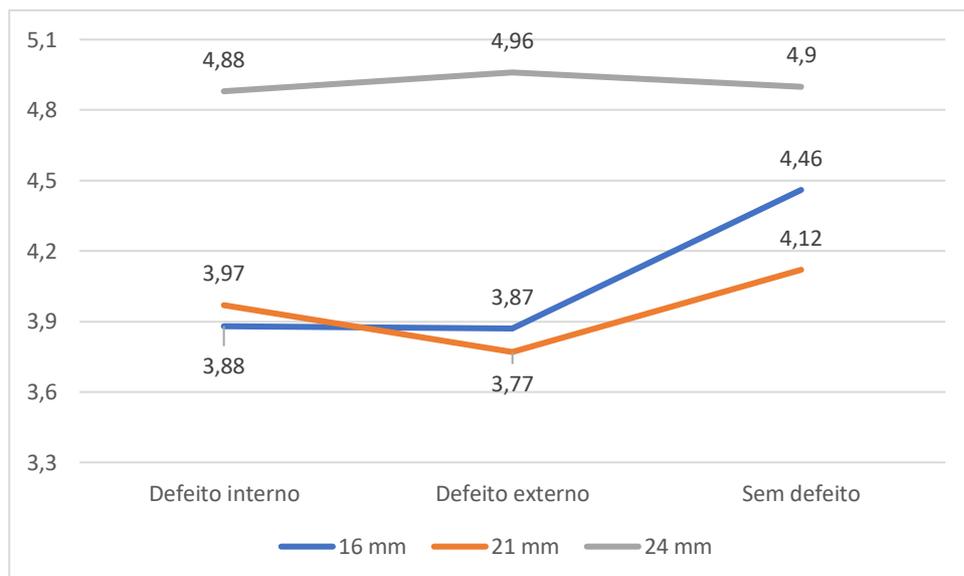


Tabela 5 - Coeficientes de decaimento dos sinais em logaritmo natural $(\ln(V)/s) \times 10^{-4}$.

<i>lift-off</i>	Defeito interno	Defeito externo	Sem defeito
16 mm	3,88160	3,87935	4,46060
21 mm	3,97889	3,77018	4,12554
24 mm	4,88774	4,96187	4,90311

Figura 54 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 5.



Os resultados de espessura disponibilizados na tela do aparelho Lyft são apresentados nas tabelas a seguir. Com 16 mm de *lift-off* (Tabela 6) o Lyft errou 2 % com relação ao valor de espessura do corpo padrão no defeito interno. A detecção do defeito externo, o mais importante para detecção de perda de massa por conta de CUI, não foi medido com exatidão, com erro de 60%. O equipamento apenas indica que tem uma anomalia naquela região, mas não quantifica com exatidão. Com o *lift-off* de 21 mm (Tabela 7) o erro com a medição da espessura do defeito interno aumentou para 7,54 % e do defeito externo para 61,36 %. Para o *lift-off* de 24 mm (Tabela 8) não houve mudança com relação a coleta feita na comparação anterior.

Tabela 6 - Medição de espessura com 16 mm de *lift-off*.

	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7	7	0,00	0,00
Defeito interno	4,9	5,0	0,10	2,00
Defeito externo	1,7	4,2	2,50	60,00

Tabela 7 - Medição de espessura com 21 mm de *lift-off*.

	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7	7	0,00	0,00
Defeito interno	4,9	5,3	0,40	7,54
Defeito externo	1,7	4,4	2,70	61,36

Tabela 8 - Medição de espessura com 24 mm de *lift-off*.

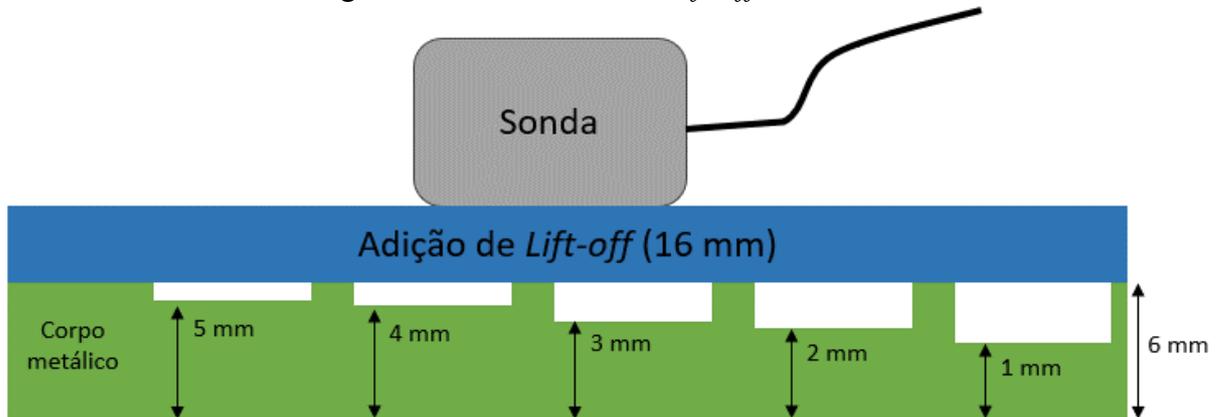
	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7	7,0	0,00	0,00
Defeito interno	4,9	5,3	0,40	7,54
Defeito externo	1,7	4,4	2,70	61,36

4.5.2. Corpo de prova 2

4.5.2.1. Teste usando *lift-off* de 16 mm

O primeiro sinal capturado no CP2 foi com a sonda sobre o *lift-off* de 16 mm, como mostra a Figura 55.

Figura 55 - Sonda sobre a o *lift-off* de 16 mm.

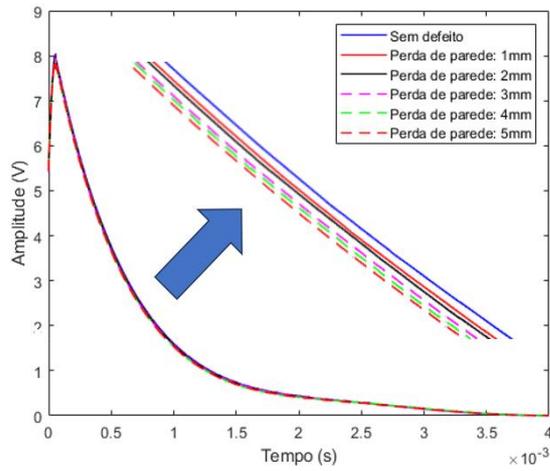


A Figura 56 (a) mostra o sinal somado com o valor mínimo. Com essa escala de tempo não foi possível classificar as regiões por conta da densidade de sinais. O valor do pico apresentou uma ótima separação, decaindo quando aumenta a perda de material, Figura 56 (b).

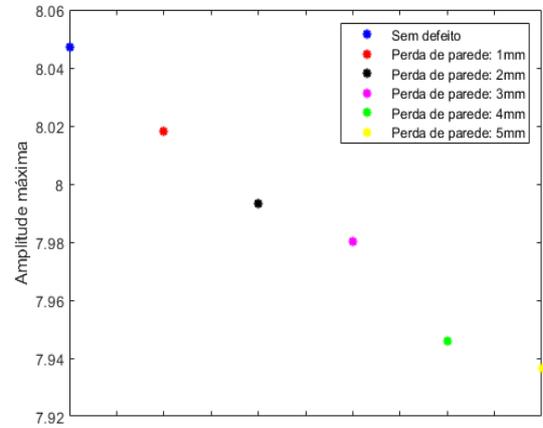
Foi escolhido uma posição no sinal onde o decaimento se apresentou mais acentuado para fazer a classificação, destacado na Figura 56 (a). Nessa escala de tempo é possível classificar os sinais em ordem de amplitude, sendo o sinal mais alto o da região sem defeito e decaindo até o sinal da região com maior perda de espessura. Na Tabela 9 são apresentados os valores de decaimento. O sinal que menos decaiu foi da região sem defeito. Com a redução da espessura o sinal vai aumentando o seu coeficiente de decaimento.

A Figura 56 (c) mostra o sinal em função do logaritmo natural, nessa escala de tempo não foi possível classificar os sinais. Também foi selecionado uma região onde teve maior diferença de decaimento, Figura 56 (d). A Tabela 10 mostra os valores de decaimento do sinal, a região sem defeito apresentou o maior decaimento, contudo não houve uma diferença acentuada entre os sinais de defeitos.

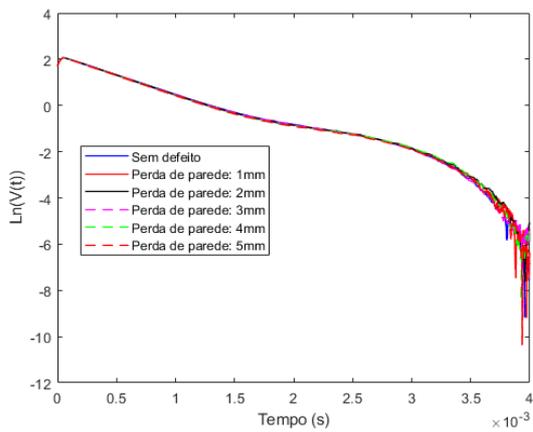
Figura 56 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



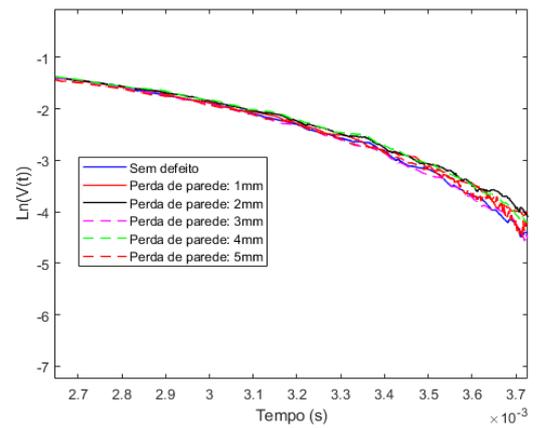
(a)



(b)



(c)



(d)

4.5.2.2. Teste usando *lift-off* de 21 mm

O segundo conjunto de sinais foi coletado com adição de 21 mm de *lift-off*, conforme a Figura 57.

Figura 57 - Sonda sobre a o Lift-off de 21 mm.

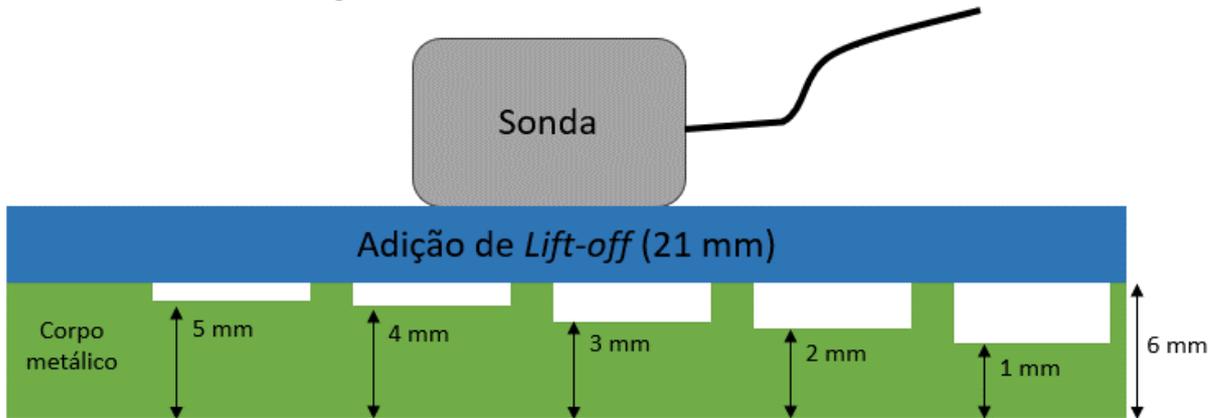
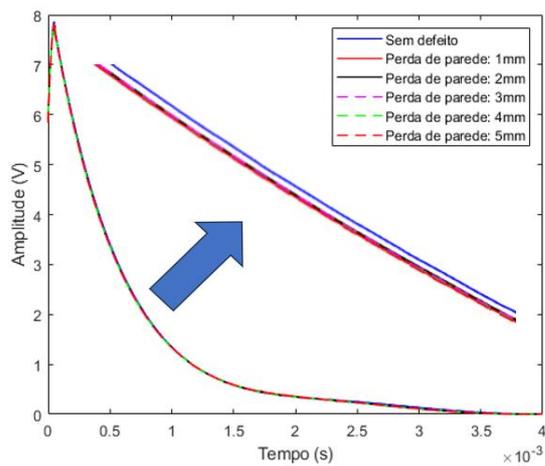
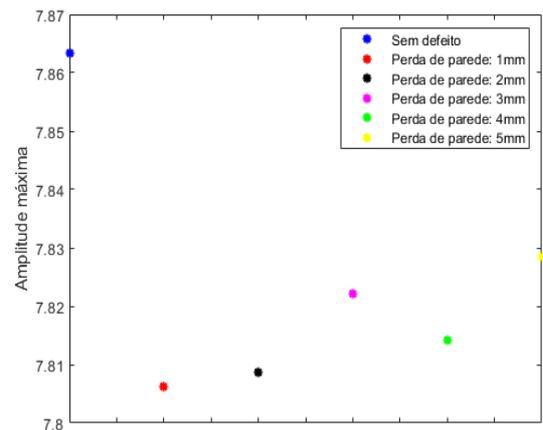


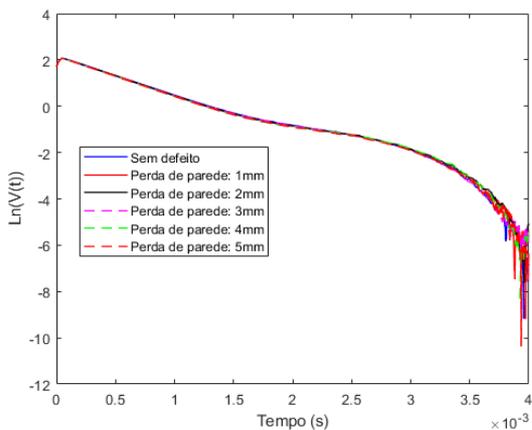
Figura 58 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



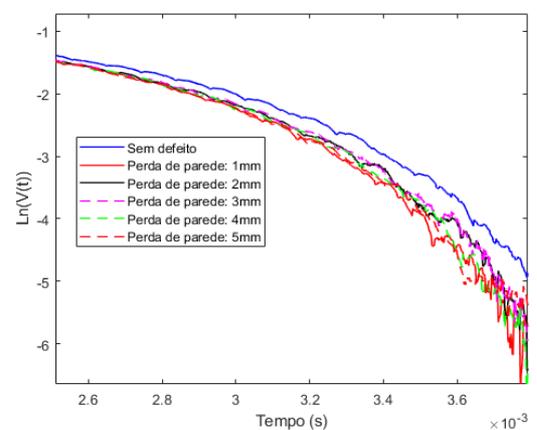
(a)



(b)



(c)



(d)

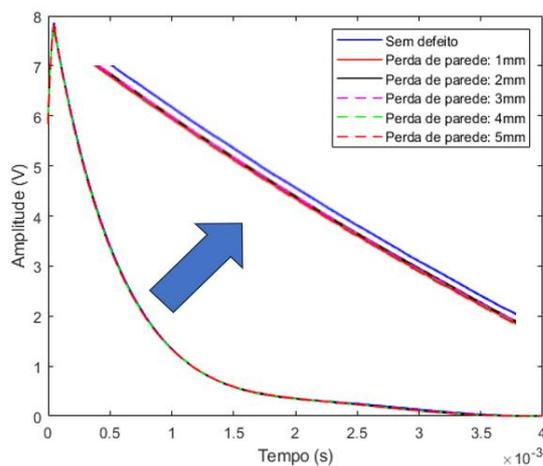
A Figura 58 (a) mostra o sinal somado com o valor mínimo. Nessa escala de tempo também não foi possível fazer a classificação do sinal, por conta de densidade de pontos. Com

esse valor de *lift-off* o valor do pico ajudou a separar a região sem defeito das áreas com defeito, contudo não foi possível separar os defeitos entre si, Figura 58 (b). Essa dificuldade na classificação era de se esperar, visto que o CP2 tem defeitos de área menor e um diâmetro 2.2 vezes menor em relação ao CP1. Com 21 mm de *lift-off* o *footprint* da sonda começa a interagir com regiões fora do defeito, prejudicando o sinal de PEC.

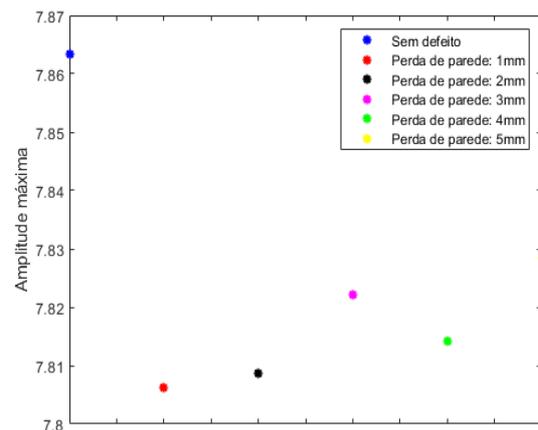
Foi escolhido uma posição no sinal onde o decaimento se apresentou mais acentuado para fazer a classificação, como visto o sinal da região sem defeito apresentou a maior amplitude, destacado na Figura 58 (a). Na Tabela 9 são apresentados os valores de decaimento. O sinal que mais decaiu a região sem defeito, os demais defeitos estão com o decaimento muito próximo.

A Figura 58 (c) mostra o sinal em função do logaritmo natural, nessa forma do sinal não foi possível fazer a classificação dos sinais, por isso também foi selecionado uma região onde teve maior diferença de decaimento e dessa forma foi possível separar a área sem defeito das demais, Figura 58 (d). A Tabela 10 mostra os valores de decaimento do sinal, a região sem defeito apresentou o maior decaimento, contudo não houve uma diferença acentuada entre os sinais de defeitos.

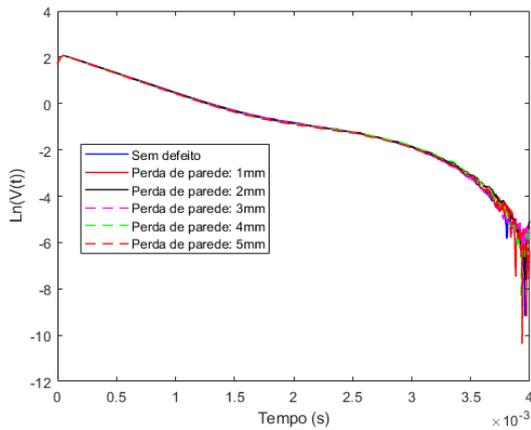
Figura 58 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



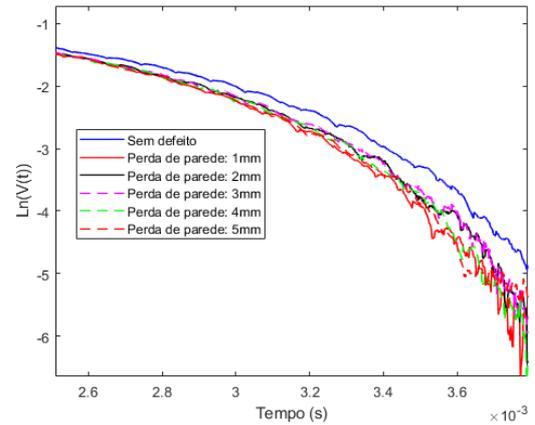
(a)



(b)



(c)

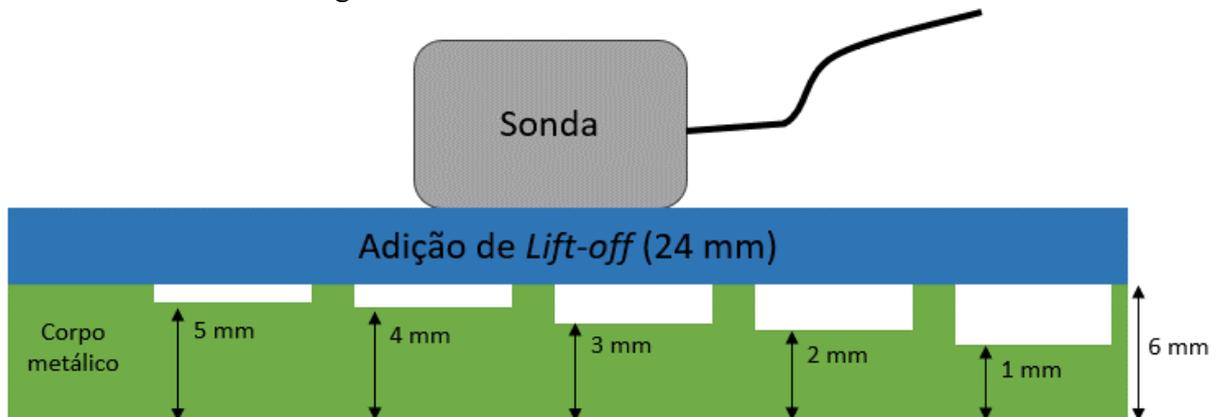


(d)

4.5.2.3. Teste usando *lift-off* de 24 mm

O terceiro conjunto de sinais foi coletado com adição de 24 mm de *lift-off* ao CP2, conforme a Figura 59.

Figura 59 - Sonda sobre a o Lift-off de 24 mm.



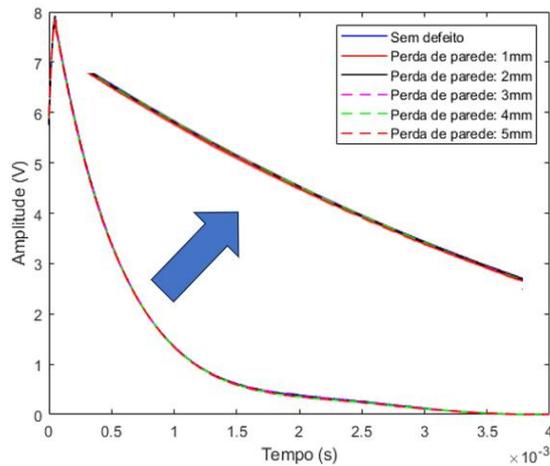
A Figura 60 (a) mostra o sinal somado com o valor mínimo. Nessa escala não foi possível fazer a classificação. Os valores de pico, Figura 60 (b), estão com amplitudes bem próximas, dificultando a classificação. Diferente da medida de *lift-off* anterior, com 24 mm não apresentou um bom resultado, indicando o limite da sonda para esse CP.

Os sinais janelados destacados na Figura 60 (a) não tem separação na amplitude. Analisando o decaimento na Tabela 9 também não foi possível classificar as regiões, os valores estão bem próximos.

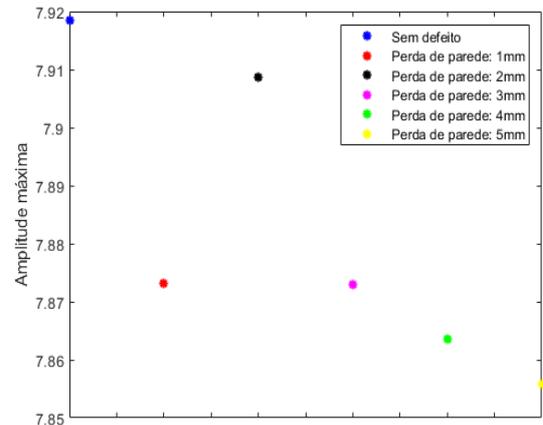
A Figura 60 (c) mostra o sinal em função do logaritmo natural, onde não foi possível observar diferenças no sinal. Também foi selecionado uma região para janelar o sinal, Figura 60 (d), mas a classificação por esse meio não foi eficaz. A Tabela 10 mostra os valores de

decaimento do sinal, a região sem defeito apresentou o menor decaimento, sendo possível separar das demais, contudo não houve uma diferença acentuada entre os sinais de defeitos.

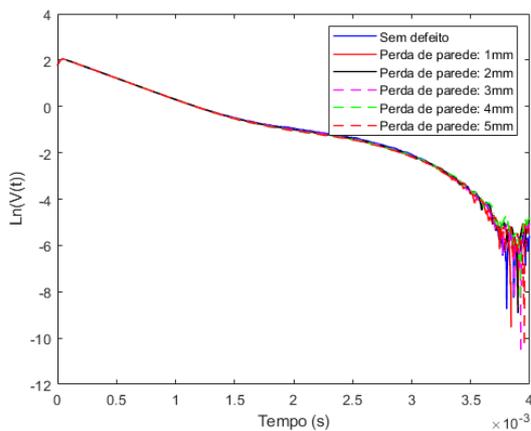
Figura 60 - Sinais capturados com 16 mm de lift-off. (a) Sinal com escala exponencial. (b) Valores de pico. (c) Sinal com escala logarítmica. (d) Sinal com escala logarítmica janelada.



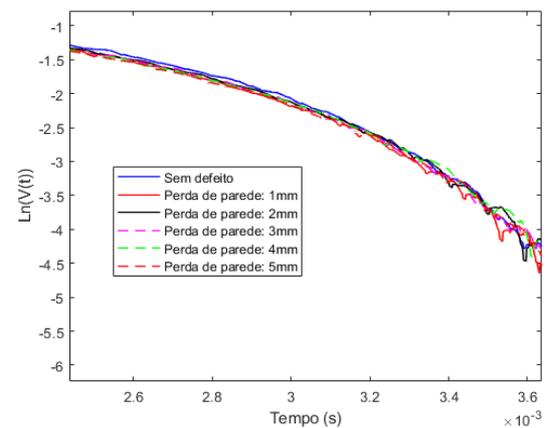
(a)



(b)



(c)



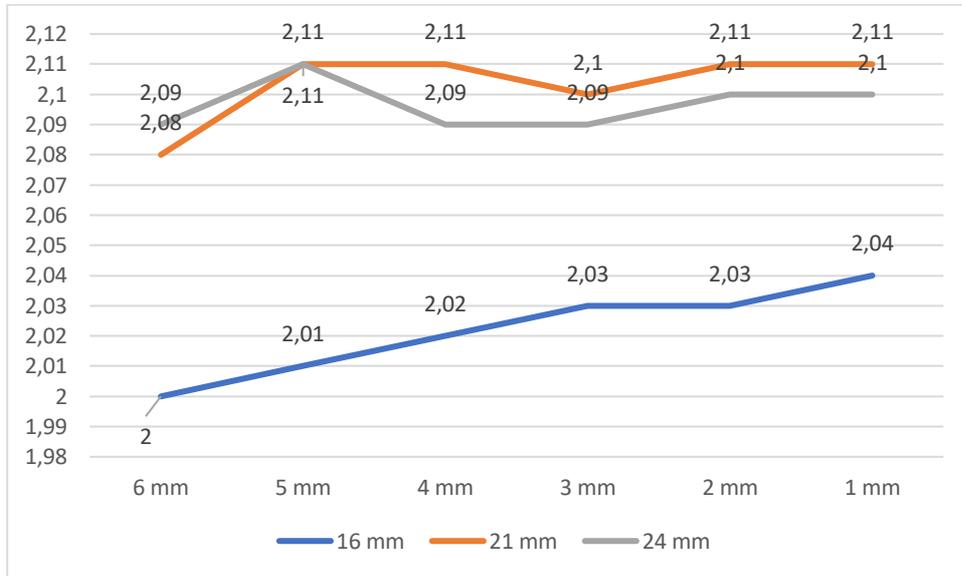
(d)

Um resumo dos coeficientes de decaimento é apresentado nas Tabela 9 e Tabela 10, exponencial e em função do logaritmo natural respectivamente. Nas Figura 61 e Figura 62 é apresentado os dados em forma gráfica.

Tabela 9 - Coeficientes de decaimento dos sinais exponenciais (V/s) $\times 10^{-4}$.

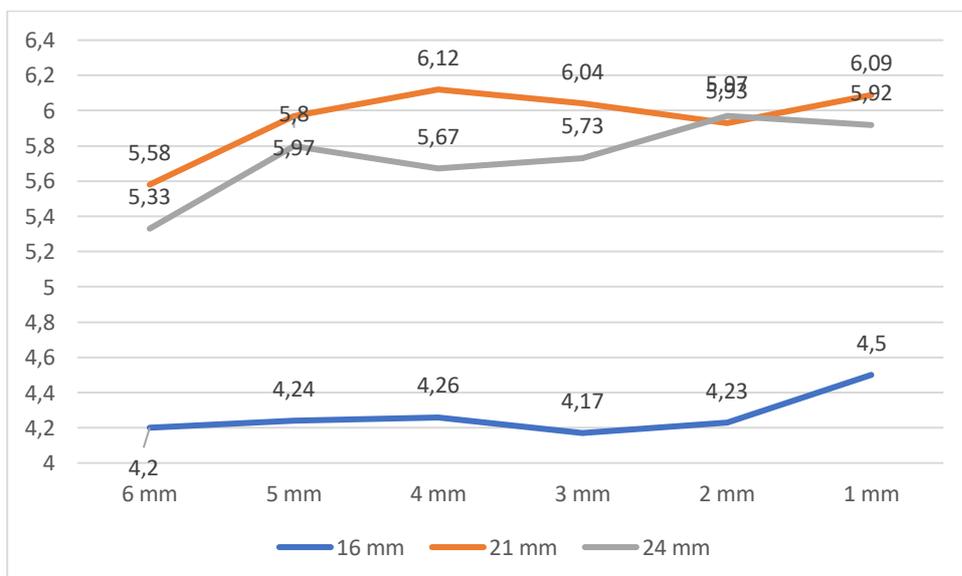
<i>lift-off</i>	Sem defeito	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
16 mm	2,00971	2,01203	2,01820	2,03301	2,02663	2,03613
21 mm	2,08263	2,11018	2,10596	2,10001	2,10660	2,10612
24 mm	2,08790	2,10999	2,08975	2,09340	2,09925	2,09158

Figura 61 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 10 - Coeficientes de decaimento dos sinais em logaritmo natural ($\ln(V)/s$) $\times 10^{-4}$.

<i>lift-off</i>	Sem defeito	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
16 mm	4.19753	4.23651	4.26262	4.17110	4.23011	4.50181
21 mm	5.58086	5.97386	6.11837	6.04153	5.93201	6.09347
24 mm	5.32570	5.80211	5.63633	5.73088	5.97477	5.91950

Figura 62 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 10.



Os resultados de espessura disponibilizados na tela do aparelho Lyft são apresentados nas tabelas a seguir. Com 16 mm de *lift-off* (Tabela 11) o Lyft apresentou o erro 76,19 % com relação ao valor de espessura de 1 mm do corpo padrão. O valor do erro cresceu com a perda

de espessura. Esse erro já é de se esperar quando o valor de espessura for menor que 3 mm, pois a sonda selecionada tem a limitação de medir de 3 até 19 mm de espessura, mas não deveria ocorrer com as espessuras de 5 e 4 mm. Com o *lift-off* de 21 mm (Tabela 12) o equipamento apresentou erro na medição da espessura, o que se repetiu também com *lift-off* de 24 mm (Tabela 13).

Tabela 11 - Medição de espesura com 16 mm de *lift-off*.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
6	6,0	0,0	0,0
5	5,7	0,7	12,28
4	5,6	1,6	28,57
3	5,2	2,2	42,31
2	5,7	3,7	64,91
1	4,2	3,2	76,19

Tabela 12 - Medição de espesura com 21 mm de *lift-off*.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
6	6	0,0	0,0
5	5,6	0,6	10,71
4	5,7	2,7	29,82
3	5,2	2,2	42,31
2	5,0	3,0	60,00
1	4,6	3,6	78,26

Tabela 13 - Medição de espesura com 24 mm de *lift-off*.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pelo equipamento	Erro (mm)	Erro (%)
6	6,0	0,0	0,0
5	5,7	0,7	12,28
4	5,7	1,7	29,28
3	5,3	2,3	43,40
2	5,2	3,2	61,54
1	5,0	4,0	80,00

4.5.3. Análise de erro

Com esses valores de decaimento foi possível calcular uma equação polinomial de primeiro grau, utilizando o *curving fitting* do Matlab®. A intenção é criar uma curva de calibração, baseada no corpo padrão, para ser usada na hora do ensaio. O *lift-off* de 16 mm apresentou os melhores resultados de separação, por conta disso só foram ajustadas curvas para

esse valor de *lift-off*. Foram feitos ajustes para o valor de pico, coeficiente de decaimento exponencial e em função do logaritmo natural ($\ln(V)$) para os dois corpos de prova. Também é apresentado os valores de espessura captados com o equipamento Lyft.

4.5.3.1. Corpo de prova 1

4.5.3.1.1. Erro usando o valor de pico

Para o valor de pico, o ajuste obteve a seguinte equação:

$$E(\beta) = 118,5 \times 10^6 x \beta - 918,3 \quad (11)$$

Onde,

- β é o valor do decaimento da curva.
- E é o valor da espessura.

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 1,159
- Coeficiente de determinação (R^2): 0,9158
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 1,076

Na Tabela 14 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 11, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 44,7% e um valor mínimo de 6,0%.

Tabela 14 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 11.

	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 11	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7,0	7,42	0,42	-6,00
Defeito interno	4,9	4,24	0,66	13,47
Defeito externo	1,7	2,46	0,76	-44,70

4.5.3.1.2. Erro usando o coeficiente de decaimento exponencial

Para o coeficiente de decaimento exponencial o ajuste obteve a seguinte equação:

$$E(\beta) = -2,188 \times 10^6 x \beta + 566,2 \quad (12)$$

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 0,3152
- Coeficiente de determinação (R^2): 0,9771
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 0,5615

Na Tabela 15 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 12, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 16,17% e um valor mínimo de 4,7%.

Tabela 15 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 12.

	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 12	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7,0	6,97	0,03	0,40
Defeito interno	4,9	4,29	0,61	12,45
Defeito externo	1,7	1,79	0,09	-4,7

4.5.3.1.3. Erro usando o coeficiente de decaimento do $\ln(V)$

A curva ajustada para os valores de *lift-off* de 16 mm é a seguinte:

$$E(\beta) = -7,23 \times 10^6 x \beta + 33,95 \quad (13)$$

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 2,034
- Coeficiente de determinação (R^2): 0,8522
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 1,426

Na Tabela 16 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 13, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 20,41 % e um valor mínimo de 0,59 %. Como já apresentado nas figuras anteriores, o conjunto de sinais em função do logaritmo natural com 16 mm de *lift-off* não conseguiu separar os sinais em regiões com defeito, o que elevou o erro na tabela abaixo.

Tabela 16 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 13.

	Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 13	Erro (mm)	Erro (%)
Sem defeito	7,0	5,88	1,12	19,04
Defeito interno	4,9	5,90	1,00	-20,41
Defeito externo	1,7	1,69	0,01	0,59

4.5.3.2. Corpo de prova 2

4.5.3.2.1. Erro usando o valor de pico

Para o valor de pico, o ajuste obteve a seguinte equação:

$$E(\beta) = 43,86x10^6x\beta - 346,8 \quad (14)$$

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 0,3051
- Coeficiente de determinação (R^2): 0,9826
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 0,2762

Na Tabela 17 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 14, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 30 % e um valor mínimo de 2,4 %.

Tabela 17 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 14.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 14	Erro (mm)	Erro (%)
6	6,16	0,16	-2,6
5	4,88	0,12	2,4
4	3,79	0,21	5,3
3	3,21	0,21	-7,0
2	1,70	0,30	15,0
1	1,30	0,30	-30,0

4.5.3.2.2. Erro usando o coeficiente de decaimento exponencial

$$E(\beta) = -1,576x10^6x\beta + 322,3 \quad (15)$$

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 2,469

- Coeficiente de determinação (R^2): 0,8537
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 0,7856

Na Tabela 18 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 15, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 45 % e um valor mínimo de 5,75 %.

Tabela 18 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 15.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 15	Erro (mm)	Erro (%)
6	5,57	0,43	7,17
5	5,20	0,20	-10,4
4	4,23	0,23	-5,75
3	1,90	1,10	36,67
2	2,9	0,90	-45
1	1,41	0,41	-41

4.5.3.2.3. Erro usando o coeficiente de decaimento do $\ln(V)$

A curva ajustada para os valores de *lift-off* de 16 mm é a seguinte:

$$E(\beta) = -9,869 \times 10^6 x \beta + 45,61 \quad (16)$$

O erro do ajuste foi medido pelos seguintes parâmetros:

- Soma dos quadrados dos resíduos (SSE): 10,54
- Coeficiente de determinação (R^2): 0,3978
- Erro Quadrático Médio (RMSE): 1,623

Na Tabela 19 foi calculado o valor da espessura utilizando a Equação 16, onde o erro da espessura medida e da espessura real apresentou um valor máximo de 93% e um valor mínimo de 18%. Com o sinal em função do logaritmo natural em 16 mm de *lift-off* os sinais se confundiram bastante, o que prejudicou a classificação.

Tabela 19 - Valores de espessura encontrados usando a Equação 16.

Espessura do corpo padrão (mm)	Espessura medida pela Equação 16	Erro (%)
6	4,19	30,17
5	3,80	24
4	3,54	11,5
3	4,45	-48,33
2	3,86	-93
1	1,18	-18

5. CONCLUSÃO

O protótipo foi montado integrando um Raspberry pi, uma placa conversora de analógico para digital, uma placa de excitação que foi projetada e confeccionada para a sonda do equipamento, uma sonda bobina-bobina, periféricos para a interface com o usuário que foi desenvolvida em Python 3 e toda a estrutura do equipamento foi impressa em impressora 3D. A integração das partes com o software se mostrou satisfatória. Com o equipamento montado foram realizados testes em dois corpos de prova com o *lift-off* de 16, 21 e 24 mm.

Com os testes realizados, a sonda desenvolvida apresentou o melhor resultado com 16 mm de *lift-off* e a melhor forma de discriminação dos defeitos foi utilizando o decaimento do sinal exponencial. Para determinar a espessura utilizando uma equação polinomial de primeiro grau, os menores erros encontrados para o corpo de prova 1 foi utilizando os coeficientes de decaimento extraídos do sinal em função do logaritmo natural, com erro relativo máximo de 20,41 %. Já para o corpo de prova 2 a melhor curva de ajuste foi utilizando os valores de pico, com erro máximo de 30 %.

Os testes realizados com o equipamento da Lyft mostraram que o sistema da Eddyfi é capaz de determinar áreas com a presença de descontinuidades, porém não foi possível determinar a espessura correta do defeito externo do CP1 e em todos os defeitos do CP2, isso ocorreu por conta da limitação da sonda do equipamento não conseguir medir espessura abaixo de 3 mm. O equipamento indica que a área inspecionada tem alguma divergência em comparação com a região sem defeito, tornando o ensaio qualitativo e não quantitativo.

O protótipo se mostrou versátil e adaptável a diferentes condições e geometrias de amostras. Essa característica sugere que ele pode ser aplicado em uma variedade de contextos industriais, abrindo caminho para sua utilização em diversas aplicações de inspeção e manutenção preventiva. Os resultados obtidos também apontam para o potencial do protótipo em economizar recursos, evitando falhas inesperadas em equipamentos industriais. A detecção eficaz de defeitos contribui para a segurança operacional, reduzindo o risco de acidentes e interrupções indesejadas nas operações industriais, ao mesmo tempo em que minimiza os custos associados a reparos e substituições de equipamentos.

O desenvolvimento de um equipamento permite entender como a técnica funciona e possibilita a integração do PEC em sistema de pesquisa e desenvolvimento de soluções diferenciadas, pois é possível moldar a sonda para inspecionar geometrias com características singulares e ter acesso ao sinal para pós processamento. A importância de ter um sistema aberto proporciona vantagens sobre equipamentos comerciais com programas proprietários que

limitam a aquisição de dados, não são claros sobre como os sinais são processados e limitam o seu uso a sondas do fabricante.

É importante ressaltar que este trabalho representa um passo inicial no desenvolvimento de equipamentos Pulsed Eddy Current, e há espaço para melhorias e otimizações adicionais. O aprimoramento contínuo do protótipo, como no desenvolvimento de novas sondas. Para trabalhos futuros é possível separar os seguintes temas:

- Simulação por elementos finitos do efeito das correntes parasitas nos corpos de prova.
- Desenvolvimento de novas sondas, com diversos formatos e tipos de sensores.
- Estudo do efeito de mudanças da microestrutura do material usando corrente parasitas pulsadas.
- Desenvolvimento de uma sonda tubular para inspecionar tubos de trocador de calor.
- Estudo de tensões residuais em aços utilizando correntes parasitas pulsadas.
- Integração de algoritmos de aprendizado de máquina ao equipamento.

6. REFERÊNCIAS

- Abidin, I. Z., Mandache, C., Tian, G. Y., & Li, Y. (2009). Defect depth estimation using pulsed eddy current with varied pulse width excitation. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51(2), 69–72. <https://doi.org/10.1784/INSI.2009.51.2.69>
- Alamin, M., Tian, G. Y., Andrews, A., & Jackson, P. (2012). Principal component analysis of pulsed eddy current response from corrosion in mild steel. *IEEE Sensors Journal*, 12(8), 2548–2553. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2195308>
- Arjun, V., Sasi, B., Rao, B. P. C., Mukhopadhyay, C. K., & Jayakumar, T. (2015). Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates. *Sensors and Actuators A: Physical*, 226, 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.018>
- Cadeau, T. J., & Krause, T. W. (2009). PULSED EDDY CURRENT PROBE DESIGN BASED ON TRANSIENT CIRCUIT ANALYSIS. *AIP Conference Proceedings*, 1096(1), 327–334. <https://doi.org/10.1063/1.3114222>
- Cantú, R. D. M. (2014). *Desenvolvimento de um dispositivo de realização de ensaios não destrutivos em metais por correntes de Foucault* [Univates]. <http://hdl.handle.net/10737/401>
- Cao, Q., Oluwoye, I., Pojtanabuntoeng, T., Farhat, H., & Iannuzzi, M. (2023). Evaluation of epoxy-based coating degradation under thermal insulation at elevated temperatures on different steel substrates. *Progress in Organic Coatings*, 180, 107544. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107544>
- Chen, H. ;, Xu, Z. ;, Zhou, Z. ;, Jin, J. ;, Hu, Z., Chen, H., Xu, Z., Zhou, Z., Jin, J., & Hu, Z. (2023). Study on the Effect of Metal Mesh on Pulsed Eddy-Current Testing of Corrosion under Insulation Using an Early-Phase Signal Feature. *Materials 2023*, Vol. 16, Page 1451, 16(4), 1451. <https://doi.org/10.3390/MA16041451>
- Chen, X., & Lei, Y. (2015). Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. *NDT & E International*, 75, 33–38. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2015.06.005>
- Chen, X., Li, J., & Wang, Z. (2020). Inversion Method in Pulsed Eddy Current Testing for Wall Thickness of Ferromagnetic Pipes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(12), 9766–9773. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3005114>
- Chen, X., & Niu, H. (2022). Pulsed eddy current testing for gap measurement of metal casing. *Measurement Science and Technology*, 33(7), 075108. <https://doi.org/10.1088/1361->

6501/AC6486

- Cheng, W. (2012). Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(3), 215–224. <https://doi.org/10.1007/s10921-012-0137-9>
- Computing, M. M. (2019). *USB-204 User's Guide*. <https://files.digilent.com/manuals%2FUSB-204.pdf>
- Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Srikanth, D., Surendran, H., & Nickolas, M. M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3732–3737. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.578>
- El Masri, Y., & Rakha, T. (2020). A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections. *Construction and Building Materials*, 265, 120542. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120542>
- Gómez de León Hijes, F. C., Sánchez Robles, J., Martínez García, F. M., Alarcón García, M., & Belén Rivera, E. (2020). Assessment of functional condition of equipment in industrial plants based on multiple measurements. *Measurement*, 164, 108014. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.108014>
- Hachi, D., Benhadda, N., Zaoui, A., Abdelhadi, B., Lefkaier, I. K., & Helifa, B. (2023). Numerical investigation to study the influence of thickness and electrical conductivity of metal-sheets on the LOI-Point of a PEC sensor. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 0(0), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2232930>
- He, Y., Luo, F., Pan, M., Hu, X., Gao, J., & Liu, B. (2010). Defect classification based on rectangular pulsed eddy current sensor in different directions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 157(1), 26–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.11.012>
- He, Y., Pan, M., Luo, F., & Tian, G. (2011). Reduction of Lift-Off Effects in Pulsed Eddy Current for Defect Classification. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(12), 4753–4760. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2160726>
- Hosseini, S., & Lakis, A. A. (2012). Application of time–frequency analysis for automatic hidden corrosion detection in a multilayer aluminum structure using pulsed eddy current. *NDT & E International*, 47, 70–79. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2011.12.001>
- Huang, C., & Wu, X. (2014). Probe lift-off compensation method for pulsed eddy current thickness measurement. *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, 937–939. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2014.6992656>
- Huang, C., Wu, X., Xu, Z., & Kang, Y. (2011). Ferromagnetic material pulsed eddy current

- testing signal modeling by equivalent multiple-coil-coupling approach. *NDT & E International*, 44(2), 163–168. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2010.11.001>
- Jia, J., Cheng, J., Zhang, Y., Zhang, S., & Li, X. (2019). Study on rust detection of rc structure based on electromagnetic pulsed eddy current. *International Journal of Robotics and Automation*, 34(1), 95 – 103. <https://doi.org/10.2316/J.2019.206-5582>
- Kishore, M. B., Park, D. G., Angani, C. S., & Lee, D. H. (2018). Characterization of pulsed eddy current signals to discriminate cladding change over wall thinning of ferromagnetic pipes. *Materials Today: Proceedings*, 5(12), 25843–25849. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.06.577>
- Lemonaki, D. (2021). *What is CPU? Meaning, Definition, and What CPU Stands For*. <https://www.freecodecamp.org/news/what-is-cpu-meaning-definition-and-what-cpu-stands-for/>
- Li, J., Wu, X., Zhang, Q., & Sun, P. (2015a). Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing. *NDT & E International*, 75, 57–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.008>
- Li, J., Wu, X., Zhang, Q., & Sun, P. (2015b). Pulsed eddy current testing of ferromagnetic specimen based on variable pulse width excitation. *NDT & E International*, 69, 28–34. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2014.09.004>
- Li, Y., Tian, G. Y., & Simm, A. (2008). Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation. *NDT & E International*, 41(6), 477–483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.02.001>
- Lin, C. Y., Huang, R. Y., Teng, M., & Wu, Y. C. (2023). Pulsed Eddy Current Sensor for Cascade Electrical Conductivity and Thickness Estimation in Nonferrous Metal Plates. *IEEE Sensors Journal*, 23(8), 8323–8334. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3257316>
- Liu, Y., Liu, S., Liu, H., Mandache, C., & Liu, Z. (2018). Pulsed Eddy Current Data Analysis for the Characterization of the Second-Layer Discontinuities. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0545-6>
- Liu, Z., Sun, L., Guo, Y., Wu, B., & He, C. (2023). A Magnetic Shielding-Type PEC Sensor With a Canister Structure and Magnetic Core. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 6697–6705. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3244557>
- Majidnia, S., Nilavalan, R., & Rudlin, J. (2014). Investigation of an encircling Pulsed Eddy Current probe for corrosion detection. *SENSORS, 2014 IEEE*, 835–838. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985129>
- Mandache, C. (2014). Inductive and solid-state sensing of pulsed eddy current: A comparative

- study. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 45, 265–271. <https://doi.org/10.3233/JAE-141839>
- Mardaninejad, R., & Safizadeh, M. S. (2019). Gas Pipeline Corrosion Mapping Through Coating Using Pulsed Eddy Current Technique. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 55(11), 858–867. <https://doi.org/10.1134/S1061830919110068/METRICS>
- McAllister, W. (2023). *Resposta natural RL*. Khan Academy. <https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rl-natural-response>
- Morozov, M., Yun Tian, G., & Withers, P. J. (2010). The pulsed eddy current response to applied loading of various aluminium alloys. *NDT & E International*, 43(6), 493–500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.05.004>
- NDE, E. (2023). *Maxwell PECT*. <https://ethernde.com/products/pulsed-eddy-current/maxwell-pect>
- Nguyen, L., Ulapane, N., Miro, J. V., Dissanayake, G., & Munoz, F. (2018). Improved signal interpretation for cast iron thickness assessment based on pulsed eddy current sensing. *Proceedings of the 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017, 2018-Febru, 2005 – 2010*. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8283167>
- NVE. (2023). *NVE Spintronic GMR Magnetic Sensors and Isolators*. <https://www.nve.com/>
- Park, D.-G., Kishore, M. B., Kim, J. Y., Jacobs, L. J., & Lee, D. H. (2016). Detection of corrosion and wall thinning in carbon steel pipe covered with insulation using pulsed eddy current. *Journal of Magnetism*, 21(1), 57 – 60. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2016.21.1.057>
- Park, D., Angani, chandra sekhar, Mb, K., Kim, C. G., & Lee, D. H. (2012). The Effects of Lift-Off from Wall Thinning Signal in Pulsed Eddy Current Testing. *Journal of Magnetism*, 17. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2012.17.4.298>
- Pawar, S., Jugade, H., & Mukhopadhyay, G. (2020). Investigation of corrosion of 55AlZn coated roof sheets in Al smelting plant. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104691. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.104691>
- Pereira, V. H. C. (2020). *Estudo do módulo discriminador e sensores de correntes parasitas para um PIG [UFRJ]*. <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/projeto-de-graduacao/2019-4/784--712>
- Pi, R. (2023). *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.com/>
- Piao, G., Guo, J., Hu, T., & Deng, Y. (2019). High-Speed Inspection Method Fusing Pulsed

- Eddy Current and Magnetic Flux Leakage. *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2019.8827114>
- Praphaphankul, N., Akutsu, A., & Sasaki, E. (2023). Numerical study for development of subsurface crack detection using pulsed eddy current and swept frequency eddy current. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2218351>
- Python. (2023). *Welcome to Python.org*. <https://www.python.org/>
- Queiroz, J. C. S., Santos, Y. T. B., da Silva, I. C., & Farias, C. T. T. (2021). Damage Detection in Composite Materials Using Tap Test Technique and Neural Networks. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S10921-021-00759-9/METRICS>
- Rao, K. S. S., Rao, B. P. C., & Thirunavukkarasu, S. (2017). Development of Pulsed Eddy Current Instrument and Probe for Detection of Sub-Surface Flaws in Thick Materials. *IETE Technical Review*, 34(5), 572–578. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1216335>
- Raspbian. (2023). *Raspbian*. <https://www.raspbian.org>
- Santos, Y. T. B., Coelho, R. E., da Silva, I. C., & Farias, C. T. T. (2020). Method to Determine the Thickness of the Carburized Layer of Pyrolysis Furnace Tubes Using Ultrasound Technique. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/S10921-019-0646-X/METRICS>
- Sha, J., Fan, M., Cao, B., & Liu, B. (2021). Noncontact and nondestructive evaluation of heat-treated bearing rings using pulsed eddy current testing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 521, 167516. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2020.167516>
- Shin, Y.-K., Choi, D.-M., Kim, Y.-J., & Lee, S.-S. (2009). Signal characteristics of differential-pulsed eddy current sensors in the evaluation of plate thickness. *NDT & E International*, 42(3), 215–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.09.006>
- Slobodnk, K. (2017). Detection and evaluation of subsurface defects using pulse eddy current differential probe. *2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093049>
- Smith, G. M. (2022). *Data Acquisition (DAQ) - The Ultimate Guide | Dewesoft*. <https://dewesoft.com/blog/what-is-data-acquisition>
- Song, Y., Wu, X., & Wang, J. (2023). Optimization of Excitation Coil in Pulsed Eddy Current Testing of a Pipe Based on the Incident Field. *IEEE Sensors Journal*, 23(3), 2031–2039. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3228903>

- Sophian, A., Tian, G., & Fan, M. (2017). Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 30(3), 500–514. <https://doi.org/10.1007/S10033-017-0122-4/FIGURES/9>
- Sun, F., Fan, M., Cao, B., Ye, B., Lu, G., Li, W., & Tian, G. (2023). Cross-Correlation Inspired Residual Network for Pulsed Eddy Current Imaging and Detecting of Subsurface Defects. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(12), 12860–12871. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3239862>
- Technologies, E. (2023). *Lyft® pulsed eddy current array w/ dynamic scanning*. <https://store.eddyfi.com/lyfr-pulsed-eddy-current-array-w-dynamic-scanning.html>
- Tian, G. Y., He, Y., Adewale, I., & Simm, A. (2013). Research on spectral response of pulsed eddy current and NDE applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 313–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.011>
- Tian, G. Y., & Sophian, A. (2005a). Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. *NDT & E International*, 38(1), 77–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.001>
- Tian, G. Y., & Sophian, A. (2005b). Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT. *NDT & E International*, 38(4), 319–324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.09.007>
- Tian, G. Y., Sophian, A., Taylor, D., & Rudlin, J. (2005). Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment. *IEEE Sensors Journal*, 5(1), 90–96. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2004.839129>
- Ulapane, N., Alempijevic, A., Valls Miro, J., & Vidal-Calleja, T. (2018). Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using Pulsed Eddy Current sensor detector coil voltage decay rate. *NDT & E International*, 100, 108–114. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2018.08.003>
- Ulapane, N., Alempijevic, A., Vidal Calleja, T., & Miro, J. V. (2017). Pulsed eddy current sensing for critical pipe condition assessment. *Sensors (Switzerland)*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/s17102208>
- Ulapane, N., Nguyen, L., Miro, J. V., Alempijevic, A., & DIssanayake, G. (2018). Designing a pulsed eddy current sensing set-up for cast iron thickness assessment. *Proceedings of the 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017, 2018-Febru*, 901 – 906. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8282967>
- Ulapane, N., Thiyagarajan, K., Hunt, D., & Miro, J. V. (2019). Quantifying the relative thickness of conductive ferromagnetic materials using detector coil-based pulsed eddy

- current sensors. *Journal of Visualized Experiments*, 2020(155).
<https://doi.org/10.3791/59618>
- Ulapane, N., Wickramanayake, S., & Kodagoda, S. (2019). Pulsed Eddy Current Sensing for Condition Assessment of Reinforced Concrete. *Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2019*, 1 – 6.
<https://doi.org/10.1109/ICIEA.2019.8834200>
- Wang, Z., fei, Y., Ye, P., Qiu, F., Tian, G., & Woo, W. L. (2020). Crack characterization in ferromagnetic steels by pulsed eddy current technique based on GA-BP neural network model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 500, 166412.
<https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2020.166412>
- Wen, D., Fan, M., Cao, B., Ye, B., & Tian, G. (2018). Lift-Off Point of Intersection in Spectral Pulsed Eddy Current Signals for Thickness Measurement. *IEEE Sensors Letters*, 2(2), 1–4. <https://doi.org/10.1109/LESENS.2018.2822296>
- Xie, F., Wu, X., Zhang, H., & Zhang, X. (2021). Research on pulsed eddy current automatic detection technology for weld defects of pressure vessel cylinder. *Measurement*, 176, 109081. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109081>
- Xie, S., Zhang, L., Zhao, Y., Wang, X., Kong, Y., Ma, Q., Chen, Z., Uchimoto, T., & Takagi, T. (2020). Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects. *NDT & E International*, 111, 102211. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2019.102211>
- XPT. (2023). *XPT2046 Datasheet*. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1649104/ETC2/XPT2046.html>
- Xu, N., Ding, N., Zāiri, F., Liu, L., Hou, N., Wu, X., Chen, L., & Wu, C. M. L. (2020). Fracture failure for the teeth of sprocket wheels in mineral conveying equipment. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104957. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.104957>
- Xu, Z., Wu, X., Li, J., & Kang, Y. (2012). Assessment of wall thinning in insulated ferromagnetic pipes using the time-to-peak of differential pulsed eddy-current testing signals. *NDT & E International*, 51, 24–29.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.07.004>
- Xu, Z., Zhou, Z., Chen, H., Qu, Z., & Liu, J. (2023). Effects of the wire mesh on pulsed eddy current detection of corrosion under insulation. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 38(2), 233–253. <https://doi.org/10.1080/10589759.2022.2102167>
- Yan, S., & Chen, X. (2023). Time-domain analytical solutions to pulsed eddy current model of moving cylindrical conductor. *NDT & E International*, 137, 102863.

<https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2023.102863>

- Yang, Bin Feng; Luo, Fei Lu; Han, D. (2006). Pulsed eddy current technique used for non-destructive inspection of ageing aircraft. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 48(7).
- Yang, P., Fan, M., Cao, B., & Gao, S. (2020). Investigation on Time-to-Peak Feature Insensitive to Liftoff Effect for Pulsed Eddy Current Evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(7), 5064–5071. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2954011>
- Yu, Y., Gao, K., Liu, B., & Li, L. (2020). Semi-analytical method for characterization slit defects in conducting metal by Eddy current nondestructive technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, 301, 111739. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2019.111739>
- Yunze He Bin Gao, A. S., & (Auth.), R. Y. (2017). *Transient Electromagnetic-Thermal Nondestructive Testing. Pulsed Eddy Current and Transient Eddy Current Thermography* (1st Editio). Elsevier. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=5fc3c1984e27d372d9405edf4a035eda>
- Zhao, L., Li, C. J., Duan, Z. X., Wang, W., & Wu, X. D. (2019). The metal thickness detection using pulsed eddy-current computation and detection method. *Cluster Computing*, 22(3), 6551–6562. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2335-4>
- Zhou, D., Pan, M., He, Y., & Du, B. (2017). Stress detection and measurement in ferromagnetic metals using pulse electromagnetic method with U-shaped sensor. *Measurement*, 105, 136–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.001>