



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HAWSON VIRGÍLIO HONÓRIO E SILVA FILHO

**SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM PARAFUSOS OLHAIS DE  
ANCORAGEM**

Recife

2023

HAWSON VIRGÍLIO HONÓRIO E SILVA FILHO

**SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM PARAFUSOS OLHAIS DE  
ANCORAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Ph.D. Marcos Tavares de Melo.

Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

**Recife**

**2023**

### Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva Filho, Hawson Virgílio Honório e.

Sistema de detecção de falhas em parafusos olhais de ancoragem / Hawson Virgílio Honório e Silva Filho. - Recife, 2023.

80f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2023.

Orientação: Marcos Tavares de Melo.

Coorientação: Douglas Contente Pimentel Barbosa.

Inclui referências.

1. Olhais de ancoragem; 2. Parâmetros eletromagnéticos; 3. Detecção de falhas; 4. Manutenção preventiva; 5. Algoritmo floresta aleatória; 6. Linhas de transmissão. I. Melo, Marcos Tavares de. II. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

HAWSON VIRGÍLIO HONÓRIO E SILVA FILHO

**SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM PARAFUSOS OLHAIS DE  
ANCORAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 28/07/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcos Tavares de Melo  
(Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva  
Lourenço Novo  
(Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Daniel de Filgueiras Gomes  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Jefferson Costa e Silva  
(Examinador Externo)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Paraíba

---

Dr. Francisco Rodrigues Sabino Junior  
(Examinador Externo)  
Chesf - Companhia Hidroelétrica do São  
Francisco

A minha filha Eva dedico este trabalho, que deu um sentido especial a minha existência, proporcionando-me momentos de alegria e sua chegada foi um incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará  
ao seu tamanho original”, (Albert Einstein).

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me concedido força, sabedoria e perseverança para concluir esta tese. Sua orientação divina foi minha luz nos momentos de dúvida e minha inspiração nos momentos de desafio. Que Sua sabedoria continue a guiar meus passos enquanto sigo em frente.

Quero expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que tornaram possível a conclusão desta tese. A minha amada esposa Nathally, que esteve ao meu lado em cada momento, sendo meu apoio inabalável e minha fonte de inspiração. À minha querida filha Eva, por compreender e alegrar meus dias, mesmo nos momentos em que precisei me dedicar intensamente aos estudos. À minha família, principalmente a minha mãe Marilan e a minha avó Acidália pelo constante incentivo e suporte ao longo desta jornada desafiadora.

Ao meu orientador Marcos Tavares e co-orientador Douglas Barbosa, devo um agradecimento especial por sua orientação sábia e apoio incondicional. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico. E aos meus colegas de laboratório Coutinho, Leonardo, Renan, Cinthia, Crislane, Vinicius e outros que talvez não me lembre no momento pela troca de ideias, colaboração e companheirismo, que enriqueceram esta pesquisa.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado por fazerem parte desta jornada e por tornarem este trabalho possível.

## RESUMO

Os parafusos olhais são componentes responsáveis por conectar as correntes de isoladores a postes e vigas de concreto, suportando a carga do cabeamento elétrico aéreo. Falhas estruturais ocultas nos olhais podem levar ao rompimento dos mesmos e, conseqüentemente, a acidentes graves e interrupção do fornecimento de energia elétrica, expondo os operadores a sanções e multas financeiras. Esta tese apresenta um sistema de detecção de falhas estruturais em parafusos olhais de ancoragem, baseado na análise da magnitude do S11 por meio de um classificador de floresta aleatória treinado por medições e sinais simulados de alta fidelidade. A metodologia proposta é totalmente não invasiva e não requer a desmontagem da infraestrutura elétrica. A alta acurácia dos resultados apresentados, sugere que o método proposto possa melhorar a eficiência da rotina de manutenção preventiva realizada nos parafusos olhais e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia.

Palavras-chave: olhais de ancoragem, parâmetros eletromagnéticos, detecção de falhas, manutenção preventiva, algoritmo floresta aleatória, linhas de transmissão.

## ABSTRACT

Eyebolts are components responsible for connecting insulator chains to poles and concrete beams, supporting the load of overhead electrical wiring. Hidden structural failures in eyebolts can lead to their rupture and, consequently, cause serious accidents and interruptions in the power supply, exposing operators to penalties and financial fines. This thesis presents a system for detecting structural failures in anchoring eyebolts, based on the analysis of the S11 magnitude through a random forest classifier trained with high-fidelity measurements and simulated signals. The proposed methodology is completely non-invasive and does not require dismantling the electrical infrastructure. The high accuracy of the presented results suggests that the proposed method could improve the efficiency of preventive maintenance routines carried out on eyebolts and, consequently, increase the reliability of power distribution systems.

Keywords: Anchoring eye bolts, electromagnetic parameters, fault detection, preventive maintenance, random forest algorithm, transmission lines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações dos olhais. a) Subestação 230 kV; b) Ancoragem de cadeias de isoladores 69 kV _____	17
Figura 2 – Parafusos olhal com porca e arruela _____	18
Figura 3 – Esquema típico de ancoragem em 69kV _____	18
Figura 4. Processo corrosivo em parafusos olhais _____	19
Figura 5 - Trecho infinitesimal de LT formada por dois condutores e dielétrico. _____	26
Figura 6 - Representação da Figura 5 por parâmetros concentrados. _____	26
Figura 7: Linha de transmissão terminada com uma impedância de carga $Z_L$ . _____	29
Figura 8 - Representação de uma rede de duas portas por parâmetros $S$ . _____	31
Figura 9 - Representação esquemática de uma floresta aleatória _____	36
Figura 10 - Linha de transmissão formada pelos parafusos olhais e a barra de referência _____	37
Figura 11 – Representação do funcionamento das múltiplas reflexões no sistema proposto _____	39
Figura 12 - Modelo de simulação do adaptador olhal _____	40
Figura 13 - Adaptador de micro-ondas para parafusos olhais para medição _____	40
Figura 14 - Detalhes do modelo de simulação de olhal para as configurações sem falhas e com falhas. _____	41
Figura 15 – Foto dos parafusos utilizados nas medições: a) Vista lateral b) Vista superior _____	41
Figura 16 – Configuração para medição _____	42
Figura 17 – Configuração para simulação _____	43
Figura 18 - A arquitetura do classificador binário proposto _____	44
Figura 19 - Validação cruzada k-fold _____	46
Figura 20 – Variação do número de pontos para magnitude do $S_{11}$ para os sinais simulados referentes ao parafuso P0 _____	49
Figura 21 – Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ entre os sinais medido e simulado do P0 _____	51
Figura 22 - Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ entre os sinais medido e simulado P0 vs SP _____	51
Figura 23 – Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ entre os parafusos medidos e simulados: (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5; (f) P6 _____	52
Figura 24 - Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ entre os todos parafusos medidos (P0, P1, P2, P3, P4, P5 E P6) _____	53
Figura 25 - Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ entre os todos parafusos simulados (P0, P1, P2, P3, P4, P5 E P6) _____	53
Figura 26 - Comparação de magnitude $\{S_{11}\}$ para os sinais medidos em pares: _____	54
Figura 27 - Comparação da magnitude $\{S_{11}\}$ para os sinais simulados em pares: _____	55
Figura 28 – Número de árvores vs Acurácia _____	56
Figura 29 - Desempenho comparativo do sistema de detecção de falhas proposto _____	58

Figura 30 – Curvas ideias para definição das frequências de projeto _____	61
Figura 31 – Formato canônico de um circuito ressoador _____	63
Figura 32 – Relação para o valor de t _____	63
Figura 33 - Circuito em microfita do tipo ressoador quadrado de malha aberta proposto__	64
Figura 34 – Dimensões finais para o Circuito projetado _____	65
Figura 35 - Resposta em frequência do filtro projetado_____	65
Figura 36 - Sistema proposto com o circuito acoplador na entrada do sistema _____	66
Figura 37 - Magnitudes do S11 do sistema com o filtro _____	67
Figura 38 - Comparação entre as magnitudes do S11 entre o sistema com e sem o filtro acoplador _____	67
Figura 39 - Comparação entre as magnitudes entre as amostras _____	68
Figura 40 – Detalhe da Magnitude de S11 entre a comparação entre nas frequências de interesse _____	68
Figura 41 - Comparação das magnitudes {S11} dos em pares: _____	69

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Dimensões dos parâmetros de falha nos parafusos simulados _____	41
Tabela 2 – Configuração dos parafusos medidos. _____	42
Tabela 3 - Estrutura da base de dados prospota _____	45
Tabela 4 - Correlação entre os sinais medidos e simulados para o olhal B0 _____	50
Tabela 5 - Correlação entre os sinais medidos e simulados para o olhal P0 Mag.{S11} ____	52
Tabela 6 – Relação dos nº de árvores com a acurácia e tempo de processamento _____	57
Tabela 7 – Parâmetros de desempenho para o modelo de classificação _____	58
Tabela 8 - Valores de elemento para filtros de protótipo passa-baixa Chebyshev _____	62
Tabela 9 - Dimensões iniciais de projeto _____	64
Tabela 10 – Valores das magnitudes do S11 e as frequências de ressonância para os parafusos P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6 _____	69

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
TEM	<i>Transverse Electromagnetic</i>
MIC	<i>Microwave Integrated Circuits</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulation</i>
EM	Eletromagnético
IA	Inteligência artificial
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SVM	<i>Support Vector Machines</i>
K-NN	<i>K-Nearest Neighbors</i>

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\epsilon$	Permissividade elétrica
$\epsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica no vácuo
$\lambda_0$	Comprimento de onda referente à frequência $f_0$
$\lambda_g$	Comprimento de onda em um meio onde a constante dielétrica é $\epsilon_{\text{reff}}$
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo
$\omega$	Frequência angular
$c$	Velocidade da luz
$f_0$	Frequência central de projeto
$\Gamma$	Coefficiente de reflexão
$Z_0$	Impedância característica de uma linha de transmissão
$Z_{\text{in}}$	Impedância de entrada de uma linha de transmissão
$S_{ij}$	Parâmetros de espalhamento de uma onda se propagando da porta $j$ para a $i$
$fn$	False negative (Falso negativo)
$fp$	False positive (Falso positivo)
$tn$	True negative (Verdadeiro negativo)
$tp$	True positive (Verdadeiro positivo)
$G$	Condutância por unidade de comprimento
$H$	Campo Magnético
$L$	Indutância por unidade de comprimento
$R$	Resistência por unidade de comprimento
$t$	tempo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CARACTERIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO PROBLEMA.....	16
1.2	MOTIVAÇÃO .....	19
1.3	REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE .....	20
1.4	OBJETIVO .....	23
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
2.1	LINHA DE TRANSMISSÃO .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Modelo de circuito para uma linha de transmissão .....</b>	<b>25</b>
2.2	ANÁLISE DE REDES DE MICRO-ONDAS.....	29
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros de espalhamento em uma rede de micro-ondas .....</b>	<b>30</b>
2.3	SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	32
2.4	Aprendizado de máquina baseado no algoritmo floresta aleatória .....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
3.1	ADAPTADOR DE ALTA FREQUÊNCIA .....	39
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	40
3.3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	42
3.4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E COMENTÁRIOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	FILTRO DO TIPO RESSOADOR.....	59
<b>4.1.1</b>	<b>Projeto .....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	72
5.2	CONTRIBUIÇÕES E PRODUÇÃO CIENTÍFICA .....	73
<b>5.2.1</b>	<b>ARTIGOS RELACIONADOS A ESTE TRABALHO.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.2</b>	<b>COLABORAÇÕES .....</b>	<b>73</b>
	REFERÊNCIAS.....	75

## 1 INTRODUÇÃO

Colunas e vigas de concreto são amplamente utilizadas para suportar cabos elétricos aéreos em classes de tensão abaixo de 69 kV para linhas de transmissão de energia, e de 230 kV para subestações. Nestas aplicações, os cabos de energia elétrica são fixados a isoladores ancorados em postes por meio de parafusos olhais. Com isso, parte dos parafusos olhais fica embutida nessas estruturas de concreto, impossibilitando sua inspeção visual. A corrosão em parafusos olhais, é um problema que põe em risco o sistema elétrico, conseqüentemente expõe as empresas operadoras do sistema a penalidades e sanções financeiras, por parte das agências reguladoras, caso ocorra falta de fornecimento. Por esse motivo, tais empresas devem manter monitoramento constante do estado desses parafusos olhais, como realizado tradicionalmente através do desmonte da ancoragem dos cabos elétricos, possibilitando, assim, a inspeção visual.

Em vista desse problema, esta tese propõe um sistema para detecção de falhas estruturais em parafusos olhais de ancoragem.

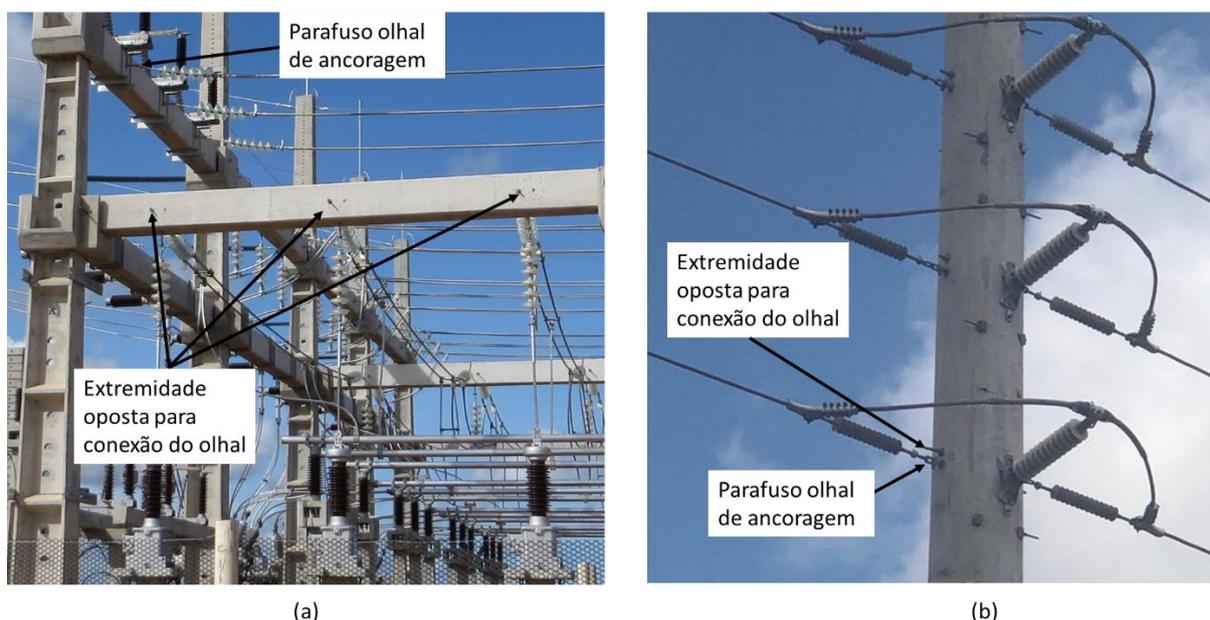
### 1.1 CARACTERIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

Para a rotina de manutenção, as partes visíveis do sistema de ancoragem são relativamente fáceis de inspecionar a olho nu. Contudo, a boa aparência da parte visível da estrutura do olhal não garante a integridade das respectivas partes embutidas nos corpos de concreto, situando-se assim, fora do alcance visual das equipes de manutenção, sendo necessário desmontar completamente a ancoragem para a realização do cumprimento da inspeção visual. Tal processo exige o desligamento temporário da linha de transmissão ou de um determinado barramento de potencial da subestação. No geral essa operação representa uma interrupção operacional, que, além dos custos diretos, acarreta, conjuntamente encargos contratuais de fornecimento. Somando a isso, a falta da inspeção nesses parafusos pode ocasionar acidentes de grandes proporções. Isso justifica a importância de tais empresas assegurarem o monitoramento constante do estado desses parafusos. É

importante frisar que em subestações de 230 kV geralmente encontra-se um bay<sup>1</sup> reserva, destinado a manobras de emergência e manutenção. Assim sendo, por conseguinte, não haveria necessidade de desenergizar.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os problemas decorrentes de paradas não programadas (interrupções acidentais causadas por falta de manutenção) nos sistemas de transmissão e distribuição podem custar aproximadamente de 1 a 2% da receita anual da empresa responsável (ANEEL, 2020). Para essas paradas existe um limite de desligamentos anuais programados que são destinados à manutenção do sistema, que só podem ocorrer em horários programados, variando de acordo com critérios estipulados pelos órgãos reguladores. Em caso de ultrapassagem desse prazo, serão impostas penalidades (ANEEL, 2020). A Figura 1, mostra as aplicações típicas de olhais em ancoragem de cabos aéreos tanto para uma linha de transmissão urbana de 69 kV quanto para uma subestação de 230 kV.

Figura 1 – Aplicações dos olhais. a) Subestação 230 kV; b) Ancoragem de cadeias de isoladores 69 kV



Fonte: Acervo do autor

<sup>1</sup> Bay - Vão tipo composto por equipamento como: disjuntores, chaves seccionadoras e equipamentos de medição e proteção.

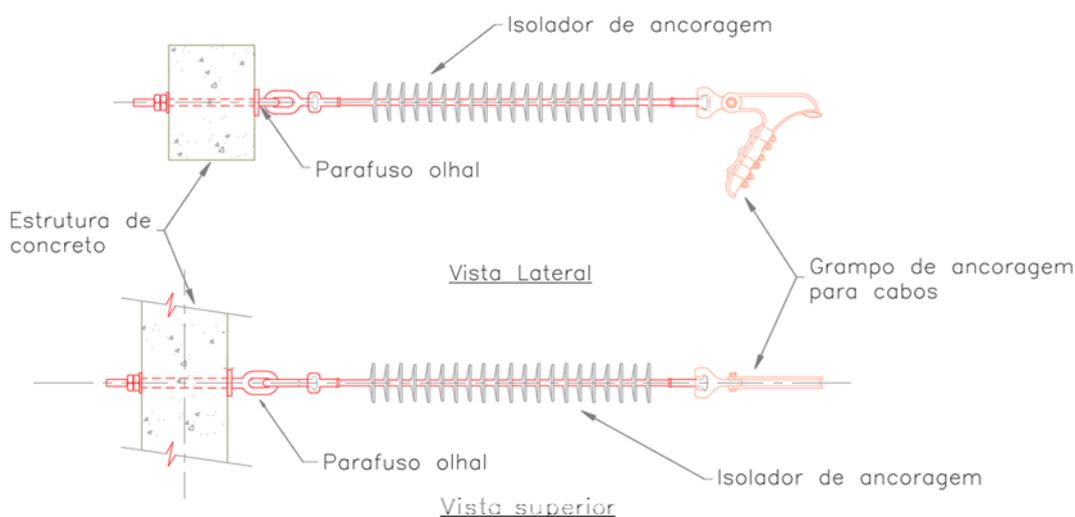
As partes metálicas que compõem esse sistema de ancoragem são produzidas em aço carbono SAE 1045 com revestimento de zinco aplicado pelo processo de galvanização a fogo (NBR-6323, 2016). A Figura 2 mostra um parafuso olhal, uma porca e arruela, de aço galvanizado, usadas no sistema de ancoragem, A Figura 3 apresenta um esquema típico para uma linha de transmissão de 69 kV. A partir desse esquema é possível observar também que a maior parte do parafuso olhal fica embutida na estrutura de concreto.

Figura 2 – Fotografia de parafuso olhal com porca e arruela



Fonte: Acervo do autor

Figura 3 – Esquema típico de ancoragem em 69 kV



Fonte: Acervo do autor

É possível observar na Figura 4 que com o tempo esses parafusos perdem suas características físicas, devido aos efeitos do clima e do atrito com o concreto, por não serem concretados. Por conseguinte, ocorre a deterioração da camada de zinco, que, por sua vez, estimula o processo de corrosão (IBRAHIM, 1999). Tal

processo resulta na degradação do material metálico, debilitando suas propriedades mecânicas, tais como resistência, elasticidade e ductilidade (LAURIA, MINUCCI, *et al.*, 2018).

Figura 4. Fotografia de um processo corrosivo em parafusos olhais



Fonte: Acervo do autor

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Dada a necessidade prática de supervisionar a condição dos parafusos olhais de ancoragem de isoladores elétricos e os problemas associados à inspeção visual tradicional, torna-se imprescindível buscar uma solução alternativa que garanta a estabilidade, bem como reduza os custos dessa operação de manutenção. Nesse contexto, o sistema proposto apresenta a vantagem de permitir medições completas por meio de instrumentos portáteis, conectando o olhal a uma haste de referência através de um conector especialmente desenvolvido para essa finalidade. Isso é viabilizado pela injeção de ondas de alta frequência no parafuso, gerando uma onda estacionária pela sobreposição das ondas incidentes e refletidas. O comportamento dessa onda é influenciado pela localização, tipo de falha e frequência da onda incidente. Além disso, a análise da condição estrutural do olhal pode ser obtida durante a medição, com o auxílio de um sistema de detecção baseado em aprendizado de máquina, concedendo, assim uma avaliação mais precisa dos resultados.

A substancial contribuição deste trabalho é apresentar uma técnica que avalie a condição mecânica dos olhais e dispense, o desmonte do sistema de ancoragem, como é feito tradicionalmente, permitindo a detecção precoce de falhas estruturais nesses elementos com alta precisão. Devido à possibilidade da não desconexão ou interrupção do fornecimento de energia para realizar a avaliação dos olhais, obtém-se uma redução de custos e tempo de manutenção, o que melhora o desempenho dos

procedimentos de operação e manutenção (O&M), aumenta a confiabilidade do sistema de ancoragem, bem como a disponibilidade e segurança do sistema elétrico.

### 1.3 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE

O processo corrosivo é uma das principais causas do desgaste e da redução da vida útil de estruturas metálicas. Desse modo, aplicações de sistemas para detecção e monitoramento de falhas causadas pela corrosão são recorrentes na literatura para diferentes tipos de estruturas metálicas embutidas por haver uma redução de tempo e custo na detecção das falhas.

Para detecção das falhas em estruturas metálicas são utilizados os princípios da técnica de reflectometria de uma onda mecânica aplicada ao material. Isso é possível porque variações na impedância acústica causadas pelas falhas são capazes de refletir parte da energia da onda incidente, concedendo, assim, a detecção.

Em (N. HIRAI, 2014), apresenta uma abordagem que permite estimar com alta precisão a localização de distorções mecânicas em um cabo elétrico, utilizando um método baseado em reflectometria no domínio da frequência e na transformada inversa de Fourier rápida. Por outro lado, (KANOUN, 2015) aplica uma técnica para diagnóstico de falha em fios utilizando na espectroscopia de impedância no domínio da frequência.

Outra metodologia identificada é o uso do domínio do tempo para reflectometria aplicada na localização de falhas em cabos de aço embutidos em concreto (FURS e DIAMOND, 2009) e na utilização de pulsos acústicos aplicados para a detecção de danos por corrosão em hastes de aterramento individuais enterradas sem necessidade de escavação para avaliação visual (DURHAM, ZHAO e THOMSO, 2020).

Foi também encontrada em (HAN, 2022), uma proposta para detecção de corrosão em estruturas metálicas embutidas em concreto armado aplicando sinais de corrente de baixa frequência.

Para a faixa de micro-ondas, é comum o uso reflectometria no domínio da frequência a partir de parâmetros S. Em (SUTTHAWEEKUL e Y., 2018), estágios de corrosão em aço são medidos através de um guia de onda, sensores RFID para monitoramento da corrosão de aço embutido em concreto são propostos por (BOUZAFFOUR, B. LESCOP, *et al.*, 2021) e detecção de falhas em hastes de

ancoragem aplicadas em torres transmissão de energia do tipo estaiadas foi proposta por (NOVO, MELO, *et al.*, 2014).

No entanto, os trabalhos citados não apresentam processamento de dados para obtenção do diagnóstico de forma automática. Assim, a análise das informações deverá ser realizada por um especialista.

Em sistemas de detecção de falhas baseados em reflectometria, devido à alta complexidade dos sinais adquiridos, devido a análise visual dos dados coletados não são simples. Para realizar com precisão esta tarefa, é fundamental aplicar modelos de inteligência artificial (IA). Os algoritmos de aprendizado de máquina e as redes neurais artificiais têm sido amplamente empregados nos sistemas de processamento de dados para analisar e detectar falhas causadas por corrosão em estruturas metálicas.

Sistema baseado em aprendizado de máquina para detecção de falhas em hastes de ancoragem de torres de transmissão de energia estaiadas a partir da análise da magnitude do S11 é proposto por (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2019) e (COUTINHO, BARBOSA, *et al.*, 2021), para a impedância de entrada para detecção do posicionamento da falha é proposto por (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2021). Em (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2019) são utilizados múltiplos parâmetros eletromagnéticos como entrada do sistema com uma análise de redes neurais.

É possível encontrar diferentes técnicas para algoritmos de aprendizado de máquina aplicados na localização e caracterização de falhas em estruturas metálicas. A técnica de PSO-SVM foi utilizada para detectar falhas em hastes de ancoragem de torres estaiadas de linhas de transmissão de energia (ZHENG, ZHANG e SUN, 2017). É apresentado por (SUN, XING, *et al.*, 2016) um classificador de falha em âncora baseada em curtose espectral e algoritmo de agrupamento K-means. Sistemas inteligentes são usados para detecção de corrosão em sistemas de aterramento (CHONG, MINFANG, *et al.*, 2020). Redes neurais artificiais são aplicadas para detecção de corrosão em tubulações industriais (FAHAD, KAMAL, *et al.*, 2017). Algoritmos baseados em *deep learning* para detecção de corrosão de estruturas metálicas em subestações baseada em (PAN, 2022). É utilizado aprendizado de máquina para classificar falhas de cabos em rede de acesso de cobre usando (GHAZALI, HASHIM, *et al.*, 2021), no monitoramento da saúde das torres estaiadas utilizando redes neurais artificiais (RICARDO, JIMENEZ, *et al.*, 2022). Em (ALVES,

BARBOSA, *et al.*, 2022), é apresentado uma análise de reflectometria para detectar falhas no sistema de ancoragem usando otimização de enxame de partículas.

As pesquisas encontradas na literatura referentes a detecção de desgastes causados por corrosão em parafusos olhais, compõem este trabalho de tese Em (FILHO, COUTINHO, *et al.*, 2020), é apresentado o projeto para o adaptador que faz a interface entre o parafuso olhal e o analisador de rede vetorial e em (FILHO, BARBOSA, *et al.*, 2021) é apresentado um sistema de medição mais robusto para medições de olhais, considerando elementos que compõem a ancoragem como a presença de concreto, porcas e arruelas. Adicionalmente, também é proposto um classificador binário para detectar a presença ou ausência de falhas estruturais a partir de sinais de magnitude de S11.

## 1.4 OBJETIVO

A presente tese objetiva propor um sistema que detecte falhas em parafusos olhais a partir do desenvolvimento de um adaptador com baixas perdas para que o sinal oriundo de um VNA (*Vector Network Analyzer*) trafegue pelo parafuso olhal. Com isso, é possível aplicar uma onda no conjunto e medir os parâmetros eletromagnéticos da linha de transmissão formada pelo parafuso. Esses parâmetros transportam a informação sobre o meio em que a onda se propaga, assim como a presença de eventuais falhas no material da estrutura. Portanto é possível aplicar uma ferramenta de aprendizado de máquina para auxiliar na detecção e classificação das amostras, analisando o módulo da perda de retorno.

Nesse sentido, os objetivos específicos desta tese consistem em:

- a) Projetar um adaptador que possibilite a aplicação do sinal oriundo do VNA nos parafusos;
- b) Analisar e definir qual parâmetro eletromagnético mais adequado para a extração das características que serão usadas na detecção das falhas nos parafusos olhais;
- c) Analisar e definir a faixa de frequências de operação do sistema;
- d) Realizar testes no Laboratório de Micro-ondas da UFPE;
- e) Gerar e estruturar uma base de dados suficiente e representativa para o treinamento e os testes de validação do desempenho do algoritmo de aprendizado de máquina que será desenvolvido.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está organizado em um total de cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais sobre linhas de transmissão, análise de redes de micro-ondas, simulação eletromagnética e aprendizado de máquina baseado no algoritmo floresta aleatória.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia para os experimentos realizados com o intuito de avaliar o desempenho do sistema proposto, considerando o modelo simulado e medido, além de apresentar o sistema de detecção utilizando aprendizado de máquina baseado no algoritmo floresta aleatória.

No Capítulo 4 são avaliados os resultados obtidos pelo sistema proposto nos testes de avaliação de desempenho realizados. As características observadas na magnitude do S11 para diferentes tipos de parafusos olhais. Além de apresentar uma análise do desempenho do sistema proposto a partir de um algoritmo de aprendizado de máquina. Finalmente, são discutidos o significado dos resultados obtidos e sua comparação com outras metodologias propostas na literatura. Foi proposto também um filtro acoplador na entrada do sistema com intuito de melhorar sua resposta.

O Capítulo 5 trata das conclusões desta tese. São apresentadas as considerações finais e sugestões para continuidade das investigações em trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as contribuições científicas geradas no desenvolvimento desta tese, listando as publicações dos resultados produzidos por este trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO

Linhas de transmissão de energia elétrica são estruturas por onde trafegam sinais elétricos partindo de um dado ponto ou plano de referência e chegando a outro. Na engenharia elétrica de sistemas de potência, as linhas de transmissão são responsáveis por transportar os blocos de energia elétrica que surgem nas geradoras e que chegam às distribuidoras por meio dessas linhas. Igualmente, essa energia elétrica é distribuída aos consumidores finais por meio das linhas de distribuição, sendo, portanto, uma modalidade de linhas de transmissão de energia elétrica.

Na engenharia de micro-ondas, os elementos que compõem um circuito elétrico possuem dimensões físicas em ordens de grandeza próximas aos comprimentos elétricos dos sinais que por eles fluem. As análises de tensão e corrente neste circuito devem considerar não apenas as variações temporais, mas também as variações espaciais dos elementos da linha. Estas análises sugerem, portanto, introduzir a componente espacial nas formulações de tensão e corrente, e assim utilizar a Teoria Eletromagnética em vez de a Teoria de Circuitos, como era conveniente.

Todavia, podem-se utilizar convenientemente as Leis de Kirchoff de Tensão e Corrente para caracterizar e parametrizar linha de transmissão com dimensões mecânicas e elétricas próximas. A seguir serão apresentadas as referidas formulações para uma linha de transmissão clássica.

#### 2.1.1 Modelo de circuito para uma linha de transmissão

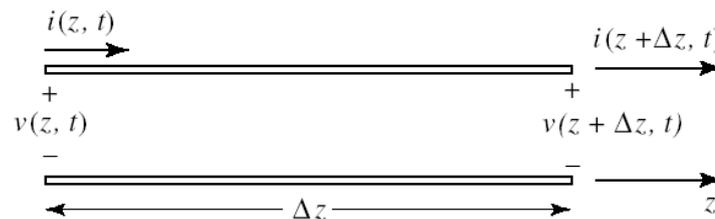
A obtenção das equações telegráficas de uma linha de transmissão é feita a partir do uso conveniente da Teoria de Circuitos aplicada a um trecho infinitesimal de uma linha de transmissão clássica formada por dois condutores separados por um meio dielétrico, garantindo assim o modo TEM de propagação nesta linha. Esta reconfiguração permite, portanto, utilizar a Teoria de Circuitos, desenvolvida apenas para circuitos de elementos concentrados (discretos) numa estrutura de parâmetros distribuídos, como o caso da linha de transmissão considerada.

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, o trecho infinitesimal da linha de transmissão formada por dois condutores elétricos dispostos paralelamente e a sua

representação por parâmetros elétricos concentrados conhecidos (POZAR, 2011). São:

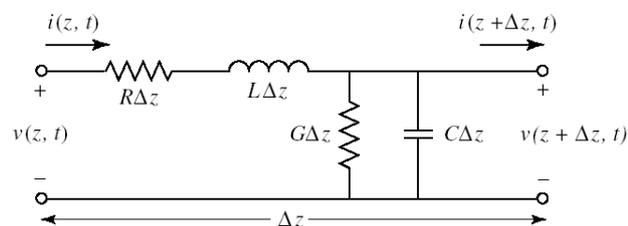
- $v(z, t)$  e  $i(z, t)$ : tensão [V] e corrente elétrica [A] no instante  $t$  [s] e no ponto  $z$  [m];
- $v(z + \Delta z, t)$  e  $i(z + \Delta z, t)$ : tensão e corrente elétrica no instante  $t$  e no ponto  $z + \Delta z$ ;
- $\Delta z$  : variação infinitesimal do parâmetro espacial  $z$ ;
- $R$ : resistência distribuída por unidade de comprimento [ $\Omega/m$ ];
- $L$ : indutância distribuída por unidade de comprimento [H/m];
- $G$ : condutância distribuída por unidade de comprimento [S/m];
- $C$ : capacitância distribuída por unidade de comprimento [F/m].

Figura 5 - Trecho infinitesimal de LT formada por dois condutores e dielétrico.



Fonte: (POZAR, 2011)

Figura 6 - Representação da Figura 5 por parâmetros concentrados.



Fonte: (POZAR, 2011)

Aplicando-se as Leis de Kirchoff das Tensões e das Correntes na Figura 5, além de algumas manipulações algébricas, obtêm-se (1) e (2), respectivamente. Elas são, portanto, as equações gerais de linhas de transmissão, e são apresentadas nos

domínios temporal ( $t$ ) e espacial ( $z$ ), conhecidas como equações telegráficas (POZAR, 2011).

$$-\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = Ri(z, t) + L\frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = Gv(z, t) + C\frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

No estado estacionário senoidal, é conveniente utilizar a notação fasorial, ao invés das apresentadas nos domínios temporal ( $t$ ) e espacial ( $z$ ) (POZAR, 2011). Representando a tensão e corrente como  $V$  e  $I$ , respectivamente e sem a dependência de tempo  $e^{j\omega t}$ , as equações (1) e (2) podem ser reescritas como:

$$-\frac{dV(z)}{dz} = (R + j\omega L)I(z) \quad (3)$$

$$-\frac{dI(z)}{dz} = (G + j\omega C)V(z) \quad (4)$$

Substituindo-se a derivada temporal da equação (4) na equação (3), e vice-versa, são obtidas as equações (5) e (6):

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(z) \quad (5)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I(z) \quad (6)$$

Onde  $\gamma$  é a constante de propagação da linha:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}. \quad (7)$$

Assim, as soluções para as Equações (5) e (6) são dadas por:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (8)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}) \quad (9)$$

Onde  $Z_0$  é a impedância característica da linha que tem o comprimento de onda dado pela equação 10.

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \frac{-V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (10)$$

Além disso, podemos extrair o comprimento de onda, dado pela equação (11) e a velocidade de fase, dada pela equação (12), (POZAR, 2011).

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (11)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f \quad (12)$$

As soluções encontradas acima são para o caso geral de linha de transmissão. Para o caso de uma linha de transmissão sem perdas,  $R$  e  $G$  são iguais a zero e assim a constante de propagação da linha, a tensão e as equações de (13) a (18) podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (13)$$

$$V(z) = V_0^+ e^{-\beta z} + V_0^- e^{\beta z} \quad (14)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-\beta z} - V_0^- e^{\beta z}) \quad (15)$$

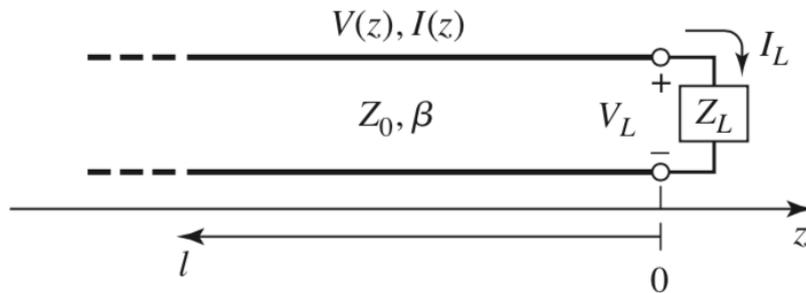
$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} \quad (17)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (18)$$

A relação entre a tensão e corrente em uma linha de transmissão infinita é igual a sua impedância característica  $Z_0$ . Quando essa linha é terminada por uma carga  $Z_L \neq Z_0$  (Figura 7), a relação entre tensão e a corrente na carga é  $Z_L$ , assim, existe uma onda refletida para satisfazer essa condição em  $z = 0$  (POZAR, 2011).

Figura 7: Linha de transmissão terminada com uma impedância de carga  $Z_L$ .



Fonte: (POZAR, 2011)

A relação entre a amplitude da tensão refletida e da onda incidente nesse ponto é definida como coeficiente de reflexão,  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (19)$$

A impedância de entrada vista na linha de transmissão da Figura 7 pode ser calculada pela Equação 20:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (20)$$

## 2.2 ANÁLISE DE REDES DE MICRO-ONDAS

Um circuito de micro-ondas pode ser modelado por uma rede de  $n$  portas onde são analisadas, corrente, tensão e ondas incidentes, refletidas ou transmitidas, sem a necessidade direta da aplicação das Equações de Maxwell. As matrizes de

impedância/admitância, ABCD e parâmetros de espalhamento são normalmente utilizadas para modelar esses circuitos. As duas primeiras mostram uma relação entre tensão e corrente nas portas, enquanto a última mostra as relações entre ondas de tensão.

Em frequência de micro-ondas, não há dispositivos para medição direta de tensões e correntes, como é feito nos circuitos que operam com baixa frequência. O equipamento amplamente utilizado para a caracterização de um dispositivo de micro-ondas é o analisador de redes. Ele é utilizado para medir grandezas como módulo e fase dos parâmetros de espalhamento. Com isso matrizes de impedância, admitância e ABCD podem ser obtidas a partir desses parâmetros.

Nesta seção, a definição e algumas propriedades da matriz de espalhamento são apresentadas.

### 2.2.1 Parâmetros de espalhamento em uma rede de micro-ondas

Os parâmetros S (espalhamento) relacionam as tensões incidentes e refletidas em cada porta do dispositivo com  $n$  portas, quantificando um sinal que se propaga através dessa rede multiportas. A matriz S para uma rede de  $n$  portas, contém  $N^2$  coeficientes e é mostrada na equação. São normalmente apresentados em forma de matriz (Matriz S - do inglês *Scattering*) (LANCASTE e HONG, 2001); (POZAR, 2011).

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (21)$$

Ou,

$$[V^-] = [S][V^+] \quad (22)$$

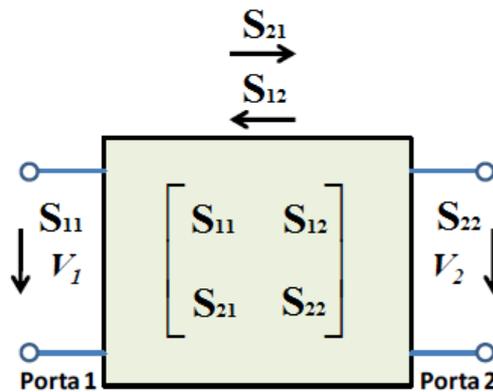
Mais especificamente, cada elemento da matriz é dado por:

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_i^+ = 0 \text{ para } i \neq j} \quad (23)$$

Em que  $S_{ij}$  é a relação entre a tensão da onda refletida na porta  $i$  quando as ondas incidentes em todas as portas são iguais a zero, exceto na porta  $j$ . Isso significa que todas as portas  $i \neq j$  são terminadas em uma carga casada para evitar reflexões. Sob essas condições,  $S_{ii}$  fornece o coeficiente de reflexão na porta  $i$ , e  $S_{ij}$  o coeficiente de transmissão da porta  $j$  para a porta  $i$ .

Esses parâmetros podem ser obtidos utilizando-se técnicas de análise de circuito. Para o seu cálculo, deve-se considerar que as portas do circuito que estão sendo analisadas estejam devidamente casadas para não haver influência no resultado da análise. A Figura 8 apresenta uma rede de duas portas (porta de entrada 1 e porta de saída 2) onde os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{22}$  representam os de coeficientes de reflexão, enquanto os parâmetros  $S_{12}$  e  $S_{21}$  são os coeficientes de transmissão.

Figura 8 - Representação de uma rede de duas portas por parâmetros S.



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

As expressões abaixo, apresentam em termos de variáveis dos parâmetros S do esquema apresentado na Figura 8, onde os termos  $a_n=0$  indicam um casamento perfeito de impedância, isto é, não há reflexão da impedância terminal para a porta  $n$  (LANCASTE e HONG, 2001); (POZAR, 2011).

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, a_2 = 0 \quad (24)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}, a_1 = 0 \quad (25)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}, a_2 = 0 \quad (26)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}, a_1 = 0 \quad (27)$$

Na forma matricial, é possível escrever:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Os parâmetros  $S$  são geralmente complexos, sendo então conveniente a sua representação em termos de amplitude e fase. De forma genérica, temos:

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\phi_{ij}}, \text{ para } i, j = 1, 2 \quad (29)$$

Para utilizar a amplitude em decibéis (dB), devemos usar:

$$|S_{ij}|_{dB} = 20 \log |S_{ij}| \quad (30)$$

Os parâmetros  $S$  possuem várias propriedades úteis para análise de redes de micro-ondas. Para uma rede recíproca, temos que  $S_{12} = S_{21}$ . Se além de recíproca a rede for simétrica, temos ainda que  $S_{11} = S_{22}$ . Por outro lado, se uma rede é dita simétrica, ela também é recíproca. Para uma rede passiva e sem perdas, a potência transmitida somada com a potência refletida é igual à potência total incidente, ou seja (LANCASTE e HONG, 2001); (POZAR, 2011):

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1 \quad (31)$$

$$|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2 = 1 \quad (32)$$

### 2.3 SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Existem vários *softwares* comerciais para o projeto de circuitos de altas frequências que utilizam ferramentas gráficas chamadas de CAD (do inglês,

*Computer-Aided Design*) e permitem desenhar a estrutura dos circuitos em 2D ou 3D, além de realizar a simulação eletromagnética (EM) de onda completa.

A simulação EM de onda completa resolve as Equações de Maxwell dentro das condições de contorno impostas para a estrutura de altas frequências a ser analisada. Alguns métodos numéricos são utilizados nos simuladores comerciais como o Método dos Momentos (MoM, do inglês *Method of Moments*), Método de Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite-Element Method*), Método da Diferença Finita no Domínio do Tempo (FDTD, do inglês *Finite-Difference Time-Domain*) e Método da Equação Integral (IE, do inglês *Integral Equation*).

Esses simuladores dividem a estrutura em pedaços (células) menores em 2D ou 3D e aplicam as Equações de Maxwell em cada uma dessas subdivisões. O resultado EM da estrutura toda é a superposição dos resultados em cada célula individual. Essas subdivisões formam a malha de simulação do software, e quanto mais fina essa malha (células menores) for, mais exatos serão os resultados, mais demorados os tempos de simulação e maior a memória computacional exigida.

De modo geral, a exatidão dos resultados simulados depende diretamente da malha de simulação, que influencia no ponto de convergência da técnica numérica empregada pelo simulador EM. Muitos simuladores indicam qual a melhor malha a ser utilizada, mas permitem que o usuário possa alterá-las para fazer o refinamento dos resultados da estrutura. Por isso, torna-se muito importante considerar o quão pequeno deve ser o tamanho da célula para que se obtenham soluções mais precisas de um simulador EM a um tempo de simulação hábil.

Simuladores de onda completa apresentam outra dificuldade ao que se concerne o processamento e disponibilidade de memória.

O simulador de onda completa utilizado nesse Projeto de Tese é o HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), da ANSYS *Incorporation* (CENDES, 2016). É um software significativamente completo, com várias ferramentas que auxiliam o projeto de dispositivos de altas frequências, como por exemplo, a disponibilidade de vários modelos pré-configurados com as condições de contorno e a malha de simulação necessárias às estruturas mais comumente utilizadas, ferramentas para cálculo de impedância, comprimento de onda, biblioteca contendo uma variedade enorme de substratos comerciais para aplicações em micro-ondas, entre outras.

## 2.4 Aprendizado de máquina baseado no algoritmo floresta aleatória

O aprendizado de máquina é uma disciplina interdisciplinar que se destaca no campo da inteligência artificial. Com base em fundamentos estatísticos e computacionais, o aprendizado de máquina busca desenvolver algoritmos e técnicas que permitem que sistemas computacionais aprendam a partir de dados. Assim, adquiram a capacidade de tomar decisões informadas sem serem explicitamente programados (SHALEV-SHWARTZ e BEN-DAVID, 2014), (MURPHY, 2012). Consentindo a análise e interpretação de conjuntos de dados massivos, identificando padrões, correlações complexas e fornecendo previsões precisas.

Além disso, é importante ressaltar que a escolha do tipo de aprendizado de máquina adequado depende das características dos dados disponíveis e dos objetivos específicos do problema em questão. Existem dois principais tipos de aprendizado de máquina: o aprendizado supervisionado (BURKART e HUBER, 2021), aplicado quando se deseja fazer previsões ou classificações com base em exemplos rotulados, e o aprendizado não supervisionado (R. e CAREY, 2008), utilizado para descobrir padrões e estruturas ocultas em conjuntos de dados não rotulados.

Os algoritmos de aprendizado supervisionado, buscam aprender um modelo capaz de generalizar para novas instâncias e fornecer previsões ou classificações corretas. Esses modelos podem variar desde regressões lineares (DREISEITL e OHNO-MACHADO, 2002) e árvores de decisão (J., 2012) até algoritmos mais avançados, como redes neurais artificiais (BALDI, HORNIK e MINIMA, 1989), máquinas de vetor de suporte (VAPNIK, 1995) e floresta aleatória (BREIMAN, 2001). Esta tese apresentará um sistema de detecção aplicando o aprendizado supervisionado baseado, no algoritmo floresta aleatória.

Desenvolvido na década de 1990, as florestas aleatórias (HO, 1995) tornaram-se conhecidas por sua capacidade de ponta na classificação ou regressão, e sua capacidade de lidar com variáveis categóricas ou contínuas, bem como lidar com dados perdidos (STROBL, MALLEY e TUTZ, 2009). Além disso, na maioria das implementações, os chamados *out-of-bag* ou erros de generalização são calculados automaticamente e seu desempenho não é particularmente sensível aos poucos hiperparâmetros necessários para ajustar os modelos. Como consequência, a popularidade desses modelos nas indústrias de processo está crescendo rapidamente, com aplicações, por exemplo, na modelagem preditiva (SHAHBAZI,

CHELGANI e MATIN, 2017); (CARRANZA e LABORTE, 2015), diagnóstico de falhas e análise de causa raiz (ALDRICH e AURET, 2010); (AURET e ALDRICH, 2010), ciências médicas (SINGH, SINHA e SINGH , 2017), bem como em sistemas de detecção de falhas em estruturas metálicas (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2021).

A Floresta aleatória é um algoritmo de aprendizado de máquina que utiliza uma coleção de árvores de decisão para realizar tarefas de classificação ou regressão. Cada árvore de decisão é treinada em um subconjunto aleatório dos dados de treinamento e utiliza uma seleção aleatória de recursos (variáveis) para tomar decisões durante a construção da árvore (BREIMAN, 2001); (HO, 1995).

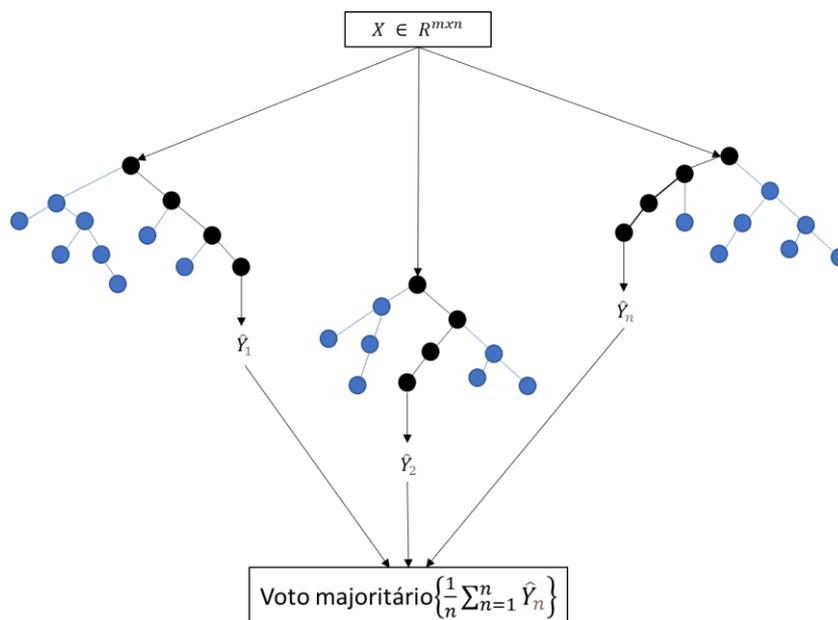
Em seu processo de treinamento, várias árvores de decisão são criadas usando diferentes subconjuntos de dados e características. Cada árvore é treinada de forma independente, com a escolha aleatória de subconjuntos de dados e características, garantindo a diversidade entre as árvores (CHRIS , 2020).

Durante a fase de teste, cada árvore produz uma previsão individual. Para problemas de classificação, a previsão final é determinada por voto majoritário, ou seja, a classe mais frequente prevista pelas árvores é escolhida como a previsão final.

Um dado conjunto de treinamento  $D$  com  $n$  amostras, consistindo em  $m$  variáveis preditoras  $X \in \mathbb{R}_{n \times m}$  e uma variável alvo  $y \in \mathbb{R}_{n \times 1}$ , o algoritmo de árvore de classificação particiona recursivamente o espaço de entrada  $X$  para obter um preditor em forma de árvore com  $\hat{Y}$ , sendo a resposta estimada como uma função dos preditores (CHRIS , 2020).

As previsões das árvores individuais  $\hat{Y}$  são subsequentemente calculadas sobre todas as árvores na floresta aleatória para gerar a previsão do modelo, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática de uma floresta aleatória



Fonte: Adaptado de (CHRIS, 2020)

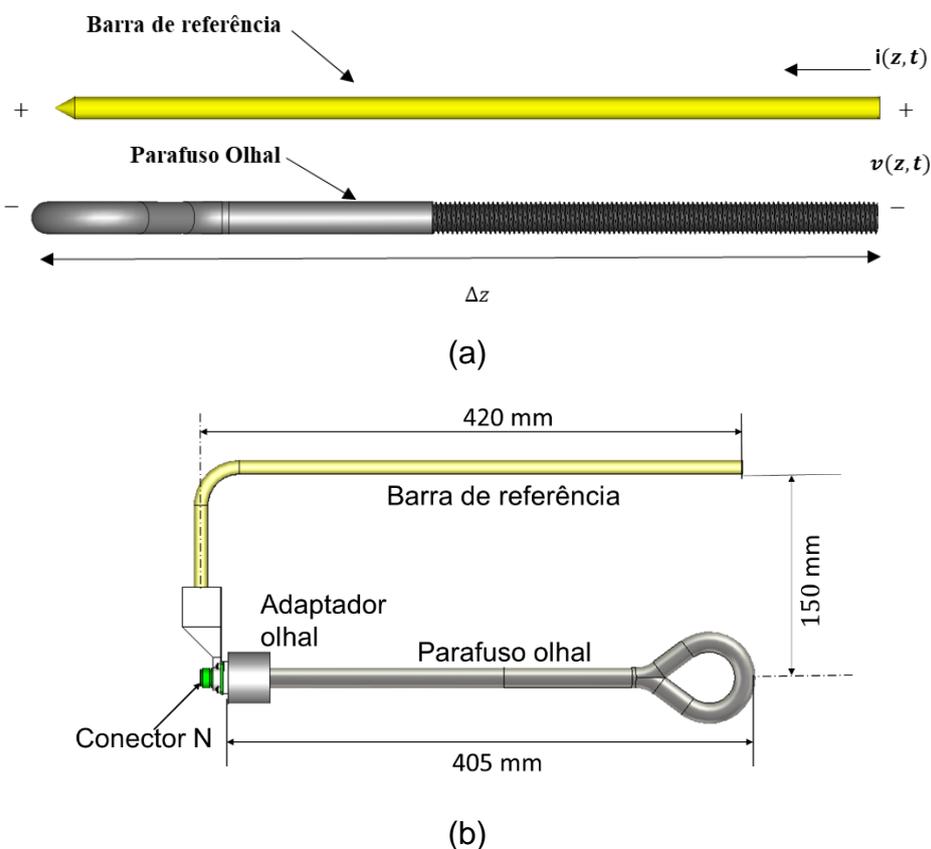
Esse processo de combinar as previsões de várias árvores ajuda a reduzir o *overfitting* (ajuste excessivo aos dados de treinamento) e aumentar a estabilidade e a precisão do modelo (J., 2012). Além disso, a floresta aleatória também fornece uma medida da importância de cada variável no processo de tomada de decisão, o que ajuda a interpretar os resultados e entender quais características são mais relevantes para a tarefa em questão.

### 3 METODOLOGIA

O sistema proposto pode ser comparado a uma linha de transmissão composta por dois fios paralelos, de diâmetros diferentes. O parafuso olhal, que é essencialmente um cilindro condutor metálico, atua como o primeiro condutor. Para estabelecer uma referência, um segundo condutor, conhecido como barra de referência, é conectado em paralelo ao parafuso, mantendo uma distância específica entre eles, conforme mostrado na Figura 10 (a).

Considerando que haja uma conexão de baixas perdas a uma fonte de tensão, é possível aplicar uma onda de alta frequência no conjunto e medir os parâmetros eletromagnéticos da linha de transmissão formada pelo sistema. A Figura 10 (b), apresenta a distribuição de medidas do sistema, como distância entre os condutores (parafuso + barra de referência) e suas dimensões.

Figura 10 - Linha de transmissão formada pelos parafusos olhais e a barra de referência



Fonte: Acervo do autor

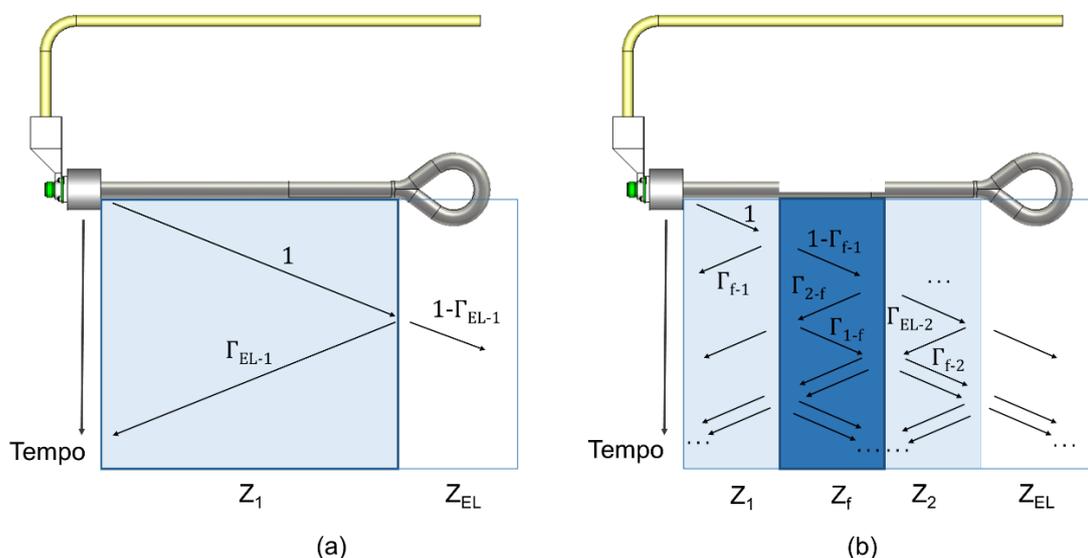
O funcionamento do sistema de medição proposto é fundamentado na teoria de linhas de transmissão e múltiplas reflexões, conforme descrito por (POZAR, 2011).

A partir desse princípio, uma onda eletromagnética incidente se propaga em um ambiente físico e, ao encontrar uma interface com outro meio de impedância característica diferente ou qualquer tipo de descontinuidade, ocorrem reflexões e refrações proporcionais ao sinal de tensão injetado. Essas reflexões e refrações são elementos-chave para a análise e medição no sistema proposto (GU, 1994); (FURS e DIAMOND, 2009); (POZAR, 2011). A proporção que a onda é refletida e quanto é refratada depende das características específicas de ambos os meios e é dada pelo coeficiente de reflexão  $\Gamma$ . Assim, como existem diferentes padrões de interação entre as ondas incidente e refletida que se propagam no parafuso para os casos normal e com falhas, a detecção pode ser realizada através da análise das características dos sinais refletidos, medidos por parâmetros de alta frequência como a magnitude do  $S_{11}$ .

O  $\Gamma$  está relacionado ao  $S_{11}$ , medido pelo analisador de rede. Para um parafuso com defeito, como mostrado na Figura 11 (b), os parâmetros da linha dependem das variações das falhas, como comprimento e profundidade. Assim, quando uma onda eletromagnética é injetada no sistema e encontra uma descontinuidade na estrutura, ocorre uma divisão da onda incidente. Parte dela é refletida e a outra parte é transmitida ao longo da linha de transmissão. Esse processo resulta em alterações nas características de perda de retorno, em comparação com o caso de um olhal sem defeito. Já para o caso do parafuso sem falhas (Figura 11 (a)) só há uma reflexão quando a onda atinge o seu final. Assim, essas alterações permitem a distinção entre um parafuso intacto e outro com defeito.

Figura 11 – Representação do funcionamento das múltiplas reflexões no sistema proposto

(a) Parafuso sem falhas; (b) parafusos com falhas.



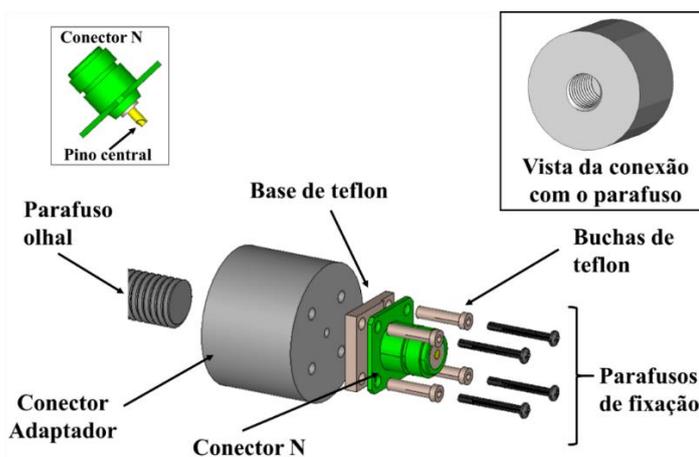
Fonte: Acervo do autor

Onde:  $\Gamma_1, \Gamma_2$  e  $\Gamma_3$  são os coeficientes de reflexão;  $T_{12}$  e  $T_{21}$  são os coeficientes de transmissão;  $Z_1, Z_2, Z_f$  e  $Z_{EL}$  são as impedâncias características dos meios 1, 2, falha e espaço livre, respectivamente.

### 3.1 ADAPTADOR DE ALTA FREQUÊNCIA

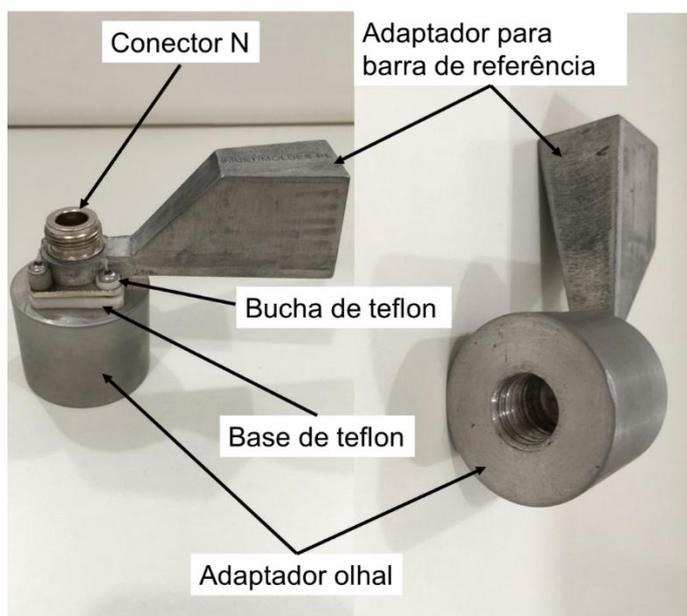
O adaptador de alta frequência, denominado de adaptador olhal foi projetado em formato cilíndrico em alumínio. Em uma das suas extremidades há uma rosca para possibilitar o acoplamento do parafuso olhal. Em sua extremidade oposta há quatro furos de fixação e um furo central para encaixe do pino central do conector N-fêmea que recebe o cabo do VNA fazendo contato elétrico com o adaptador olhal. Para possibilitar o isolamento da base do conector N, foi projetada uma base e buchas de Teflon, a qual só pode ter contato com a barra de referência. A descrição dos principais componentes do adaptador olhal é exibida na Figura 12 para modelo de simulação, e Figura 13 para o modelo de medição.

Figura 12 - Modelo de simulação do adaptador olhal.



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 13 - Adaptador de micro-ondas para parafusos olhais para medição



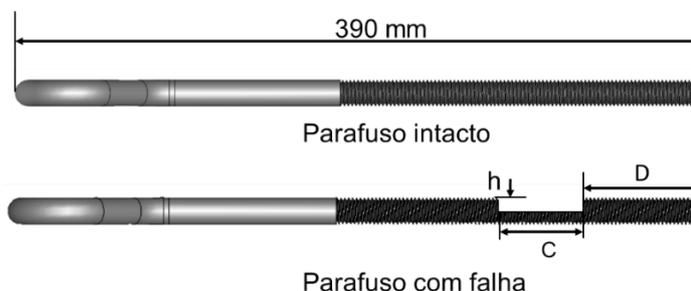
Fonte: Acervo do Autor.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para o modelo de simulação, foi modelado um parafuso olhal composto de aço carbono (SAE 1045) recoberto de uma fina camada de zinco para maior aproximação com o parafuso real. Ele apresenta o comprimento de 390 mm e diâmetro de 15,87 mm (5/8"). A Figura 14 (a) apresenta o modelo utilizado para o parafuso intacto, e a Figura 14 (b) apresenta o modelo para os parafusos com desgaste, em que foram

propostas variações de comprimento (C), altura (h) e distância da falha ao ponto de conexão (D). A Tabela 1, apresenta os valores utilizados para as falhas simuladas.

Figura 14 - Detalhes do modelo de simulação de olhal para as configurações sem falhas e com falhas.



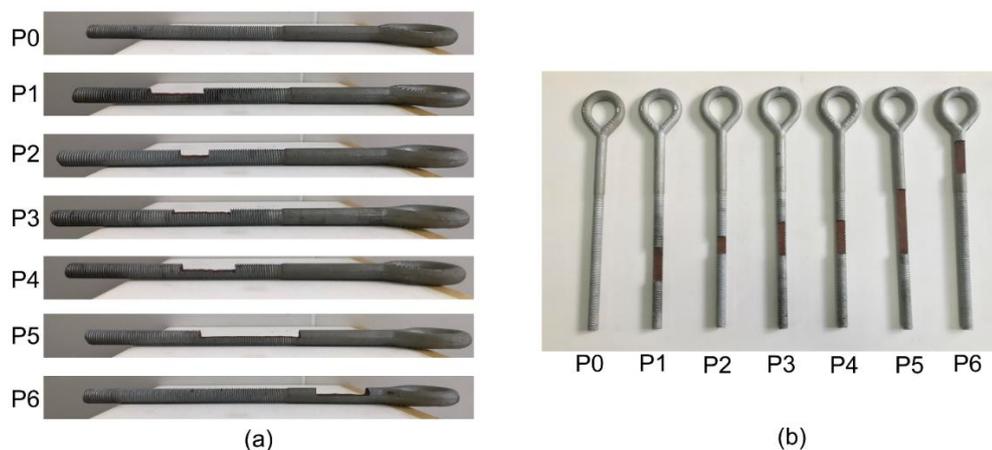
Fonte: Acervo do Autor.

Tabela 1- Dimensões dos parâmetros de falha nos parafusos simulados

Parâmetros	Configurações (mm)
Comprimento (C)	5, 25, 50, 75, e 100
Altura (h)	0.1 a 8.0 com passo de 0.1; 9, 10, 11, 12, e 13
Distância (D)	75, 100, 125, 150, 175, 200 e 225

Parta medição, foram utilizados parafusos olhais de aço carbono (SAE 1045) galvanizado a quente com diâmetro de 15,87 mm (5/8") e comprimento de 390 mm. Um conjunto de sete amostras distintas de parafusos olhais foi proposto, sendo um sem falhas (P0) e outras seis contendo falhas distintas, como pode ser visto na Figura 15. As dimensões são apresentadas na Tabela 2.

Figura 15 – Foto dos parafusos utilizados nas medições: a) Vista lateral b) Vista superior



Fonte: Acervo do Autor.

Tabela 2 – Configuração dos parafusos medidos.

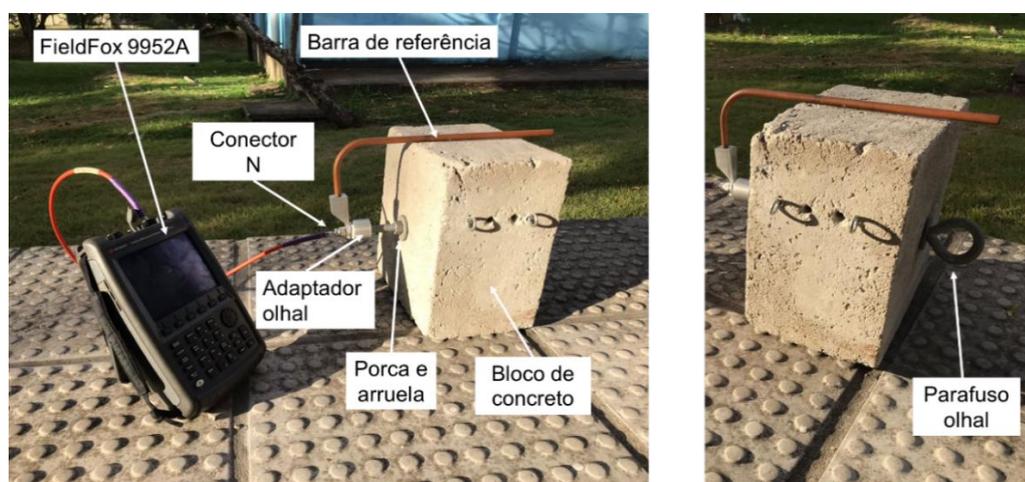
Parafusos	Comprimento (C) (mm)	Altura (h) (mm)	Distância (D) (mm)
P0	Sem desgaste		
P1	50	8	75
P2	25	8	100
P3	50	2	100
P4	50	8	100
P5	100	8	100
P6	50	8	225

### 3.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Para realizar as medições com segurança, foi utilizado um bloco de concreto com as dimensões aproximadas das vigas e pilares comumente encontrados em subestações de 230 kV e 69 kV e em linhas de transmissão de 69 kV, para emular as estruturas de concreto nas quais os olhais são inseridos com dimensões de (300 x 300 x 210) mm. Adicionalmente, a configuração de medição também considerou acessórios como porcas e arruelas que compõem o sistema de ancoragem juntamente com o olhal, além do adaptador olhal.

O modelo conta também com uma barra de referência constituída por uma barra cilíndrica de  $\varnothing$  9,52 mm (3/8") de aço carbono SAE 1020 recoberta de cobre eletrolítico. A aquisição do sinal foi realizada por um analisador portátil de rede vetorial (VNA) modelo FieldFox 9952, como pode ser visto na Figura 16.

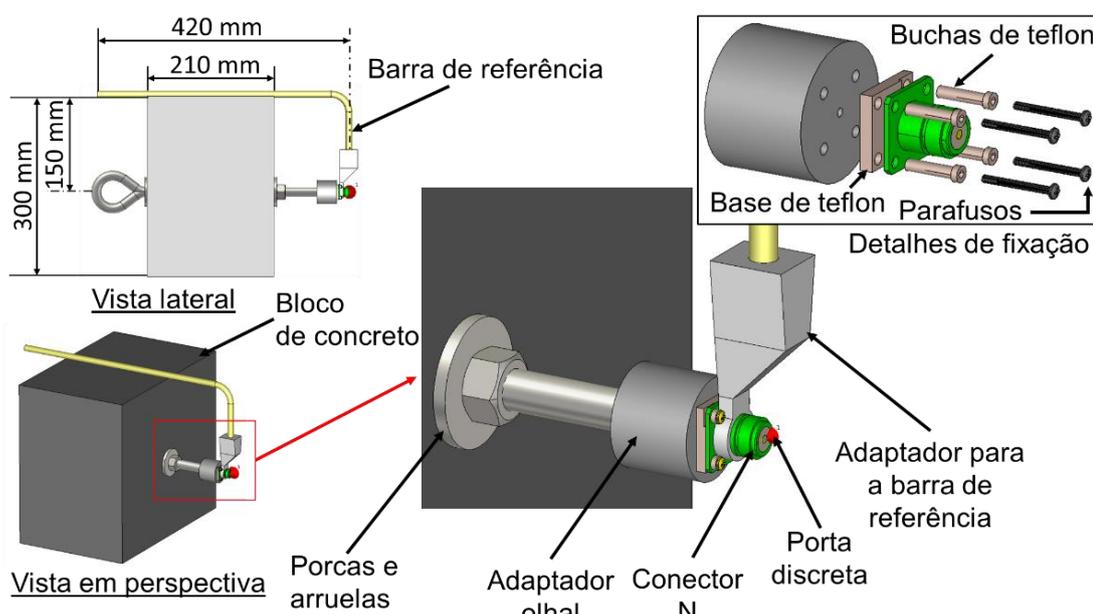
Figura 16 – Fotografia detalhada da configuração para medição



Fonte: Acervo do Autor.

No intuito de buscar maior aproximação com o sistema de medição, foi proposto um sistema de simulação. O condutor de referência foi modelado como uma barra cilíndrica de aço carbono coberta de uma fina camada de cobre (SAE 1010/1020) com diâmetro de 9,52 mm (3/8”) e comprimento paralelo de 420 mm. Para possibilitar essa conexão, foi usado um adaptador, que se encaixa na parte externa do conector N e se conecta à barra de referência, a qual ficou a uma distância de 150 mm do parafuso olhal, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Configuração para simulação



Fonte: Acervo do Autor.

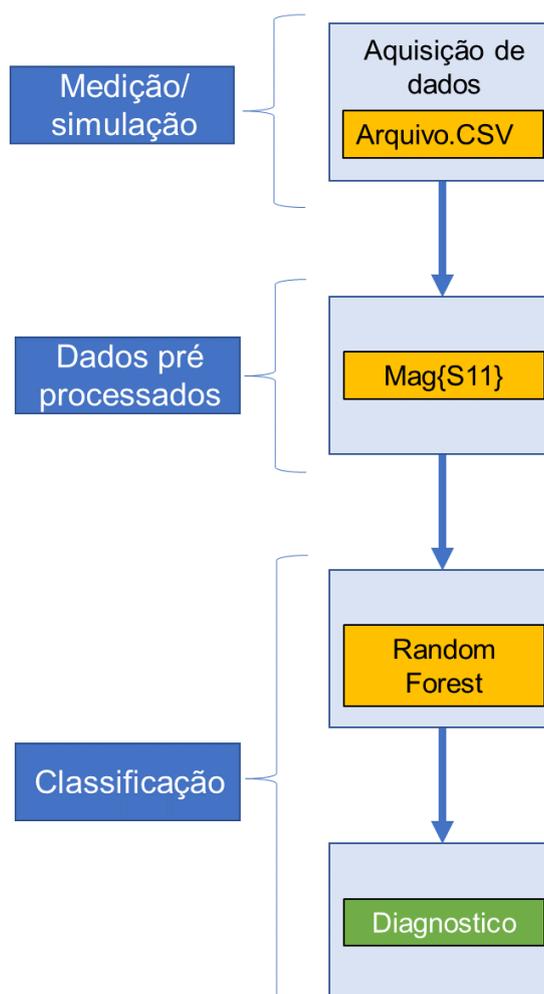
### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

O sistema proposto foi desenvolvido e treinado para detectar defeitos estruturais em parafusos olhais de ancoragem. Embora todos os dados utilizados para construir o banco de dados tenham sido obtidos a partir de um modelo desenvolvido em laboratório, o meio de propagação da onda eletromagnética será semelhante ao encontrado na rede de distribuição.

Isso ocorre porque as dimensões físicas do parafuso olhal em teste são as mesmas consideradas no treinamento do sistema de detecção, e ele é inserido em uma estrutura de concreto. Dessa forma, o sistema é projetado para ser eficaz na detecção de falhas em parafusos olhais embutidos em estrutura de concreto.

Esse sistema consiste em um classificador binário desenvolvido em *python* (PEDREGOSA, 2011), baseado em um algoritmo floresta aleatória (HO, 1995); (BREIMAN, 2001), o qual, recebe como entrada um vetor contendo as amostras pré-processadas da magnitude do {S11}. O fluxograma simplificado mostrado na Figura 18 apresenta a arquitetura simplificada do sistema proposto.

Figura 18 - A arquitetura do classificador binário proposta



Fonte: Acervo do Autor.

A seleção da floresta aleatória como modelo de aprendizado de máquina utilizado para o classificador deu-se pelos resultados apresentados por (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2019), o qual comparou 05 algoritmos de ML diferentes (Regressão Logística, KNN, SVM, Redes Neurais e Floresta Aleatória) na detecção de falhas em hastes de ancoragem através do processamento de parâmetros eletromagnéticos.

Conforme os resultados apresentados em (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2019), o desempenho do algoritmo floresta aleatória supera outras abordagens, tronando-se mais efetivo para esse tipo de aplicação. O qual é equivalente ao princípio abordado nesta tese.

As amostras obtidas dos  $m$  parafusos são organizadas em uma matriz de parâmetros  $X_{m \times n}$ , onde cada linha  $x_i = (x_{i1}^1, x_{i2}^1, \dots, x_{in}^1)$  contém um vetor de entrada composto pela magnitude de S11, referente ao  $i$ -ésimo parafuso. O formato geral do banco de dados é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Estrutura da base de dados prospota

Vetor	Entrada	Saída
Parâmetro	Mag {S11}	Status
Array	$X_{\text{Mag}\{S11\}}$	Y
Dimensão	$m \times 501$	$m \times 1$
Tipo	Valor real	Valor binário
Parafuso 1	Dados: 501 amostras em frequência de 200 MHz a 600 MHz	$Y_1$
Parafuso 2		$Y_2$
...		...
Parafuso $m$		$Y_m$

Fonte: Acervo do Autor.

A saída do sistema é dividida em duas classes: defeituosa ou sem falhas, em relação à condição estrutural dos olhais avaliados.

Adicionalmente, para permitir o treinamento supervisionado do modelo, um vetor coluna  $Y_{m \times 1} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$  de  $m$  rótulos binários é definido. Cada elemento  $y_i$  é a etiqueta de classificação do parafuso correspondente à  $i$ -ésima linha da matriz  $X$ , sendo atribuído o valor 1 se o sinal  $x_i$  for proveniente de um parafuso com defeito e 0, caso contrário. O menor valor que delimitou os limites das classes corresponde a uma falha em seu estágio inicial de dano, com comprimento de 5,0 mm e profundidade de 0,1 mm.

Para a validação do sistema, empregou-se a técnica de validação cruzada k-fold, método utilizado para avaliar o desempenho de um modelo de aprendizado de máquina. Ele consiste em dividir o conjunto de dados em  $K$  subconjuntos ou "dobras" de tamanhos aproximadamente iguais. Para isso, inicialmente os dados são embaralhados aleatoriamente, para evitar qualquer viés de ordem nos conjuntos, depois disso os dados são divididos em  $K$  subconjuntos de tamanhos semelhantes.

Assim, o modelo é treinado K vezes, cada vez utilizando K-1 subconjuntos, como conjunto de treinamento e o subconjunto restante como conjunto de teste. Finalmente, os resultados das K iterações são agregados, por exemplo, calculando a média ou a pontuação média para fornecer uma medida geral do desempenho do modelo (KOHAVI, 1995). A Figura 19 apresenta um exemplo para modelo com K=5.

Figura 19 - Validação cruzada *k-fold*

Banco de dados					
	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5
Iteração 1	Teste	Treino	Treino	Treino	Treino
Iteração 2	Treino	Teste	Treino	Treino	Treino
Iteração 3	Treino	Treino	Teste	Treino	Treino
Iteração 4	Treino	Treino	Treino	Teste	Treino
Iteração 5	Treino	Treino	Treino	Treino	Teste

**Fonte:** Acervo do Autor.

A validação cruzada *k-fold* é útil para fornecer uma estimativa mais confiável do desempenho do modelo, pois utiliza todos os dados disponíveis tanto para treinamento quanto para teste. Além disso, ajuda evitar problemas como sobreajuste (*overfitting*) ou subajuste (*underfitting*), fornecendo uma avaliação mais robusta do modelo (RAMEZAN, 2019); (KOHAVI, 1995). Neste trabalho, foi adotado um valor de  $k=10$  (KOHAVI, 1995), assim para cada iteração, 90% das amostras são destinadas ao treinamento e os 10% restantes, para o teste. Consequentemente, é considerada média dos valores dos modelos de desempenho das 10 iterações que cobrem toda a base de dados.

Para avaliar o desempenho do modelo de classificação apresentado será utilizada a acurácia. Ela mede a taxa de acertos do modelo, ou seja, a proporção de instâncias classificadas corretamente em relação ao total de instâncias avaliadas (SOKOLOVA, JAPKOWICZ e SZPAKOWICZ, 2006). A definição teórica da acurácia pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$Acurácia = \frac{t_p + t_n}{t_p + t_n + f_p + f_n} \quad (33)$$

Nela, os verdadeiros positivos ( $t_p$ ) são os casos em que o modelo classificou corretamente uma instância como pertencente à classe positiva, enquanto os verdadeiros negativos ( $t_n$ ) são os casos em que o modelo classificou corretamente uma instância como pertencente à classe negativa. O total de instâncias é a soma dos verdadeiros positivos, verdadeiros negativos, falsos positivos ( $f_p$ ) (casos em que o modelo classificou erroneamente uma instância como pertencente à classe positiva) e falsos negativos ( $f_n$ ) (casos em que o modelo classificou erroneamente uma instância como pertencente à classe negativa).

Contudo, embora a acurácia seja uma medida útil para avaliar o desempenho geral de um modelo de classificação, é sempre recomendado analisar outras métricas relevantes para se ter uma compreensão mais completa do seu desempenho em diferentes cenários. Assim, complementarmente serão avaliados os parâmetros de precisão, sensibilidade e f1 (GOUTTE e GAUSSIER, 2005); (SOKOLOVA, JAPKOWICZ e SZPAKOWICZ, 2006).

A precisão mede a proporção de instâncias classificadas corretamente como positivas em relação ao total de instâncias classificadas como positivas (verdadeiros positivos + falsos positivos). É uma métrica útil para avaliar o quão precisamente o modelo identifica as instâncias positivas (Goutte & Gaussier, 2005). A definição teórica da precisão pode ser exposta como a seguinte expressão:

$$Precisão = \frac{t_p}{t_p + f_p} \quad (34)$$

A sensibilidade mede a capacidade do modelo em identificar corretamente as instâncias positivas (ou seja, a taxa de verdadeiros positivos). Ela é calculada como a proporção de verdadeiros positivos em relação ao total de instâncias positivas. A sensibilidade é importante quando o foco encontra-se em minimizar os falsos negativos, ou seja, quando é crucial identificar corretamente todas as instâncias positivas, mesmo que isso signifique aumentar os falsos positivos (Goutte & Gaussier, 2005). A definição teórica da sensibilidade pode ser apresentada como a seguinte expressão:

$$Sensibilidade = \frac{t_p}{t_p + f_n} \quad (35)$$

Já o F1 é uma métrica combinada que leva em consideração tanto a precisão quanto a sensibilidade. É a média harmônica dessas duas métricas e fornece uma medida balanceada do desempenho do modelo (Goutte & Gaussier, 2005). A definição teórica da F1 pode ser apresentada como a seguinte expressão:

$$F1 = 2 \cdot \frac{Prec \cdot Rec}{Prec + Rec} \quad (36)$$

Em suma, a acurácia mede a taxa geral de acertos, A precisão mede a proporção de verdadeiros positivos em relação ao total de instâncias classificadas como positivas. A sensibilidade mede a capacidade do modelo em identificar corretamente as instâncias positivas. E o F1-score é uma métrica balanceada que combina precisão e sensibilidade.

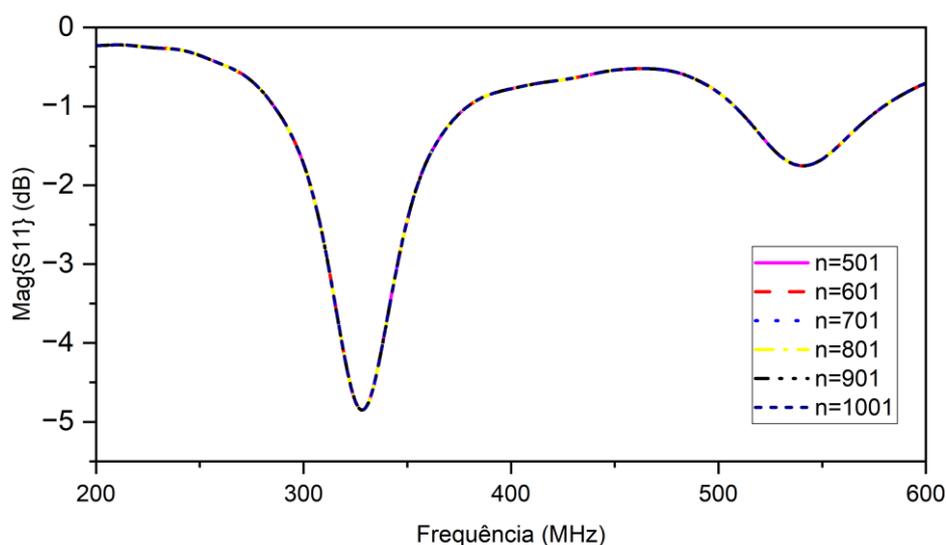
## 4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Devido a limitação da quantidade de amostras de parafusos reais para as medições, o mesmo parafuso foi medido várias vezes em baterias de 10 medições, alternando entre os sete modelos para fornecer informações suficientes sobre essas variações de sinal devido a erros inerentes ao processo de medição, como conexões imperfeitas e ruídos, que devem ser ignorados pelo classificador. A metodologia empregada para medição neste trabalho foi a mesma apresentada nos trabalhos (BARBOSA, 2020); (COUTINHO, BARBOSA, *et al.*, 2021).

Os sinais obtidos para a magnitude do S11, são amostrados em  $n = 501$ , pontos igualmente espaçados em uma faixa de frequência de 200 a 600 MHz para dados de simulação e medição. Essa faixa de frequência foi escolhida porque permite a observação dos pontos de ressonância relacionados ao sistema proposto.

A escolha da quantidade de pontos de frequência por amostragem decorreu do foco em uma resolução suficiente para análise dos dados e no esforço computacional para o banco de dados de simulação. Inicialmente foi realizado um estudo utilizando o P0, variando a quantidade de pontos de 501 a 1001, como mostra a Figura 20, tendo como referência o parafuso sem desgaste (P0), onde é possível observar que não houve variações do sinal.

Figura 20 – Variação do número de pontos para magnitude do S11 para os sinais simulados referentes ao parafuso P0



Fonte: Acervo do Autor.

As simulações levaram aproximadamente 8 minutos 501 pontos e 15 minutos para 1001 pontos, utilizando um computador com processador Intel Core i5-10400F, 6-Core, 12-Threads, 2.9Ghz e 16GB DDR4 3000MHz de memória RAM. Assim, foi definido o número de pontos em  $n=501$ , pois a resolução foi suficiente para analisar os dados e obter uma redução no tempo de simulação (BARBOSA, 2020). Conseqüentemente, para haver uma compatibilidade entre a base de dados de simulação e medição, foi adotada também a mesma quantidade de pontos para os sinais medidos.

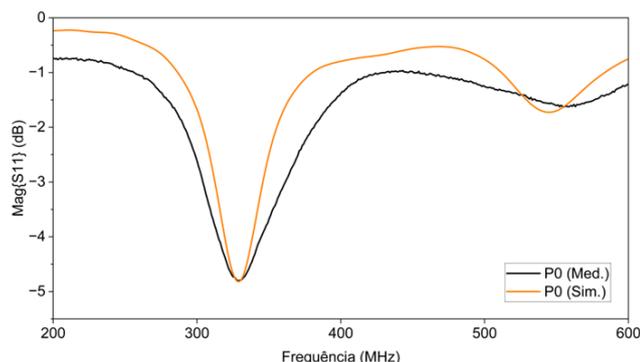
Após a definição da faixa de frequência e a resolução do sinal, tomando como referência o caso do parafuso P0 (amostra de parafuso sem falhas) para avaliar a similaridade entre os sinais medidos e simulados, conforme pode ser visto na Tabela 4, aplicou-se o método de correlação de Pearson ou coeficiente de correlação linear de Pearson, utilizada para avaliar a presença e a força de uma relação linear entre variáveis. Uma forte correlação é indicada quando o coeficiente está próximo de -1 ou 1, enquanto uma fraca correlação é indicada quando o coeficiente está próximo de 0 (HEUMANN e SHALABH, 2016); (TING, TANG, *et al.*, 2020).

Tabela 4 - Correlação entre os sinais medidos e simulados para o olhal B0

<b>Parâmetro eletromagnético</b>	<b>Mag.{S11}</b>
<b>Correlação de Pearson</b>	0.948

Pode ser observada uma forte correlação entre os sinais da magnitude do S11 medidos e simulados, permitindo usar um banco de dados híbrido usando amostras medidas e simuladas para treinar o modelo de aprendizado de máquina (TING, TANG, *et al.*, 2020). A similaridade dos sinais pode ser vista também na Figura 21, onde é apresentada a comparação entre os sinais medidos (Med.) e simulados (Sim.) para o parafuso P0 (sem falhas).

Figura 21 – Comparação da magnitude  $\{S_{11}\}$  entre os sinais medido e simulado do P0

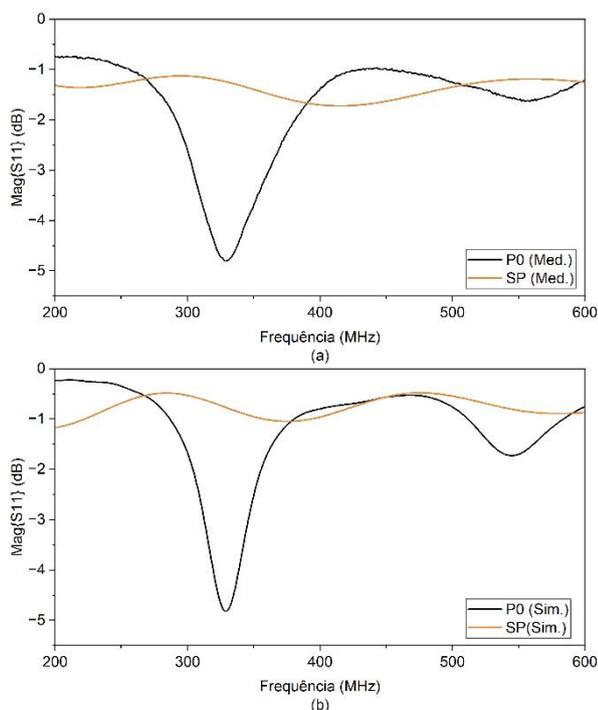


Fonte: Acervo do Autor.

A Figura 22, mostra a comparação dos sinais medido e simulado entre o P0 e o adaptador olhal sem parafuso. É possível observar que para o caso sem o parafuso (SP) o sinal não apresentou ressonâncias tanto para simulação como para medição. Assim sendo, a ressonância observada pode estar relacionada à presença do parafuso.

Figura 22 - Comparação da magnitude  $\{S_{11}\}$  entre os sinais medido e simulado P0 vs SP

(a) Medição; (b) Simulação



Fonte: Acervo do Autor.

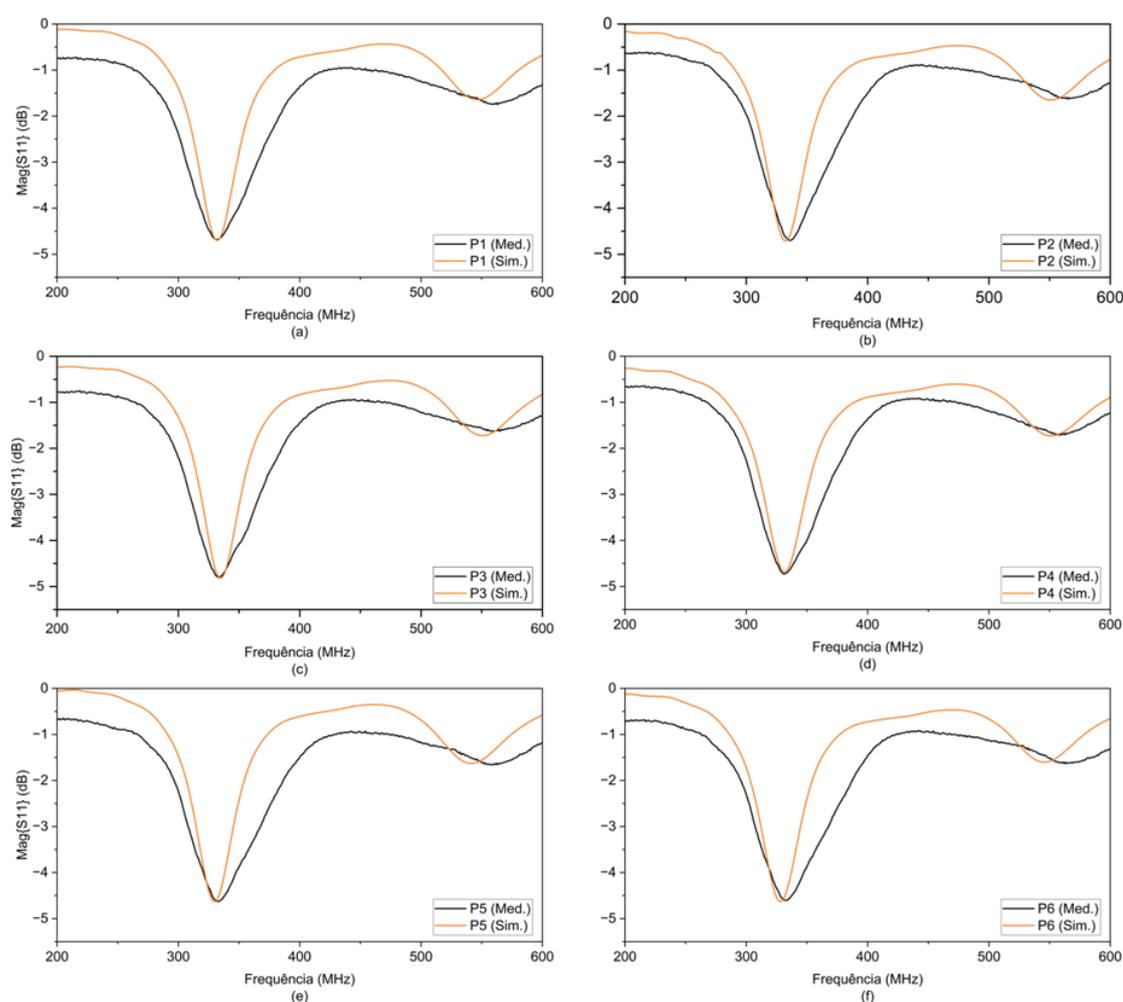
Para melhor validar o banco de dados simulados, foi também aplicado o método de correlação de Pearson das magnitudes do S11 para avaliar a similaridade entre o sinal medido e simulado dos outros 6 parafusos apresentados nesta tese.

Figura 23 onde é possível observar uma forte correlação entre os sinais medidos e simulados.

Tabela 5 - Correlação entre os sinais medidos e simulados para o olhal P0 Mag.{S11}

	Correlação de Pearson
<b>P1</b>	0,943
<b>P2</b>	0,942
<b>P3</b>	0,942
<b>P4</b>	0,938
<b>P5</b>	0,925
<b>P6</b>	0,925

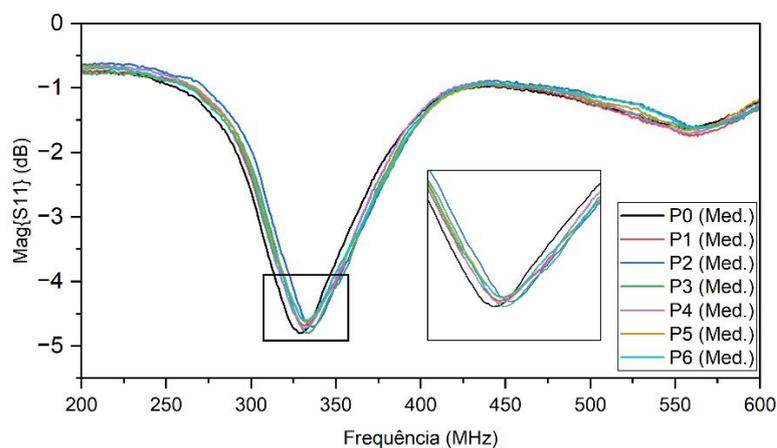
Figura 23 – Comparação da magnitude {S11} entre os parafusos medidos e simulados: (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5; (f) P6



Fonte: Acervo do Autor.

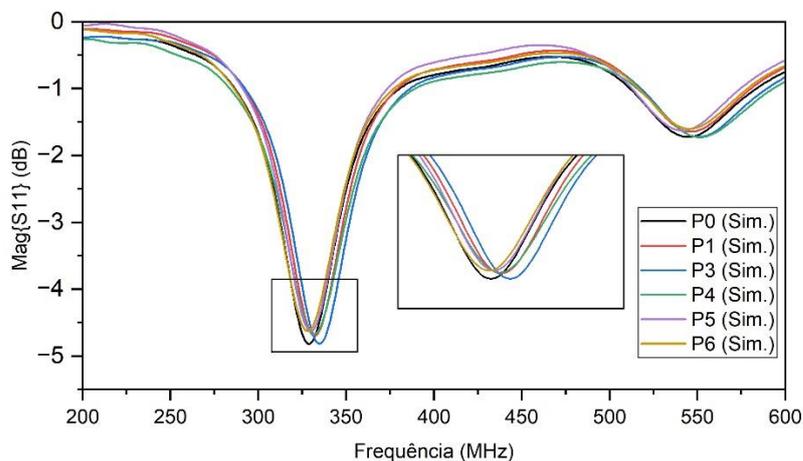
As variações entre as curvas dos parafusos normais e defeituosos são sutis e distribuídas por todo o sinal. As Figuras 24 e 25 mostram a comparação entre as magnitudes do S11 dos sinais medidos e simulados respectivamente para os parafusos P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6.

Figura 24 - Comparação da magnitude {S11} entre os todos parafusos medidos (P0, P1, P2, P3, P4, P5 E P6)



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 25 - Comparação da magnitude {S11} entre os todos parafusos simulados (P0, P1, P2, P3, P4, P5 E P6)



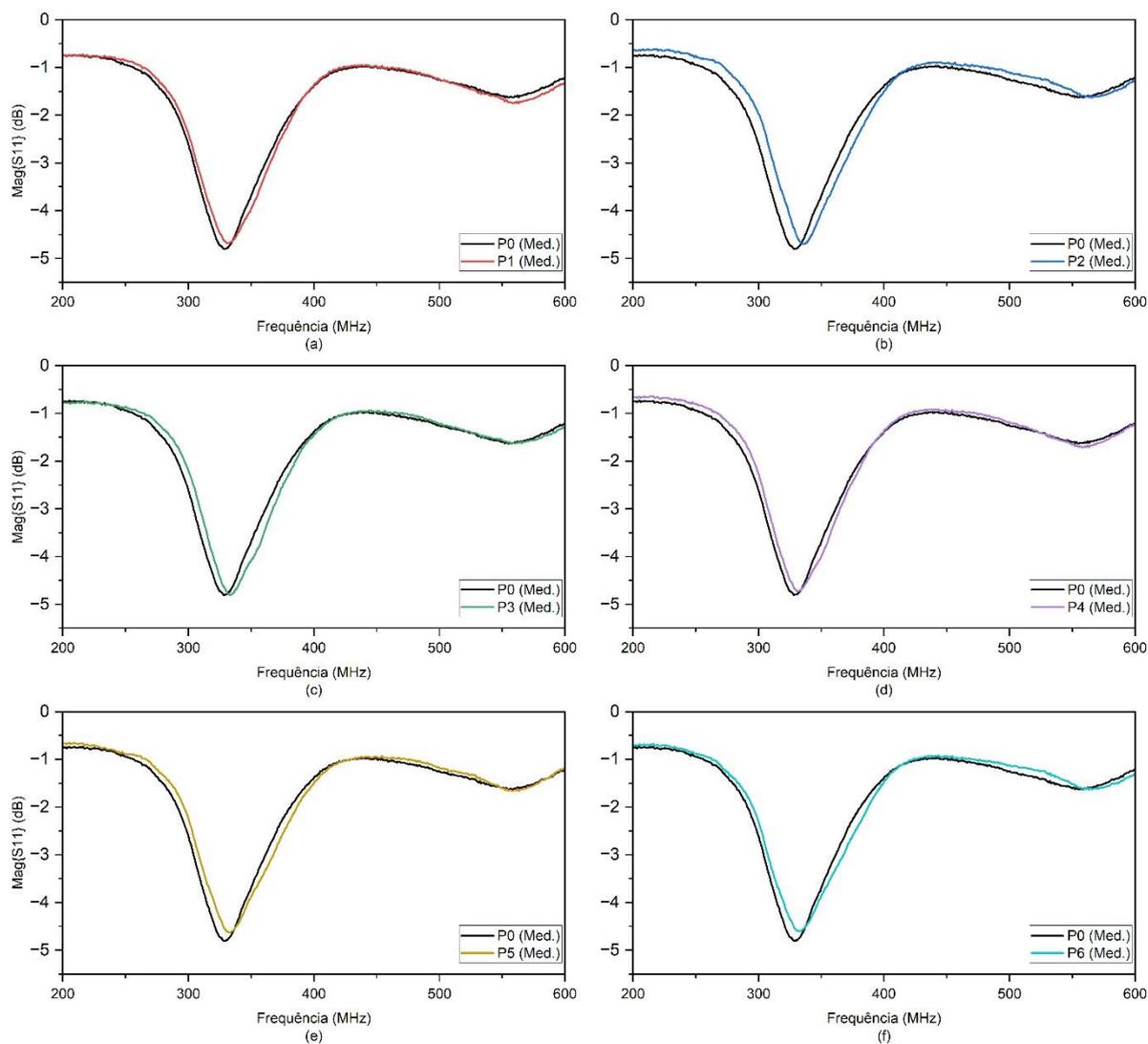
Fonte: Acervo do Autor.

As Figuras 26 e 27, apresentam as comparações entre as magnitudes do S11 medidas e simuladas respectivamente entre o parafuso P0 (sem desgaste) e os demais parafusos por pares, onde pode ser vista com mais detalhes a diferença entre

as curvas da amostra sem desgaste quando comparada com as amostras com desgaste.

Figura 26 - Comparação de magnitude  $\{S_{11}\}$  para os sinais medidos em pares:

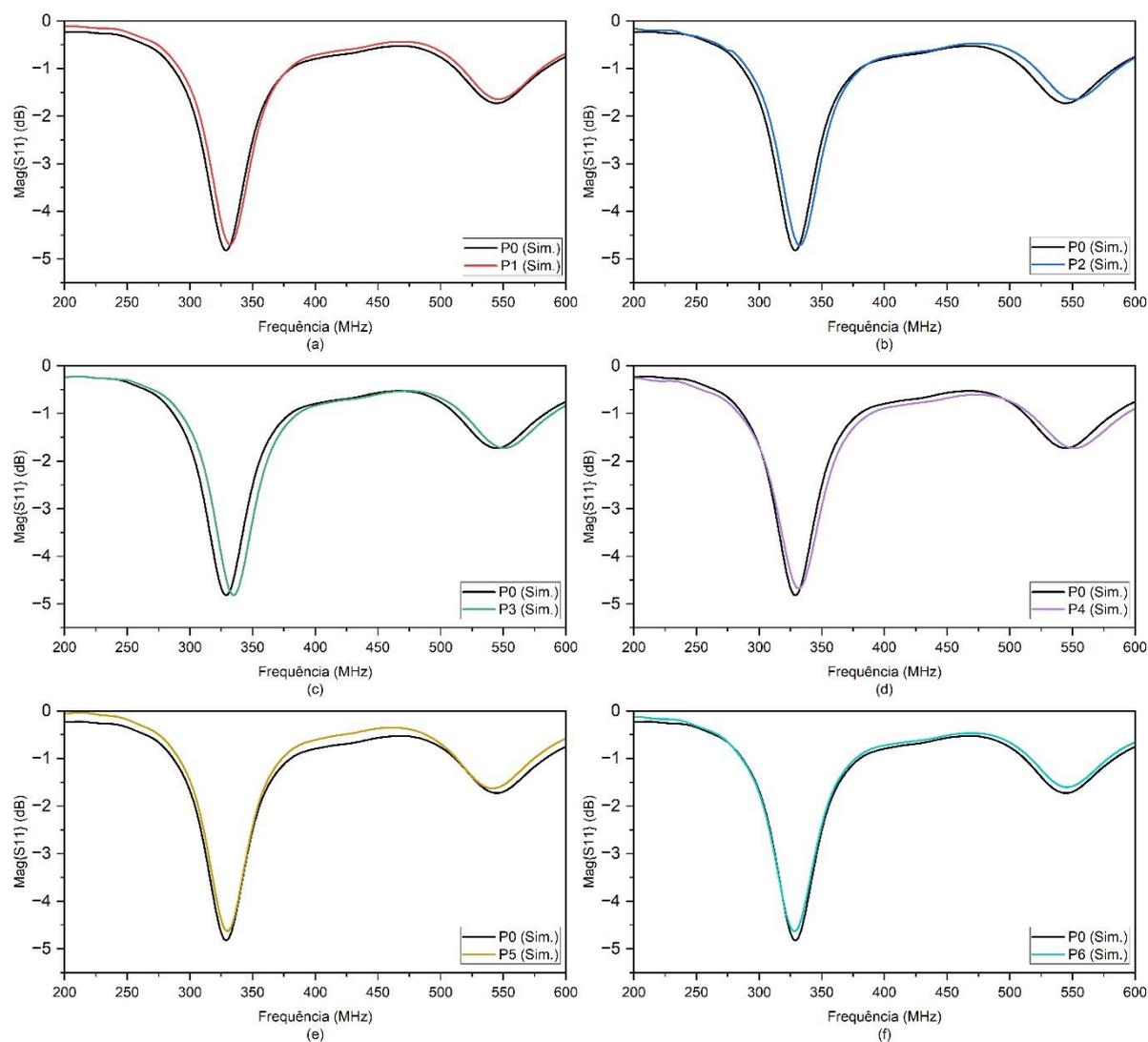
(a) P0 e P1; (b) P0 e P2; (c) P0 e P3; (d) P0 e P4; (e) P0 e P5; (f) P0 e P6



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 27 - Comparação da magnitude  $S_{11}$  para os sinais simulados em pares:

(a) P0 e P1; (b) P0 e P2; (c) P0 e P3; (d) P0 e P4; (e) P0 e P5; (f) P0 e P6



Fonte: Acervo do Autor.

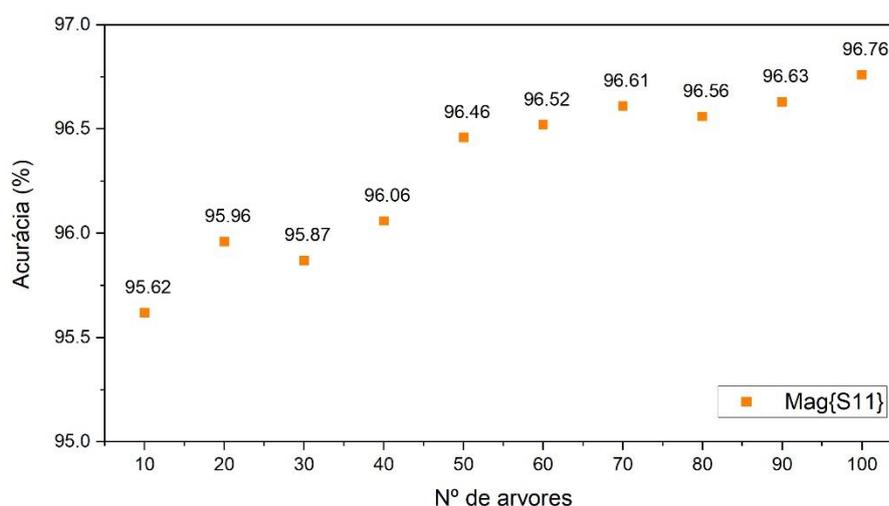
É possível observar variações a olho nu entre os sinais, permitindo a diferenciação entre parafusos normais e defeituosos. No entanto, também pode-se observar que as variações entre os sinais são sutis e não óbvias. Do mesmo modo, é inexistente encontrar uma expressão analítica para relacionar diretamente a magnitude do  $S_{11}$  para a ocorrência de falhas por um problema com tal geometria complexa. Esse aspecto sugere o uso de uma ferramenta de aprendizado de máquina para extrair os recursos de classificação adequados do sinal e identificar com precisão a presença ou ausência de falhas sem a necessidade de algum modelo físico,

encontrando uma solução de maneira adequada apenas mapeando os dados de entrada em uma classificação de saída desejada.

Assim, propõe-se uma base de dados que compreende um total de 2010 elementos, sendo 580 deles de parafusos medidos e 1430 de parafusos simulados, conforme modelos das amostras apresentadas no item 3.2. A utilização de um banco de dados híbrido tem a vantagem de fornecer um maior número de exemplos para melhorar a generalização do classificador por meio de amostras simuladas e de mais fácil obtenção. Ao mesmo tempo, as amostras medidas inserem no classificador características, como ruídos, interferências causadas por acoplamentos físicos entre a amostra e o equipamento de medição, variações presentes no próprio processo de medição que no modelo de simulação não são possíveis de obter.

O sistema de detecção é composto por um classificador binário baseado no algoritmo floresta aleatória, composto por 100 árvores de decisão (BREIMAN, 2001); (BARBOSA, 2020). A escolha do número de árvores deu-se a partir de uma simulação que variou de 10 a 100 árvores, onde é apresentado uma variação entre o número de árvores e a acurácia relacionada a cada número, como as variações dos valores das acurácias podem ser vistas na Figura 28 e na Tabela 6, com seus respectivos tempos de simulação. Assim, esse hiperparâmetro foi definido de forma a equilibrar a precisão e o tempo de processamento do classificador.

Figura 28 – Número de árvores vs Acurácia



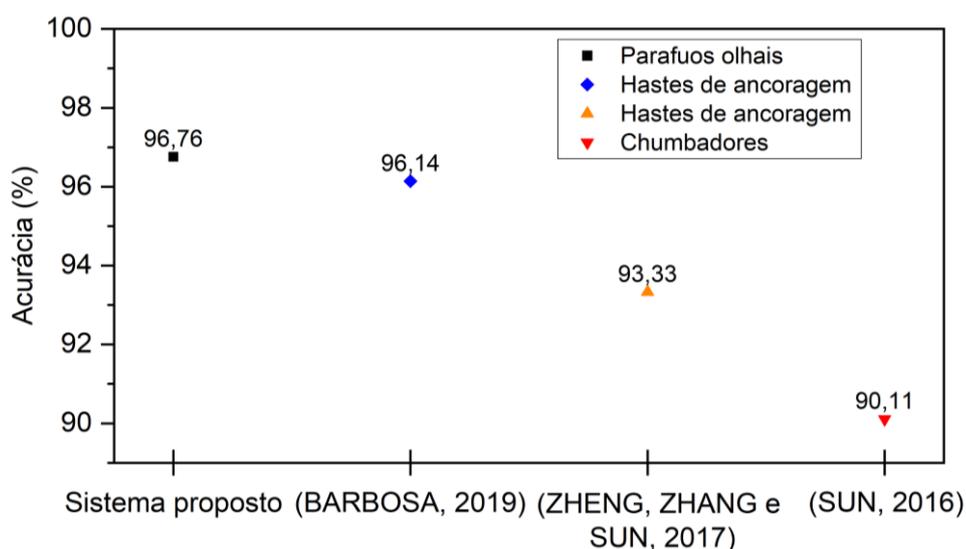
Fonte: Acervo do Autor.

Tabela 6 – Relação dos nº de árvores com a acurácia e tempo de processamento

Nº de árvores	Acurácia (%)	Tempo de processamento (s)
10	95,62	63,51
20	95,96	75,45
30	95,87	84,49
40	96,06	93,39
50	96,46	102,29
60	96,52	112,82
70	96,61	120,26
80	96,66	127,41
90	96,69	138,54
100	96,76	145,26

A Figura 29 apresenta graficamente os valores de precisão alcançados pelo sistema proposto, além de 3 resultados base de outras metodologias semelhantes de detecção de falhas baseadas em aprendizado de máquina aplicáveis a estruturas do tipo olhal. O sistema proposto em (BARBOSA, 2019) obteve uma precisão de 96,14% para a detecção de faltas em hastes de ancoragem de linhas de transmissão de energia através da análise da magnitude do parâmetro S11 por um algoritmo floresta aleatória. Em (ZHENG, ZHANG e SUN, 2017), foi obtida uma precisão de 93,33% no reconhecimento da tarefa de dano de hastes de ancoragem por um modelo baseado em PSO-SVM. A abordagem apresentada em (SUN, 2016) obteve uma precisão de 90,11% para uma classificação de chumbadores baseada na curtose espectral e no algoritmo de agrupamento K-means. É possível observar que, o sistema proposto alcançou valores de precisão superiores às linhas de base.

Figura 29 - Desempenho comparativo do sistema de detecção de falhas proposto



Fonte: Acervo do Autor.

É significativo destacar que a acurácia é uma medida geral do desempenho do modelo, porém pode não fornecer detalhes específicos sobre falsos positivos ou falsos negativos. Por conseguinte, é importante considerar outras métricas, como precisão, sensibilidade e F1-score, para uma avaliação íntegra do modelo. Nesse sentido, foram analisados esses parâmetros a fim de avaliar o desempenho do modelo de classificação proposto. Os resultados dessas métricas são apresentados na Tabela 7. Ao comparar esses resultados com a acurácia de 96,76%, conclui-se que o desempenho geral do modelo é satisfatório. A precisão, a sensibilidade e o F1-score estão próximas ou acima da acurácia, indicando que o modelo é capaz de classificar corretamente a maioria dos casos.

Tabela 7 – Parâmetros de desempenho para o modelo de classificação

	Acurácia (%)	Precisão (%)	Sensibilidade (%)	F1 (%)
Desempenho	96,76	99,94	96,03	97,90

## 4.1 FILTRO DO TIPO RESSOADOR

Os valores da magnitude de  $S_{11}$  foram de aproximadamente -5 dB, tanto os resultados simulados quanto as medições realizadas na faixa de frequência de interesse. As respostas obtidas para o adaptador olhal precisam apresentar melhor ressonância. Baseando-se em (NOVO, MELO, *et al.*, 2014), onde foi proposto um acoplamento dos sinais de tensão aplicados à entrada do experimento, evitando ou mitigando as reflexões neste ponto, foram utilizados dois tipos de circuitos, um stub simples e um casador por trecho de linha para uma frequência de ressonância de 3,7 GHz em hastes de ancoragem. Para a presente tese, foi adotado um circuito acoplador baseado em filtro ressonante passa-banda em microfita, do tipo ressoador quadrado, de malha aberta (SILVA, 2020), com objetivo de reduzir as dimensões do filtro devido à baixa frequência de ressonância. Essa configuração de ressoador em microfita pode apresentar uma redução acima de 50% nas dimensões quando comparado a outros tipos de filtros e até mesmo ressoadores (HONG e LANCASTER, 1997). Dessa forma será possível que os sinais de tensão tendam a ser transmitidos ao experimento quase em sua totalidade, e esta condição amplia a seletividade do sistema de detecção de corrosão nos parafusos olhais e com um circuito o mais compacto possível. Para essa proposta serão utilizados apenas sinais de simulação.

### 4.1.1 Projeto

Em um projeto de filtro, uma vez estabelecida a função de transferência, pode-se obter a matriz de acoplamento e os fatores de qualidade externos, por meio da aplicação de uma síntese de procedimento (SILVA, 2020).

A função de transferência de uma rede de filtros de duas portas é uma descrição matemática das características de resposta da rede, ou seja, uma expressão matemática em termos dos parâmetros de espalhamento ( $S_{21}$ ). Uma função de transferência para uma rede de filtros passivos sem perdas é definida como (HONG e LANCASTER, 1997):

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \delta^2 F_n^2(j\omega)} \quad (37)$$

Onde  $\delta$  é uma constante de *ripple* ou constante de ondulação,  $F_n$  uma função característica (normalmente um polinômio) e  $\omega$  é a frequência do filtro, dada por radianos por segundo (rad/s).

Para uma rede linear e invariante no tempo, a função transferência pode ser descrita como uma função racional dada por (HONG e LANCASTER, 1997):

$$S_{21}(p) = \frac{N(p)}{D(p)} \quad (38)$$

Onde  $N(p)$  e  $D(p)$  são polinômios complexos com frequência  $\omega$ , onde  $p = \sigma + j\omega$ . Para rede passiva e sem perdas,  $\sigma = 0$ . Assim,  $p = j\omega$ , para encontrar uma função transferência realizável que forneça uma resposta característica aproximada da resposta requerida, pode-se utilizar a Equação (39).

Para uma função transferência na forma da equação, a perda por inserção do filtro é dada por:

$$L_A = -20 \log (|S_{21}|) \quad (39)$$

E sua resposta em fase pode ser expressa por:

$$\phi_{21}(\omega) = |\text{Arg}[S_{21}]| \quad (40)$$

Onde,  $\phi_{21}(\omega)$  é dado em radianos.

Após a função transferência do filtro, o próximo passo é a definição da matriz de acoplamento para que seja possível estabelecer a relação entre os valores obtidos dessa e as dimensões físicas dos ressoadores acoplados (HONG e LANCASTER, 1997). Os coeficientes de acoplamento entre ressoadores de RF/micro-ondas acoplados podem ter estruturas diferentes e frequências de ressonância distintas. A matriz de acoplamento  $[M]$ , bem como os fatores de qualidade externos,  $Q$  podem ser calculados a partir das expressões (41) e (42), respectivamente (HONG e , 2001).

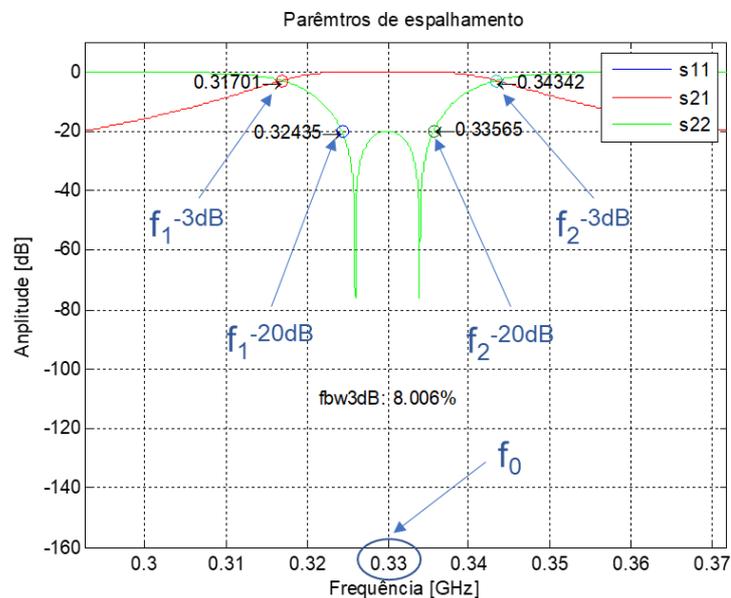
$$M = \frac{FBW}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (41)$$

$$Q = \frac{g_1}{FBW} \quad (42)$$

Onde  $g_1$  e  $g_2$ , são os elementos para filtros de protótipo passa-baixa Chebyshev. A definição da largura de banda a da frequência do filtro (FBW) é definida pela expressão (43), onde  $f_0 = 330 \text{ MHz}$ , que corresponde a frequência de ressonância relacionada ao parafuso olhal. A Figura 30, apresenta uma curva característica para os parâmetros S relacionado ao filtro de dois polos para auxiliar nas definições das frequências  $f_1$  e  $f_2$ . Para o cálculo da FBW, foi adotada a perda mínima de retorno na banda passante que corresponde a  $-20 \text{ dB}$  ( $L_R$ ) para viabilizar o uso da Tabela 8 (LANCASTE e HONG, 2001), onde foi encontrado o valor de 3,4217%.

$$FBW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (43)$$

Figura 30 – Curvas ideais para definição das frequências de projeto



Fonte: Acervo do Autor.

Os valores dos elementos do filtro protótipo passa-baixa, normalizados para realizar a impedância de fonte  $g_0 = 1$  e uma frequência de corte  $\Omega_c = 1$ , são por conseguinte transformados em elementos L-C rejeita faixa para as frequências de cortes e impedância de fonte desejada para filtros microstrip. Os valores para  $g_1$  e  $g_2$

foram obtidos em (LANCASTE e HONG, 2001) [Tabela 3.2, pp-43] a partir do número de polos (n). Os valores usados no projeto estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de elemento para filtros de protótipo passa-baixa Chebyshev  
( $L_R = -20\text{dB}$ )

N	g1	g2	g3
2	0.6648	0.5445	1.221

Fonte: Lancaster & Hong, 2001)

Após obtenção da matriz de acoplamento, o próximo passo é a escolha da placa a ser utilizada pela definição de seus principais parâmetros: permissividade relativa do dielétrico, largura do substrato e tangente de perdas. Neste projeto foi preconcebido um filtro para 330 MHz com portas em 50 Ohms com linhas simétricas utilizando FR-4 ( $\epsilon_r = 4.4$ ,  $d = 1.6\text{mm}$  e  $\theta = 0.021$ ) como substrato. Depois disso, devem ser seguidas as seguintes etapas de projeto:

Etapa 1: A primeira dimensão a ser avaliada é  $W_{LT}$  (linha de alimentação do circuito) a qual deve ter largura compatível com os conectores utilizados nas portas do filtro de modo a evitar descasamento. E à largura  $W$  deve ser seguido um número próximo ao  $W_{LT}$ . Neste caso, os valores para esses dois parâmetros são iguais. Ver Figura 31.

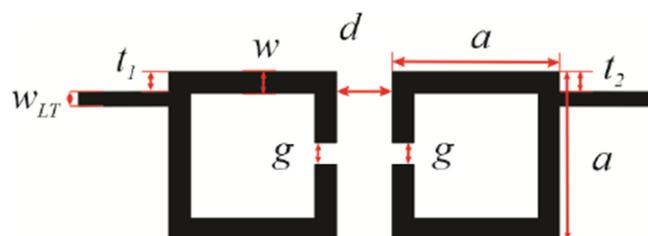
Etapa 2: O comprimento do lado da malha ( $a$ ), pode ser calculado de acordo com a fórmula (44) apresentado por (LANCASTE e HONG, 2001).

$$a = \frac{l + g}{4} - \frac{\pi \cdot w}{2} + 2 \cdot w \quad (44)$$

Onde  $l$  é o comprimento físico de uma linha correspondente a  $\lambda/2$  na frequência central de operação do filtro.

Etapa 3: A largura das fendas ( $g$ ) dos ressoadores sem contato com as linhas de transmissão pode ser estimada observando o pico de ressonância da resposta em frequência do circuito. Para isso, deve-se variar  $g$  até que a ressonância ocorra na mesma frequência de ressonância do circuito da Figura 31.

Figura 31 – Formato canônico de um circuito ressonador

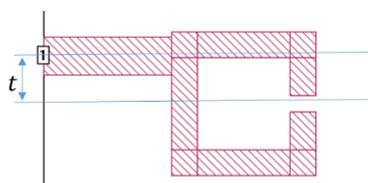


Fonte: Adaptado de (SILVA, 2020)

Etapa 4: Os melhores valores para  $t_1$  e  $t_2$  são tais que quando o circuito da Figura 32 é simulado, seu parâmetro de reflexão tem uma resposta que faz a expressão (45) gerar valores próximos dos fatores de qualidade externos já calculados. Assim, é possível estimar seus valores já que o valor de  $a$  e  $w_{LT}$  são conhecidos. Para o projeto em questão, os valores adotados serão iguais.

$$Q = t = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}} \quad (45)$$

Figura 32 – Relação para o valor de  $t$



Fonte: Acervo do autor

Etapa 5: Os melhores valores para  $d$ , são próximos de  $[M]$ , assim para uma primeira aproximação admite-se o próprio valor de  $[M]$ .

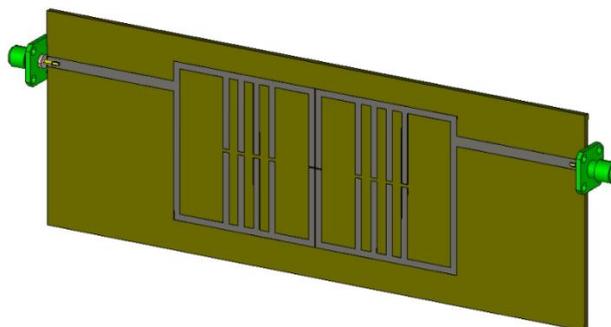
Após obter todas as dimensões físicas do filtro, é imprescindível verificar sua conformidade geométrica. Caso sejam identificados valores que estejam fora da faixa desejada, é possível fazer ajustes, como a alteração da largura dos ressoadores ( $w$ ), a largura das fendas ( $g$ ) ou mesmo a troca do tipo de substrato, com vistas à obtenção de novos valores para as demais dimensões do filtro. Uma vez alcançada a geometria final adequada, é possível prosseguir com a simulação do filtro e realizar ajustes posteriores, se necessário. Os valores iniciais de projeto encontram-se descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões iniciais de projeto

Parâmetros	d	g1	g2	t1	t2	a
Dimensões (mm)	0.2	1	1	4.9	8.2	118,13

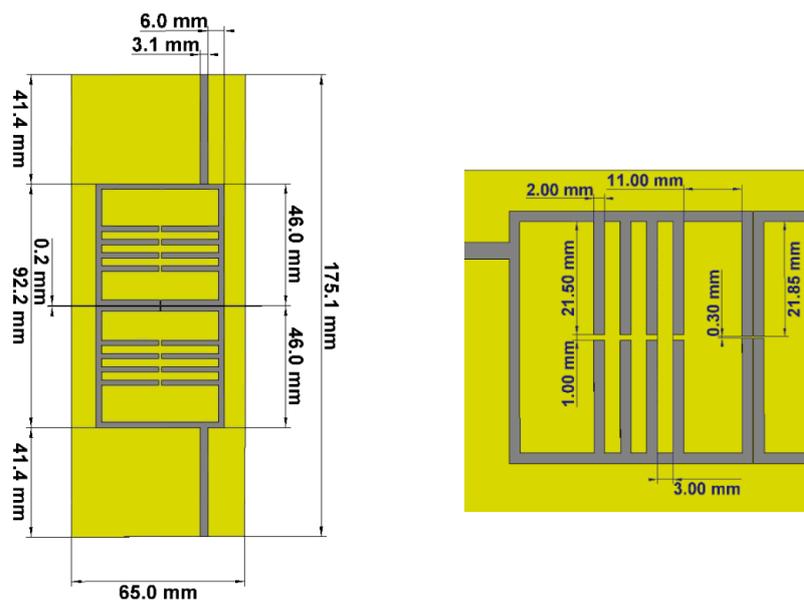
Para chegar nas dimensões finais do filtro utilizou-se um otimizador do software de simulação eletromagnética variando os parâmetros iniciais, com vistas a uma melhor sensibilidade a partir dos valores obtidos. A Figura 33 apresenta a configuração final do circuito, em que foram acrescentados stubs com finalidade de aumentar o comprimento elétrico do filtro, conseqüentemente diminuindo as dimensões dele e para aproximar a frequência de interesse, diferente do modelo canônico apresentado na Figura 31. As dimensões e espaçamentos dos stubs foram obtidas por simulações com auxílio de otimizador. As dimensões finais do filtro podem ser conferidas na Figura 34.

Figura 33 - Circuito em microfita do tipo ressoador quadrado de malha aberta proposto



Fonte: Acervo do Autor.

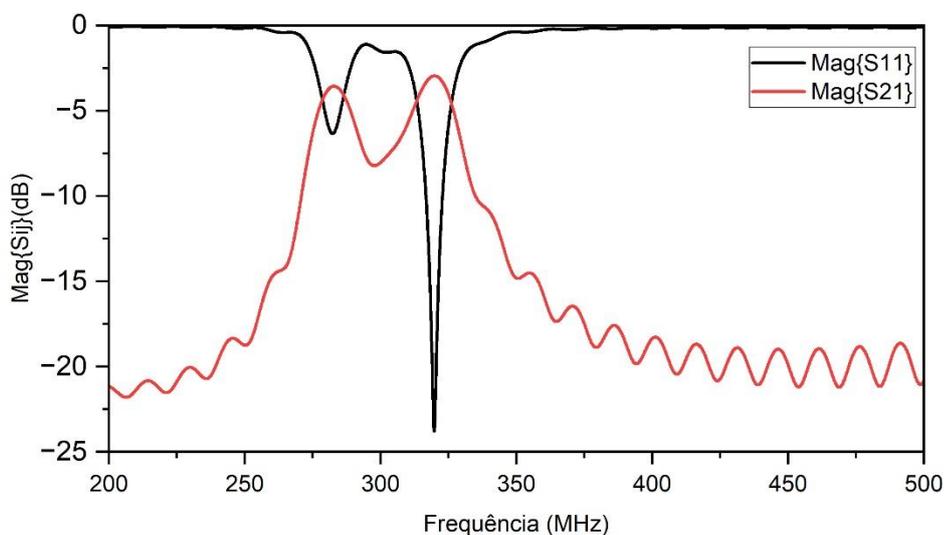
Figura 34 – Dimensões finais para o Circuito projetado



Fonte: Acervo do Autor.

Os sinais obtidos para a magnitude do S11 e S21 referentes ao filtro projetado são amostrados em  $n = 1001$  pontos igualmente espaçados em uma faixa de frequência de 200 a 500 MHz, que permite à observar a ressonância relacionada ao filtro. A Figura 35, apresenta as magnitudes relacionadas ao S11 e S21 simuladas do filtro projetado (ver Figura 33). É possível observar duas ressonâncias, uma em 282,5 MHz com magnitude de -6,34 dB e a outra em 320 MHz, com magnitude de -23,90 dB.

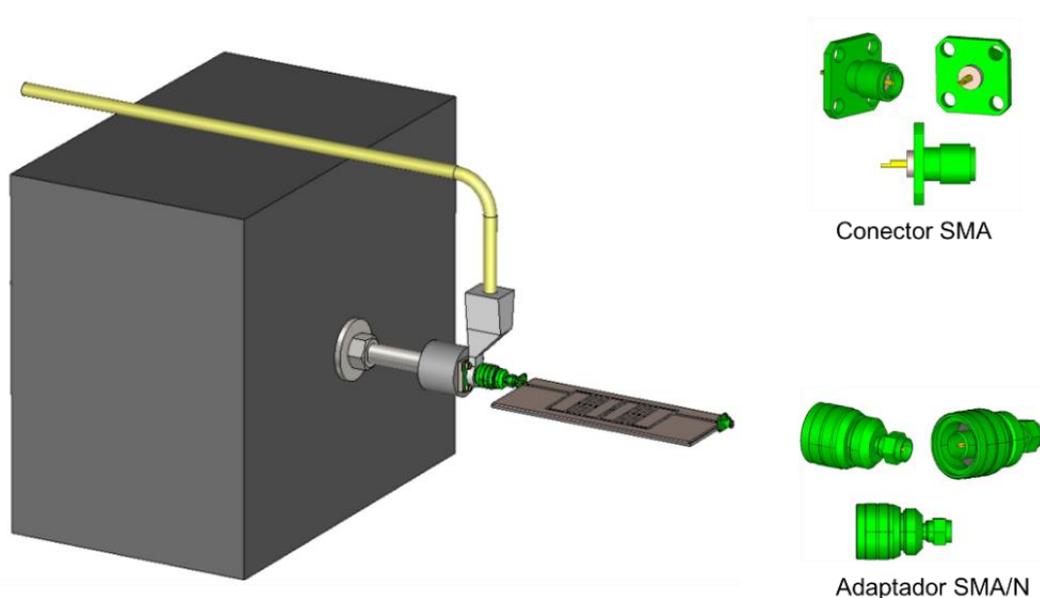
Figura 35 - Resposta em frequência do filtro projetado



Fonte: Acervo do Autor.

Após obter a configuração do filtro com operação na faixa de frequência de interesse, o passo seguinte foi acoplar o filtro com modelo do sistema proposto nesta tese, com intuito de estudar os sinais obtidos. Com o propósito de aproximar ao máximo o modelo e simulação do cenário real, foram também projetados os conectores SMA e o adaptador SMA/N; todos com 50 ohms para serem inseridos no modelo de simulação, como pode ser constatado na Figura 36. O adaptador tem função de interligar a saída do filtro com o conector N do adaptador olhal, onde o conector SMA foi usado nas duas extremidades do filtro.

Figura 36 - Sistema proposto com o circuito acoplador na entrada do sistema

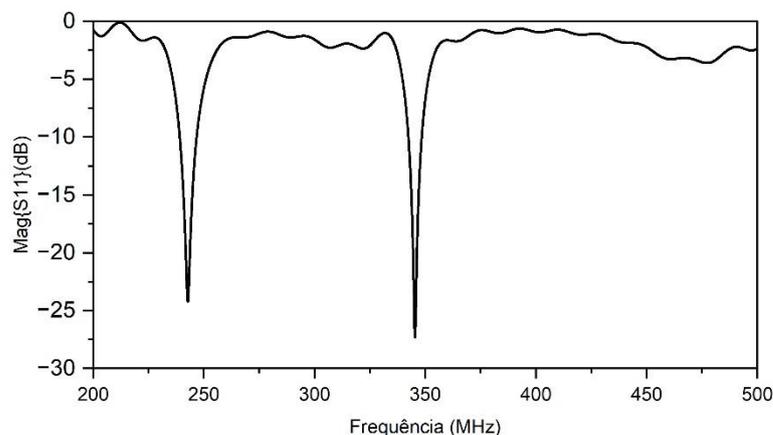


Fonte: Acervo do Autor.

A Figura 37 apresenta a magnitude do S11 do sistema simulado utilizando o filtro acoplador na entrada com o parafuso P0 (sem falhas). É possível observar que a resposta do filtro permaneceu com as mesmas características, porém houve deslocamentos das frequências de ressonância, a primeira de 40 MHz (242,5 MHz com -24,32 dB de magnitude) e a segunda 25 MHz (345,5 MHz com -27,42 dB de magnitude). Esse comportamento decorre da sobreposição das curvas do modelo com filtro, visto que a frequência relacionada ao parafuso também foi de 330 MHz. Outro ponto importante de interesse neste teste, é que o valor na frequência de interesse estabelecido, magnitude do S11, ficou satisfatoriamente abaixo de -27 dB, demonstrando a diminuição das perdas devido o descasamento de impedância do

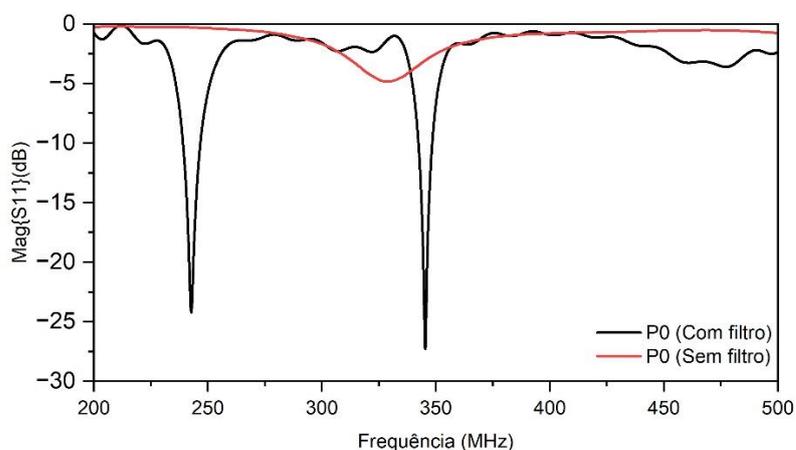
modelo sem o filtro. Isso pode ser comprovado na Figura 38, que mostra sinais simulados entre o modelo sem o circuito e com o circuito acoplador.

Figura 37 - Magnitudes do S11 do sistema com o filtro



Fonte: Acervo do Autor.

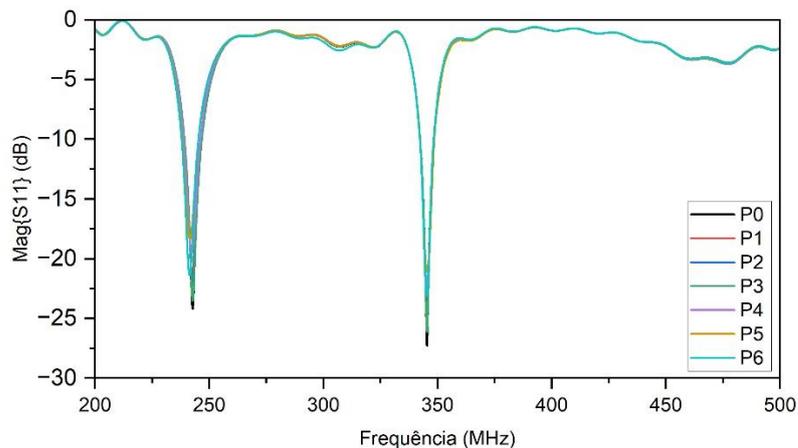
Figura 38 - Comparação entre as magnitudes do S11 entre o sistema com e sem o filtro acoplador



Fonte: Acervo do Autor.

Com intuito de verificar a sensibilidade do modelo com o filtro acoplador para diferentes tipos com desgaste, a Figura 39 mostra a comparação entre as magnitudes do S11 dos sinais simulados respectivamente para os parafusos P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6.

Figura 39 - Comparação entre as magnitudes entre as amostras

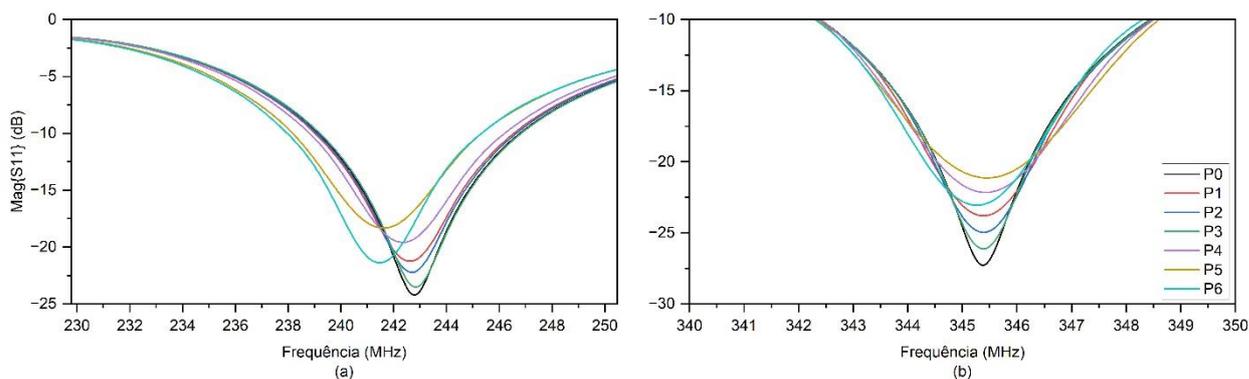


Fonte: Acervo do Autor.

É possível observar que houve variações significativas entre os sinais nas frequências de ressonâncias. A Figura 40 exibe o detalhamento das frequências de ressonância de interesse e a Tabela 10, apresenta os valores das magnitudes do S11 e as frequências de ressonância para cada parafuso.

Figura 40 – Detalhe da Magnitude de S11 entre a comparação entre nas frequências de interesse

(a) Primeira frequência; (b) Segunda frequência



Fonte: Acervo do Autor.

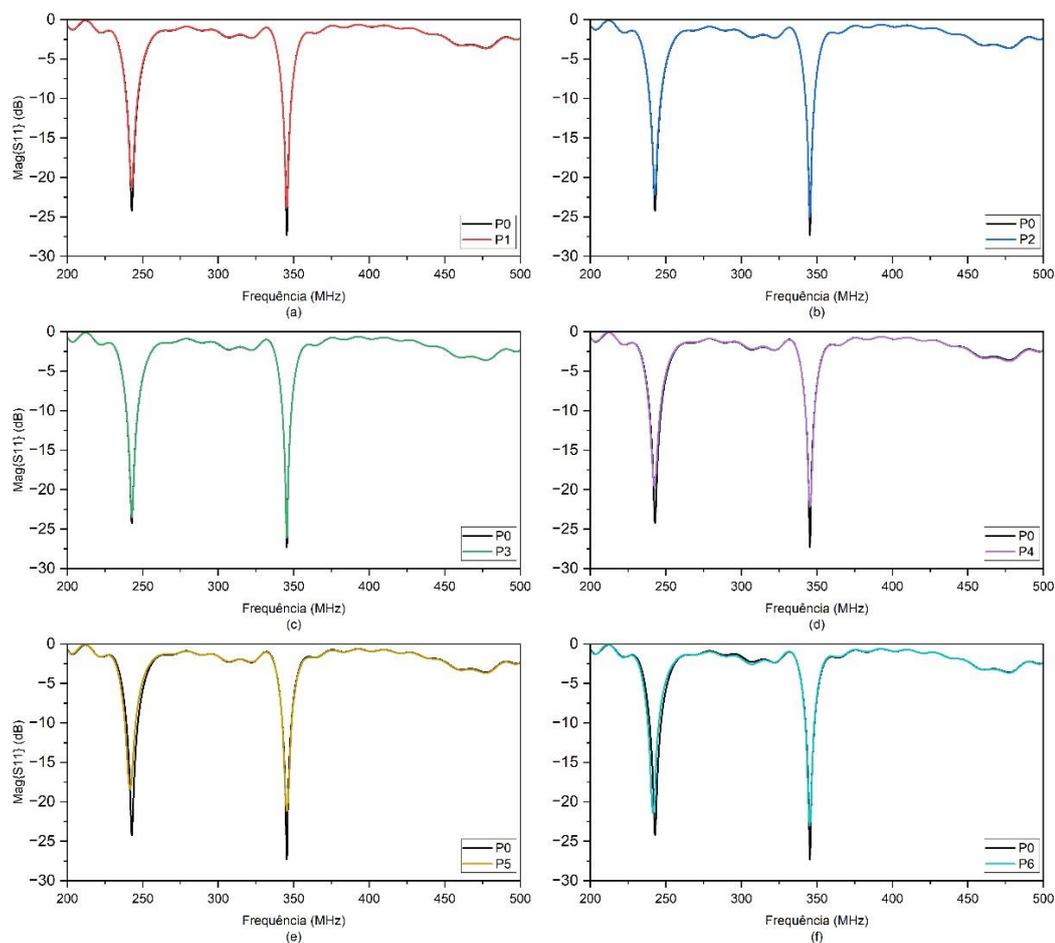
Tabela 10 – Valores das magnitudes do S11 e as frequências de ressonância para os parafusos P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6

Parafusos	Frequência 1 (MHz)	Mag{S11} (dB)	Frequência 2 (MHz)	Mag{S11} (dB)
P0	242,5	-24,32	345,5	-27,42
P1	242,6	-21,28	345,3	-23,87
P2	242,7	-22,26	345,3	-25,03
P3	242,8	-23,58	345,3	-26,19
P4	242,3	-19,64	345,4	-22,20
P5	241,6	-18,04	345,6	-21,14
P6	241,5	-24,39	345,2	-23,06

A Figura 41, apresenta uma comparação por pares entre o parafuso P0 (sem desgaste) e os demais parafusos com desgaste, para melhor apresentar as diferenças entre os sinais.

Figura 41 - Comparação das magnitudes {S11} dos em pares:

(a) P0 e P1; (b) P0 e P2; (c) P0 e P3; (d) P0 e P4; (e) P0 e P5; (f) P0 e P6



Fonte: Acervo do Autor.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho de tese centralizou-se no desenvolvimento de método de detecção de falhas estruturais em parafusos olhais de ancoragem, causadas principalmente por efeitos de corrosão. Eles são utilizados na ancoragem de isoladores elétricos e linhas em transmissão de energia elétrica. Tais desgastes podem provocar graves acidentes e interrupção do fornecimento de energia. A contribuição do sistema proposto consiste em detectar tais falhas no estágio inicial. Para isso a menor falha proposta foi de 5,0 mm comprimento e profundidade de 0,1 mm. Assim, é possível analisar a condição mecânica do parafuso olhal sem a necessidade da desmontagem do sistema de ancoragem e em possíveis casos a não desenergização do sistema de distribuição de energia elétrica para inspecionar os olhais.

O sistema proposto é baseado na aquisição da magnitude do S11 relacionado à onda refletida de alta frequência que se propaga na estrutura do parafuso, possibilitando a extração de características dos sinais que permitem a identificação de parafusos normais e defeituosos. Essa, por sua vez, foi realizada automaticamente por um algoritmo de aprendizado de máquina.

Para atingir o objetivo da metodologia adotada, foi imprescindível, portanto, desenvolver um meio de conexão entre o parafuso olhal que se deseja medir o nível do desgaste e o instrumento de medição, neste caso, o analisador de redes vetorial. Em vista disso, foi necessário desenvolver um adaptador que permitisse enviar e receber os sinais entre o instrumento de medição (analisador de redes) e o experimento (parafuso olhal). Desta forma, o primeiro passo foi a elaboração do projeto do adaptador que permitisse a sua conexão mecânica ao parafuso e garantisse um bom desempenho elétrico para as faixas de frequência de interesse, dentro das características de montagem do experimento.

O adaptador foi desenvolvido a partir de simulações utilizando um software de simulação eletromagnética e em seguida realizou-se sua fabricação. Além disso, as amostras foram consideradas com e sem desgaste para ambos os senários (simulação/medição). Testes e medições foram realizados sobre o conector e os resultados comparados com as respostas das simulações computacionais para validação, apresentando concordância entre as respostas.

Foi observado que os valores das magnitudes de  $S_{11}$  ocorreram em torno de -5 dB, tanto para os resultados simulados quanto as medições realizadas na faixa de frequência de interesse. Este resultado pode ser obtido devido o descasamento entre o parafuso olhal e o adaptador proposto. Desde modo, foi proposto um circuito acoplador baseado em filtro ressonante passa-banda em microfita do tipo ressoador quadrado de malha aberta possibilitando uma melhor resposta do sistema. Neste caso o sistema passou a apresentar -24,32 dB de magnitude na faixa de frequência de interesse.

Devido o alto grau de dificuldade para interpretação dos resultados, foi proposto um sistema de diagnóstico utilizando ferramenta de aprendizado de máquina, utilizando classificadores baseados no algoritmo floresta aleatória, treinado para a tarefa de detecção de falhas em olhais e por meio da apresentação de exemplos de um banco de dados formado por medições realizadas em parafusos físicos com diferentes configurações de falha. A saída deste sistema é composta por duas classes: com e sem defeito, quanto ao estado mecânico/estrutural dos olhais avaliados.

Desta forma obteve-se uma acurácia média para a magnitude de  $S_{11}$  de 96,76%. Com tal confiabilidade, é possível aplicar o sistema proposto para detectar a presença de falhas em olhais com segurança, dispensando o desmonte do sistema de ancoragem. O sistema proposto alcançou valores de precisão superiores quando comparado a outros trabalhos voltados à detecção de falhas em estruturas metálicas.

O sistema proposto em (BARBOSA, DE MEDEIROS, *et al.*, 2019) obteve precisão de 96,14% para a detecção de faltas em hastes de ancoragem de linhas de transmissão de energia através da análise da magnitude do parâmetro  $S_{11}$  por um algoritmo floresta aleatória. Em (ZHENG, ZHANG e SUN, 2017) foi obtida uma precisão de 93,33% no reconhecimento da tarefa de dano de hastes de ancoragem por um modelo baseado em PSO-SVM e a abordagem apresentada por (SUN, 2016) obteve uma precisão de 90,11% para classificação de chumbadores baseada na curtose espectral e no algoritmo de agrupamento *K-means*.

É valioso destacar que esse sistema de diagnóstico foi aplicado somente ao sistema de medição sem a presença do filtro acoplador.

À vista disso, a adoção do sistema de detecção deve reduzir os gastos financeiros e de tempo, substituindo as atuais rotinas de manutenção corretiva e

preventiva por este novo modelo preditivo para as equipes de manutenção das distribuidoras de energia elétrica.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, algumas atividades podem ser realizadas visando a melhoria do conector no sistema de medição:

- a) A expansão do banco de dados por meio de medições de campo;
- b) Incorporação de todo o sistema como uma maleta portátil e a implementação de uma HMI intuitiva para facilitar a aquisição;
- c) Apresentar um sistema de teste de *overfit* a partir das acurácias do conjunto de treinamento em relação ao conjunto de teste;
- d) Processamento e análise de dados em campo por equipes de manutenção;
- e) Aplicar o sistema de classificação utilizado nesta tese no com o acoplador de sinais na estrada do sistema;
- f) Implementação física do sistema de acoplamento de sinais, possibilitando a análise de sinais medidos para incorporação da metodologia na fase de medições em campo.

## 5.2 CONTRIBUIÇÕES E PRODUÇÃO CIENTÍFICA

### 5.2.1 ARTIGOS RELACIONADOS A ESTE TRABALHO

1. **H. V. H. Silva Filho**, A. Gomes Barboza, L.M. da Silva, R.G. M. dos Santos, M. T. de Melo, L. R. G. S. Lourenço Novo, D. C. P. Barbosa e Vinícius E. Tarragô. Bandpass Filter by a Microstrip Resonator for Fault Detection on Eyebolts Applied in Power Substations. Publicado em 08 de janeiro de 2024.  
**H. V. H. Silva Filho**, R.G. M. dos Santos, Douglas C. P. Barbosa, M. T. de Melo, Lauro R. G. S. Lourenço Novo. Detection of eyebolt faults using a random forest ensemble model over multiple measured high-frequency electromagnetic parameters. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Publicado em 06 de agosto de 2023.
2. **Filho, H. V. H. Silva**, S. Coutinho, Marcelo; T. de Melo, M.; M. F. de Oliveira, Vinícius E. Tarragô; R. G. S. Lourenco Novo, Lauro; M. da Silva, L.; N. Fraga. Design of a connector for fault detection in eye bolts used as insulator anchorages; IOP Publishing Ltd, Engineering Research Express, Volume 2, Número 4. Publicado em 24 de novembro de 2020.
3. **Silva Filho, H. V. H.**, Barbosa, D. C. P., Coutinho, M. S., de Melo, M. T., dos Santos, R. G. M., Llamas-Garro, I. Reliable structural failure detection in eye bolts using reflectometry signals. European Microwave Week (EuMW 2020), 2020, (Online).

### 5.2.2 COLABORAÇÕES

1. Coutinho, M. S.; C.P. do N. Silva; Oliveira, M. R. T.; **Silva Filho, H. V. H.**; MACHADO, G.G. ; de Melo, M. T. . Planar sensor for powder grain characterisation. IET Microwaves Antennas & Propagation, v. 12, p. 1666-1670, 2018.
2. Pinheiro, G. J.; oliveira, M. R. T.; **Silva Filho, H. V. H.**; de Melo, M. T. Four-bit instantaneous frequency measurement systems based on frequency selective surfaces. Microwave and optical technology letters, v. 61, p. 68-72, 2018.

3. Leonardo Silva, **Silva Filho, H. V. H.**, Pedro Filho and Marcos Melo A new technique to cancel additional phase shifts of two-port resonant devices, MOMAG 2020.
4. **Silva Filho, H. V. H.**; Oliveira, M. R. T.; M. S. Coutinho; C.P. do N. Silva; de Melo, M. T.; Ignacio Llamas-Garro; OLIVEIRA, E. M. F. Equivalent Circuit Method for Analysis of Modified Jerusalem Cross FSS. In: <http://kism.or.kr/ISITC2018>, 2018, Jeonju. Proceedings of the Intern Symp on InformTech Converg 2018, 2018. v. 1.
5. Pinheiro, G. J.; **Silva Filho, H. V. H.**; Oliveira, M. R. T. ; C.P. do N. Silva ; de Melo, M. T. ; Ignacio Llamas-Garro . Novel Multiband Orientation-Insensitive FSS Based on Dipole for Chipless RFID. In: <http://kism.or.kr/ISITC2018>, 2018, Jeonju. Proceedings of the Intern Symp on InformTech Converg 2018, 2018. v. 1.

## REFERÊNCIAS

ALDRICH, C.; AURET, L. Fault detection and diagnosis with random forest feature extraction and variable importance methods. **IFAC**, 2010. 79–86.

ALVES, M. M. et al. Improvements in reflectometry analysis for detecting faults on anchoring. **Measurement**, v. 187, 2022.

ANEEL. Regras dos Serviços de Transmissão ANEEL de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020906\\_2\\_1.pdf](http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020906_2_1.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2022.

AURET, L.; ALDRICH, C. Change point detection in time series data with random forests. **Control Eng. Pract.**, 2010.

BALDI, P.; HORNIK, K.; MINIMA, L. F. E. W. L. Neural networks and principal component analysis: **Neural Netw**, p. 53–58, 1989.

BARBOSA, D. C. Machine Learning Approach to Detect Faults on the Anchor Rods of Power Transmission Lines. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, n. 18, p. 2335 - 2339, 2019.

BARBOSA, D. C. Diagnóstico de falhas estruturais em hastes de âncora por meio da análise de sinais eletromagnéticos por ferramentas de inteligência artificial. **Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco**, 2020.

BARBOSA, D. C. et al. An electromagnetic multi-parameter strategy to detect faults in anchor rods using neural networks. **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**., 2019.

BARBOSA, D. C. et al. Machine Learning Approach to Detect Faults on the Anchor Rods of Power Transmission Lines. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, n. 18, p. 2335 - 2339, 2019.

BARBOSA, D. C. et al. Artificial Neural Network-Based System for Location of Structural Faults on Anchor Rods Using Input Impedance Response. **TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 57, n. 7, 2021.

BEZZERA, A. L. Aplicação de filtros planares de microondas com ressoadores de malha aberta e stubs internos em duplexadores. **Dissertação de mestrado - UFPE**, 2006.

BOUZAFFOUR, K. et al. Development of an Embedded UHF-RFID Corrosion Sensor for Monitoring Corrosion of Steel in Concrete. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 21, n. 10, 2021.

BREIMAN, L. Random decision forests. **Machine Learning** **45**, 2001. 5–32.

BURKART, N.; HUBER, M. F. A Survey on the Explainability of Supervised Machine Learning. **The Journal of Artificial Intelligence Research**, 2021.

CARRANZA, E. J. M.; LABORTE, A. G. Random forest predictive modelling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra. **Comput. Geosci**, 2015. 60–70.

CENDES, Z. The development of HFSS. **USNC-URSI Radio Science Meeting**, 2016. 39-40.

CHONG, G. Y. et al. Design and implementation of intelligent detection equipment for corrossions status of grounding grid. **Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)**, 2020.

CHRIS , A. Process Variable Importance Analysis by Use of Random Forests in a Shapley Regression Framework. **Minerals**, 2020.

COUTINHO, M. S. et al. Machine learning-based system for fault detection on anchor rods of cable-stayed power transmission towers. **Electric Power Systems Research**, v. 194, 2021.

DE OLIVEIRA, M. R. T. **Superfície Seletiva de Frequência Reconfigurável (RFSS) Baseada em Dipolo Cruzado**. [S.l.]: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. (Dissertação Mestrado), 2016.

DREISEITL , S.; OHNO-MACHADO, L. Logistic regression and artificial neural network classification models: A methodology review. **J. Biomed**, p. 352–359, 2002.

DURHAM, N.; ZHAO, J.; THOMSO, G. B. E. D. Acoustic guided wave detection of grounding rod corrosion: equivalent circuit model and implementation. **Smart Materials and Structures**, v. 29, 2020.

FAHAD, M. et al. Corrosion Detection in Industrial Pipes Using Guided Acoustics and Radial Basis Function Neural Network. **International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)**, 2017.

FILHO, H. V. H. S. et al. Design of a connector for fault detection in eye bolts used as insulator anchorages. **Engineering Research Express**, 24 Novembro 2020.

FILHO, H. V. H. S. et al. Reliable Structural Failure Detection in Eye Bolts using Reflectometry Signals. **European Microwave Conference (EuMC)**, 2021.

FURS, C.; DIAMOND, P. S. E. M. Feasibility of Reflectometry for Nondestructive Evaluation of Prestressed Concrete Anchors. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, p. 1322 - 1329, 2009.

GHAZALI, N. B. et al. Cable fault classification in ADSL copper access network using machine learning. **International Journal of Advances in Intelligent Informatics**, v. 7, p. 318-328, 2021. ISSN 3.

GOUTTE, G.; GAUSSIER, E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. **European Conference on Information Retrieval, Springe**, 2005.

GU , X. **Optical wavelet domain Reflectometry”**. **Time-Frequency and Time-Scale Analysis**. Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on. [S.I.]: [s.n.]. 1994. p. 158-161.

HAN,. Investigation of the low-frequency stray current induced corrosion on reinforced concrete infrastructure in high-speed rail transit power supply system. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 2022.

HEUMANN , C.; SHALABH, M. S. Introduction to Statistics and Data Analysis. **Springer**, p. 79-90, 2016.

HO, T. K. Random decision forests. **Proceedings of 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition**, 1995.

HONG, ; LANCASTER, M. J. Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters. **IEEE Trans.**, 1997.

HONG, J.-S.; , M. J. L. **Microstrip Filters for RF / Microwave Applications**. [S.I.]: JOHN WILEY & SONS, 2001.

IBRAHIM, E. S. Corrosion control in electric power systems, v. 52, p. 9-17, 1999.

J., A. Random forests and decision trees. **International Journal of Computer**, 2012. 272–278.

KANOUN, Q. S. A. O. Wire fault diagnosis in the frequency domain by impedancespectroscopy. **EEE Transactions on Instrumentation and Measurement** , v. 64, 2015.

KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. **Proceedings of the International Joint Conference on Artificial intelligence**, 1995. 1137–1145.

KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. **International Joint Conference on Artificial Intelligence**, 1995.

LANCASTER, ; HONG, J. S. **Microstrip filters for RF/Microwave applications**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. [S.l.]: Bookman, 2004.

LAURIA, D. et al. Active cathodic protection for HV power cables in undersea application. **Electric Power Systems Research**, v. 163, p. 590-598, 2018.

LOURENÇO NOVO, L. R. G. S. **Desenvolvimento de métodos para detecção de desgaste ou corrosão em hastes de âncora de torres estaiadas de linha de transmissão de energia elétrica**. [S.l.]: [s.n.], 2015.

M. POMPILI, B. A. C. E. A. Steel reinforced concrete electrodes for HVDC submarine cables. **Electric Power Systems Research**, v. 163, p. 524-531, 2018.

MURPHY, K. P. **Machine Learning: A Probabilistic Perspective**. MIT Press, 2012.

N. HIRAI, Y. O. Highly sensitive detection of distorted points in a cable by frequency domain reflectometry. **Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)**, 2014. 144-147.

NBR-6323. **Galvanização por imersão a quente de produtos de aço e ferro fundido - Especificação**. [S.l.]: ABNT, 2016.

NOVO, L. et al. Design connector for measurements in high frequency on anchor rods. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanic**, v. 45, p. 457 - 464, 2014.

OLIVEIRA, M. R. Filtro configurável baseado em RFSS tipo dipolo cruzado e grade. **Tese apresentada ao Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco**, 2018.

PAN, F. Corrosion detection method of substation Aboveground Steel Structure Based on deep learning. **Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)**, 2022.

PEDREGOSA, F. Scikit-learn: Machine learning in python. **Journal of Machine Learning Research** 12, 2011. 2825–2830.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. John Wiley & Sons, 2011. 48-87 e 165-215.

R. , G.; CAREY , V. J. **Unsupervised Machine Learning**. Springer, 2008.

RAMEZAN, C. A. Evaluation of Sampling and Cross-Validation Tuning Strategies for Regional-Scale Machine Learning Classification. **Remote Sensor**, 2019.

RICARDO, D. M. M. et al. Evaluation of Machine Learning Methods for Monitoring the Health of Guyed Towers. **Sensor**, v. 22, 2022.

SHAHBAZI, B.; CHELGANI, S. C.; MATIN, S. Prediction of froth flotation responses based on various conditioning parameters by random forest method. **Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp**, 2017. 936–941.

SHALEV-SHWARTZ, S.; BEN-DAVID, S. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. **Cambridge University Press**, 2014.

SILVA, L. M. D. **Projeto de filtros reconfiguráveis de malha aberta baseado na adição de estruturas ressonantes elétrica mente controladas**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

SINGH, Y. K.; SINHA, N.; SINGH, S. K. Heart Disease Prediction System Using Random Forest. **International Conference on Advances in Computing and Data Sciences**, 2017.

SOKOLOVA, M.; JAPKOWICZ, N.; SZPAKOWICZ, S. Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. **Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence**, Springer, p. 1015-1021, 2006.

STROBL, C.; MALLEY, J.; TUTZ, G. An introduction to recursive partitioning: Rationale, application, and characteristics of classification and regression trees, bagging, and random forests. **Psychol. Methods**, 2009.

SUN, X. Y. E. A. Classification of anchor bolts based on spectral kurtosis and K-means clustering algorithm. **International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, 2016.

SUN, X.-Y. et al. Classification of anchor bolts based on spectral kurtosis and K-means clustering algorithm. **International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, 2016.

SUTTHAWEEKUL, T. R.; Y., G. Steel Corrosion Stages Characterization Using Open Ended Rectangular Waveguide Probe. **IEEE Sensors Journal**, n. 18, p. 1054 - 1062, 2018.

TING, F. et al. Correlation research of phase angle variation and coating performance by means of Pearson's correlation coefficient. **Progress in Organic Coatings** **139**, 2020.

VAPNIK, V. N. The Nature of Statistical Learning Theory. **New York, NY, USA: Springer**, 1995.

ZHENG, H.; ZHANG, S.; SUN, X. Classification recognition of anchor rod based on PSO-SVM. **Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, 2017.

ZHENG, H.; ZHANG, S.; SUN, X. Classification recognition of anchor rod based on PSO-SVM. **Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, 2017.