



Universidade Federal
de Campina Grande

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO E APLICAÇÃO DE ETIQUETA RFID UHF PARA MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO EM TORRES DE ALTA TENSÃO

LIDJA NAYARA TAVARES ALVES, M. SC.

Campina Grande, Paraíba.
Novembro de 2023

PROJETO E APLICAÇÃO DE ETIQUETA RFID UHF PARA MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO
EM TORRES DE ALTA TENSÃO

Tese apresentada à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Lidja Nayara Tavares Alves, M. Sc.
Orientanda

Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Orientador

Alexandre Jean René Serres, D. Sc.
Orientador

Campina Grande, Paraíba.
Novembro de 2023

**PROJETO E APLICAÇÃO DE ETIQUETA RFID UHF PARA MONITORAMENTO DE
POLUIÇÃO EM TORRES DE ALTA TENSÃO**

LIDJA NAYARA TAVARES ALVES

TESE APROVADA EM 11/12/2023

**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)**

**ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG
Orientador(a)**

**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)**

**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)**

**JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP
Examinador(a)**

**ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 11 DE DEZEMBRO DE 2023 (Nº371)

CANDIDATA: **LIDJA NAYARA TAVARES ALVES**. COMISSÃO EXAMINADORA: GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG, Presidente da Comissão e Examinador interno, EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG, ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG, Orientadores, RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG, Examinador interno, JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP, ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB. Examinadores externos. TÍTULO DA TESE: **PROJETO E APLICAÇÃO DE ETIQUETA RFID UHF PARA MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO EM TORRES DE ALTA TENSÃO**. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: **14h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, a candidata foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se a examinada, legalmente habilitada a receber o Grau de Doutora em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Filipe Emmanuel Porfírio Correia, e os membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande, 11 de Dezembro de 2023.

Filipe Emmanuel Porfírio Correia
Secretário

GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador interno

EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG, Orientador
Orientador

ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG, Orientador
Orientador

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador Interno

JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP
Examinador Externo

ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB
Examinador Externo

LIDJA NAYARA TAVARES ALVES
Candidata

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado da candidata **LIDJA NAYARA TAVARES ALVES**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **FILIFE EMMANUEL PORFIRIO CORREIA, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 13/12/2023, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE, PROFESSOR 3 GRAU**, em 13/12/2023, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2023, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alfredo Gomes Neto, Usuário Externo**, em 13/12/2023, às 19:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES, COORDENADOR DE POS-GRADUACAO**, em 14/12/2023, às 05:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDSON GUEDES DA COSTA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 15/12/2023, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4073293** e o código CRC **8E5412C4**.

A474p

Alves, Lidja Nayara Tavares.

Projeto e aplicação de etiqueta RFID UHF para monitoramento de poluição em torres de alta tensão / Lidja Nayara Tavares Alves – Campina Grande, 2024.

131 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres."

Referências.

1. Processamento da Energia. 2. Poluição de Torres de Alta Tensão. 3. Isoladores Elétricos. 4. Radiofrequência. 5. Etiquetas RFID. I. Costa, Edson Guedes da. II. Serres, Alexandre Jean René. III. Título.

CDU 621.3(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por cada etapa vencida para chegar até aqui, nas quais Ele sempre esteve ao meu lado. Agradeço a Nossa Senhora, minha mãezinha, por todas as vezes que me colocou em seu colo e intercedeu por mim.

Aos meus pais, Marcos Alves e Arizonete Alves, por todo o esforço realizado na minha educação, pelos valores morais, pelo apoio e amor que sempre me dão. Simplesmente agradeço por ter pais incríveis.

Agradeço à minha irmã, Gabriella Alves, e a todos os meus familiares pelo carinho, amor e incentivo.

Agradeço ao meu noivo Antonio Neto por todo apoio e por ser um exemplo de determinação, força e coragem.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Edson Guedes e Prof. Dr. Alexandre Serres, por todos os ensinamentos, pela paciência e por acreditarem no meu potencial.

Agradeço ao Prof. Dr. George Xavier por acreditar no potencial desta pesquisa e por ter sido meu tutor durante todo o doutorado.

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da UFCG e do Laboratório da Radiometria, pelo aprendizado, pelo companheirismo, e pelos momentos de confraternização.

Aos colegas Jéssyca Araújo e Samuel Moraes pela paciência e ensinamentos no âmbito das etiquetas RFID.

Agradeço aos mestres e funcionários do DEE-UFCG, dos quais levarei lições para a vida inteira, não apenas enquanto profissional, mas também como ser humano. Ao técnico Higor Rocha, por toda a assistência e disponibilidade.

Agradeço aos meus líderes de trabalho, Alex Sousa e Beatriz Caires, e a todos os meus amigos que fazem ou fizeram parte da Squad Compliance, em especial: Cairo Lopes, Davi Aro, Diego Leivas, Jeferson Martins e Murilo Dominguez. Todos proporcionaram suporte e ensinamentos necessários para que eu pudesse compartilhar a pesquisa do doutorado com o trabalho CLT.

Por fim, aos amigos que tanto partilharam as diversas situações em minha vida ao longo dos anos.

*“Aprenda tudo o que puder,
sempre que puder
e de quem quer que seja.”*

Sarah Caldwell

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um protótipo experimental de uma etiqueta *Radio Frequency Identification* - RFID para identificação e monitoramento da poluição em torres de alta tensão. Para tanto, foram realizadas as seguintes etapas: caracterização dielétrica da poluição artificial; projeto via simulação de etiquetas RFID para aplicação em torres metálicas; fabricação, validação e testes das etiquetas; análise de sensibilidade do alcance das etiquetas; e algoritmo computacional para o tratamento dos sinais e posterior análise estatística. O monitoramento da poluição foi baseado nas variações do Indicador da Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) pelo leitor devido a quantidade depositada de poluição. A validação e teste das etiquetas foram realizadas em ambiente externo com uma emulação de torre de alta tensão desenergizada. Para todos os níveis de poluição artificial depositada analisados, o alcance máximo médio da leitura do sinal, em ambiente externo, foi 18 metros. Os dados de RSSI, obtidos por meio da leitura da etiqueta RFID, foram processados e analisados, objetivando uma identificação dos níveis de poluição depositada nas torres de alta tensão. Os resultados demonstram o potencial das etiquetas para identificação e monitoramento da poluição pesada em torres metálicas de alta tensão. Proporcionando uma maior assertividade nos diagnósticos de poluição e conseqüentemente rotinas de inspeção de cadeias de isoladores mais seguras, eficientes e não-invasivas. Adicionalmente, as etiquetas RFID possibilita a catalogação das torres de alta tensão utilizadas no sistema elétrico de potência. A identificação de poluição via as etiquetas RFID consiste em uma tecnologia em forte crescimento, não-invasiva e de baixo custo para implementação em torres de alta tensão.

Palavras-chave: Etiquetas, isoladores elétricos, poluição, RFID, radiofrequência, torres de alta tensão.

ABSTRACT

This work presents an experimental prototype of a *Radio Frequency Identification* - RFID tag for identification and monitoring of pollution in high voltage towers. Therefore, the following steps were carried out: dielectric characterization of the artificial pollution; design via simulation of RFID tags for application in metallic towers; manufacturing, validation and testing of tags; sensitivity analysis of tag reach; and computational algorithm for signal processing and subsequent statistical analysis. Pollution monitoring was based on variations in the Received Signal Strength Indicator (RSSI) by the reader due to the amount of pollution deposited. Tag validation and testing was performed outdoors with a de-energized high-voltage tower emulation. For all levels of deposited pollution analyzed, the maximum average range of the signal reading, in an external environment, was 18 meters. The RSSI data, obtained by reading the RFID tag, will be processed and analyzed, aiming to identify the levels of pollution deposited in the high voltage towers. The results demonstrate the potential of RFID tags for identifying and monitoring severe pollution in high voltage metal towers. Providing greater assertiveness in pollution diagnoses and consequently safer, more efficient and non-invasive inspection routines for insulator chains. Additionally, RFID tags make it possible to catalog high voltage towers used in the electrical power system. Pollution identification via RFID tags is a rapidly growing, non-invasive and low-cost technology for implementation in high voltage towers.

Keywords: Tags, electrical insulators, pollution, RFID, radio frequency, high voltage towers.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNN	Rede Neural de Convolução
DP	Descarga Parcial
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DDNS	Densidade de Depósito de Não Solúvel
EA	Emissões Acústicas
EIRP	<i>Equivalent Isotropic Radiated Power</i>
EM	Eletromagnética
ESDD	Densidade de depósito de sal
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
FNBW	<i>First Null Beamwidth</i>
HPBW	<i>Half Power Beamwidth</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LT	Linha de Transmissão
MHz	Mega hertz
MF	<i>Microwave frequency</i>
MVS	Máquina de Vetor de Suporte
OEM	Onda Eletromagnética
O&M	Operação e Manutenção
RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
RVM	Máquina de Vetor de Relevância
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UV	Ultravioleta

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema RFID para identificação de poluição em torres de alta tensão	19
Figura 2 - Modelos de isoladores para linhas de transmissão de energia: (a) isolador de vidro; (b) isolador de porcelana (c) isolador de compósito.	25
Figura 3 - Sequência do processo de descarga no isolador cerâmico.	27
Figura 4 - Relação dos índices DDSE e DDNS de acordo com os níveis de severidade.	29
Figura 5 - Procedimento para obtenção do DDNS.	30
Figura 6 - Estrutura básica de um sistema RFID.	36
Figura 7 - Principais componentes de uma etiqueta RFID.	38
Figura 8 - Padrões de radiação em escala linear e logarítmica, respectivamente.	42
Figura 9 - Lóbulos de um padrão de radiação.	43
Figura 10 - Representação da HPBW e FNBW.	44
Figura 11 - Fluxograma representativo do projeto proposto.	58
Figura 12 - Processo de design da etiqueta RFID.	61
Figura 13 - Níveis de poluição com base na IEC 60815.	63
Figura 14 - Processo de medição do caulim.	65
Figura 15 - Medição de condutividade e temperatura da solução da poluição.	66
Figura 16 - Procedimento de aplicação da poluição.	66
Figura 17 - Imagens da antena RFID PAL90209H.	67
Figura 18 - Imagem do leitor RFID Intermec 1009FF01.	67
Figura 19 - Arranjo experimental.	68
Figura 20 - Esquemático da medição de alcance.	68
Figura 21 - Fotografias dos ambientes de medições e testes.	69
Figura 22 - Fluxograma simplificado para sistema de classificação.	70
Figura 23 - Estrutura simulada: (a) torre e etiqueta circular 3D; (b) etiqueta circular 2D.	72
Figura 24 - Geometria da etiqueta RFID circular.	72
Figura 25 - Intensidade do coeficiente de reflexão (S_{11}) para a etiqueta RFID com geometria circular. ..	73
Figura 26 - Impedância de entrada simulada da etiqueta: (a) sem poluição e (b) com poluição.	74
Figura 27 - Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] sem poluição - plano $\phi = 0^\circ$	75
Figura 28 - Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] com poluição - plano $\phi = 0^\circ$	75
Figura 29 - Comparativo do diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] sem e com poluição.	76
Figura 30 - Estrutura simulada: (a) torre e etiqueta quadricular 3D; (b) etiqueta quadricular 2D.	77
Figura 31 - Geometria da etiqueta quadricular.	78
Figura 32 - Intensidade do coeficiente de reflexão (S_{11}) para a etiqueta RFID com geometria quadricular.	79
Figura 33 - Impedância de entrada simulada da etiqueta: (a) sem poluição e (b) com poluição.	80
Figura 34 - Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] sem poluição - plano $\phi = 0^\circ$	81

Figura 35 – Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] com poluição - plano $\phi = 0^\circ$	81
Figura 36 - Comparativo do diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] sem e com poluição.	82
Figura 37 - Coeficiente de reflexão da etiqueta RFID com diferentes espessuras de poluição.	84
Figura 38 - Padrão de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] para diferentes espessuras de poluição.	85
Figura 39 - Representação das distribuições de poluição depositadas na etiqueta RFID.....	86
Figura 40 – Coeficiente de reflexão da etiqueta RFID UHF com diferentes distribuições de poluição.....	87
Figura 41 - Padrão de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] para diferentes distribuições de poluição.....	87
Figura 42 - Etiqueta modelo circular: (a) simulada; (b) fabricada.	89
Figura 43 - Etiqueta modelo quadricular: (a) simulada; (b) fabricada.....	89
Figura 44 – Fotografia do arranjo experimental para análise da funcionabilidade das etiquetas fabricadas.	90
Figura 45 - RSSI das etiquetas circular e quadricular com distância de 8 m.	91
Figura 46 - RSSI das etiquetas fabricadas (limpas) com distância de 8 m.....	92
Figura 47 - Fotografias das etiquetas com poluição leve, média e pesada.....	93
Figura 48- Fotografia do arranjo experimental externo – LAT UFCG.....	94
Figura 49 - RSSI versus medições de alcance para poluição leve, média e pesada.....	95
Figura 50 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 1 metro.	97
Figura 51 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 4 metros.	97
Figura 52 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 8 metros.	98
Figura 53 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 12 metros.	98
Figura 54 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 16 metros.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos publicados em congresso ou periódicos internacionais.....	23
Tabela 2 – Medições em campo por Rocha (2019).....	64
Tabela 3 – Solução das poluições produzidas.....	65
Tabela 4 - Dimensões da etiqueta RFID UHF circular.....	73
Tabela 5 - Dimensões da etiqueta RFID UHF quadricular.....	78
Tabela 6 - Síntese dos parâmetros de desempenho das etiquetas simuladas: circular e quadricular.	83
Tabela 7 - Síntese dos parâmetros de desempenho para diferentes espessuras de poluição.....	85
Tabela 8 - Síntese dos parâmetros de desempenho para as quatro distribuições de poluição.	88
Tabela 9 - Extração de atributos para etiquetas limpas – 8 metros.....	93
Tabela 10 - Extração de atributos para as etiquetas: sem poluição; poluição leve; poluição média; e poluição pesada.....	96

SUMÁRIO

Agradecimentos	3
Resumo	5
Abstract	6
Lista de Abreviaturas e Siglas	7
Lista de Ilustrações	8
Lista de Tabelas	10
1 Introdução	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Relevância	14
1.3 Motivação	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo Geral	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 Contribuições do trabalho	21
1.6 Publicações	22
1.7 Organização do texto	23
2 Fundamentação Teórica	24
2.1 Isoladores Elétricos	24
2.1.1 Poluição em Isoladores	25
2.1.1.1 Mecanismo de Ruptura Dielétrica para Superfícies	26
2.1.2 Análise e Medição de Poluição	28
2.1.2.1 DDSE - Densidade de Depósito de Sal Equivalente	29
2.1.2.2 DDNS - Densidade de Depósito de Não Solúvel	30
2.1.3 Ensaios de Poluição Artificial	31
2.2 Tecnologia RFID	33
2.2.1 Sistema RFID	35
2.2.1.1 Etiquetas	36
2.2.1.2 Componentes de uma Etiqueta RFID com <i>Chip</i>	37
2.2.1.3 Leitor	39
2.2.1.4 Controlador	39
2.2.1.5 Faixas de Frequência	39
2.2.2 Principais Parâmetros de Desempenho	41
2.2.2.1 Diagrama de Irradiação	41
2.2.2.2 Impedância de Entrada	44
2.2.2.3 Ganho	45
2.2.2.4 Alcance de Leitura	45
2.2.2.5 Indicador da Intensidade do Sinal Recebido	45
2.2.2.6 Regulamentação e Padrão	46
3 Revisão Bibliográfica	48
3.1 Sintetização das Contribuições da Revisão Bibliográfica e Desta Pesquisa	56
4 Metodologia	58

4.1	Projeto e Simulação das Etiquetas.....	59
4.1.1	Modelagem da Etiqueta RFID	59
4.1.2	Projeto e Simulação.....	61
4.2	Fabricação e Aplicação do Poluente.....	62
4.2.1	Níveis de Poluição	63
4.2.2	Nível de Poluição Artificial das Etiquetas	63
4.2.3	Processo de Poluição das Etiquetas.....	65
4.3	Medições e Testes	67
4.4	Tratamento do RSSI.....	69
5	Resultados.....	71
5.1	Projetos das Etiquetas RFID UHF Passivas	71
5.1.1	Etiqueta RFID Circular.....	71
5.1.2	Etiqueta RFID UHF Quadricular	77
5.1.3	Considerações	83
5.2	Análise de Sensibilidade – Simulação	84
5.2.1	Espessura da Poluição	84
5.2.2	Distribuição da Poluição.....	86
5.2.3	Considerações	88
5.3	Fabricação e Testes das Etiquetas	89
5.3.1	Fabricação e Testes Iniciais	89
5.3.2	Validação das Etiquetas.....	92
5.3.3	Considerações	93
5.4	Medições e Análises.....	94
5.4.1	Considerações.....	101
6	Conclusão	102
6.1	Trabalhos Futuros.....	104
	Referências	107
	Apêndice A.....	116

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os alicerces introdutórios da pesquisa com foco na contextualização, relevância e motivação que fundamentam a idealização do trabalho. Além disso, são inseridos os objetivos geral e específicos que possibilitam nortear a elaboração da metodologia e o alcance da pesquisa. Por fim, são apresentadas as contribuições resultantes da pesquisa, situando o estado da arte.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o crescimento dos setores tecnológico e econômico, o consumo de energia elétrica torna-se uma unidade de medida para o desenvolvimento de um país. Países em todo o mundo se movem para promover maior diversificação das fontes de energia elétrica com o objetivo de atender a demanda do mercado atual. O aumento da demanda de energia elétrica de qualidade resulta na exigência de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia cada vez mais confiáveis e disponíveis.

A transmissão de energia elétrica é, na maioria das vezes, realizada por meio de condutores metálicos que ficam isolados e suspensos em torres utilizando-se de isoladores elétricos. Assim, os isoladores devem apresentar boas propriedades dielétricas e mecânicas ao longo de sua vida útil. As propriedades dielétricas devem garantir baixas perdas e isolamento elétrico entre a torre e os condutores energizados, enquanto as propriedades mecânicas devem proporcionar a sustentação mecânica dos condutores em condições normais e anormais do sistema. Assim, essas propriedades influenciam diretamente na confiabilidade do sistema elétrico (Gorur, 1999).

A ocorrência de falhas em isoladores, seja em linhas de transmissão ou em subestações, impacta diretamente na disponibilidade do sistema elétrico, causando interrupções na transmissão de energia, danos a equipamentos, riscos à segurança, impactos sociais, impactos ambientais e graves prejuízos econômicos, incluindo multas impostas por autoridades reguladoras (Albuquerque, 2014; Xiaobo e outros, 2022).

No sistema elétrico, a maior parte do isolamento nas linhas de transmissão existentes e nas subestações foi dimensionada de acordo com padrões baseados na experiência histórica com parâmetros de serviço como precipitação, vento, umidade,

temperatura, entre outros. Esses parâmetros são os que mais influenciam no surgimento de falhas dielétricas provenientes da poluição depositada nas superfícies dos isoladores elétricos (INMR, 2023).

O projeto de isolamento adequado deve, portanto, sempre considerar todas as fontes de poluição que podem afetar o isolamento ao longo do tempo. Além disso, a gravidade da poluição também pode mudar drasticamente devido a fatores externos, afetando a eficácia da manutenção preventiva programada e gerando interrupções de serviço de longa duração. Desta forma, a análise dos níveis de poluição depositados nos isoladores representa uma poderosa ferramenta de monitoramento preventivo e preditivo para as empresas de energia.

Assim, torna-se indispensável o uso de métodos de monitoramento das condições operacionais dos isoladores elétricos baseados no depósito de poluição para identificação preventiva de possíveis ocorrências de falhas dielétricas e, em um futuro, o monitoramento desses ativos de forma preditiva.

1.2 RELEVÂNCIA

A ocorrência de falhas em linhas de transmissão representa umas das principais causas de desligamentos forçados do sistema elétrico. As falhas em linhas de transmissão foram responsáveis por 76,1% dos desligamentos envolvendo a rede básica e complementar do Sistema Interligado Nacional (SIN) no período de julho/2015 a junho/2016 (Feitosa Neto e outros, 2017). As falhas em equipamentos/acessórios representaram 11% do total de desligamentos. Disjuntores, unidades capacitivas e isoladores foram os principais equipamentos que causaram desligamentos forçados no sistema de transmissão, com 26,7% dos desligamentos (ANEEL, 2016).

Desligamentos causados por fatores diversos devem ser entendidos e contrabalançados, evitando ou minimizando transtornos tais como os de ordem financeira, de segurança pública, de saúde, educacional e social como um todo. Assim, a indústria e a sociedade necessitam de alta confiabilidade no fornecimento de energia, de modo que a indisponibilidade do fornecimento impacta em grandes prejuízos sociais e financeiros.

Nesta abordagem, estima-se que nos EUA o custo das perdas financeiras com a interrupção do fornecimento de energia elétrica, de até um minuto, pode superar

US\$ 400.000,00 (Oleskovics, 2007) a cada evento. No Brasil, de acordo com uma consultoria encomendada pela ANEEL (2016), é relatado um estudo de caso de uma empresa brasileira de distribuição que contabilizou, em um ano, o montante de R\$ 3,3 milhões referente à multa por interrupção de fornecimento. Na consultoria foi constatado que uma das principais causas de interrupções no fornecimento de energia é devido a problemas em isoladores.

As falhas em isoladores podem ser decorrentes dos processos de fabricação, envelhecimento, instalação, vandalismo, degradação biológica e condições ambientais como ação do vento, umidade e poluição. Em regiões com altos níveis de poluição a incidência de falhas é acentuada. A associação entre umidade e a poluição depositada no isolador intensifica a circulação de correntes de fuga e descargas superficiais, podendo ocasionar o surgimento de uma descarga disruptiva fase-terra (*flashover*).

Ademais, as proporções relativas dos níveis de poluição nas superfícies afetam o desempenho do isolamento e também o aparecimento de não conformidades, como corrosão, devido à corrente de fuga excessiva. A poluição não solúvel influencia no desempenho elétrico dos isoladores porque afeta a natureza da molhabilidade da superfície. Uma superfície com um depósito de pó pesado, mas inerte, estabilizará a poluição condutiva existente e promoverá o desenvolvimento repetido de descargas parciais e bandas secas. A camada de poeira assentada também pode absorver dióxido de enxofre e vapor de água diretamente do ar. Isso aumenta o risco de que os sais higroscópicos absorvam água suficiente do ar úmido para 'automolhado', formando assim uma superfície condutiva contínua que reduz o desempenho da isolação (INMR, 2023).

O diagnóstico de poluição é difícil e dispendioso para os operadores de redes de energia. Na grande maioria das vezes, adotam inspeções noturnas e com elevada umidade relativa do ar, as quais são realizadas de maneira subjetiva e dependente da experiência do inspetor para o diagnóstico da poluição. Outra opção frequentemente adotada pelos operadores corresponde a lavagem das cadeias dos isoladores de acordo com o critério tempo de operação, ou seja, seguindo uma determinada periodicidade pré-estabelecida. Contudo, essa opção pode ser ineficiente devido à imprevisibilidade de ocorrência de lavagens naturais pela precipitação pluviométrica ou excesso de poluição devido a agentes externos atípicos como excesso de tráfego por determinada estrada não pavimentada ou a ocorrência de uma queimada, instalação de uma indústria ou utilização de insumos agrícolas na região da linha de transmissão, por exemplo (Albuquerque, 2014).

Adicionalmente, existem na literatura diversos métodos de inspeção e diagnósticos de sintomas que podem ser correlacionados com a poluição em isoladores, diferenciando-se principalmente em relação ao parâmetro de análise, como por exemplo: corrente de fuga; ruído ultrassônico; aquecimento (termografia); e de radiofrequência (RF) (Rocha, 2019).

O método de inspeção por meio da análise da corrente de fuga possibilita monitorar a corrente que flui pelo isolador. Um aumento da corrente corresponde a uma redução da sua propriedade de isolamento. Entretanto, a inspeção por corrente de fuga possui um fator limitante devido à sua característica invasiva. Associado às dificuldades inerentes das instalações de sensores de corrente, a grande quantidade de isoladores e sua distribuição ao longo de centenas de quilômetros de linhas de transmissão inviabiliza o seu emprego em larga escala.

Métodos de inspeção não invasivos também têm sido largamente aplicados, dentre os quais se destacam: a análise de emissões acústicas; a termografia; e radiofrequência. O método de análise de emissões acústicas (EA) está baseado no efeito mecânico provocado pelas descargas elétricas. Como a amplitude de uma onda sonora, criada por uma única descarga, é proporcional à raiz quadrada da energia mecânica liberada na descarga (Lundgaard, 1992), é possível relacionar a intensidade do ruído acústico com a presença de descargas elétricas. Para isso, são realizadas medições do ruído ultrassônico de isoladores em operação, permitindo ser estimado o seu nível de poluição, a partir da comparação com outros ruídos presentes em uma base de dados. Um fator limitante desse método é que o mesmo pode sofrer com interferências provenientes de outras fontes sonoras presentes no local, além de ser influenciado pela distância entre o isolador e o receptor ultrassônico. Além disso, ainda é necessária a presença da avaliação subjetiva do técnico, o que pode tornar o método impreciso (Pei e outros 2008; Ferreira, 2011; Shurrab e outros 2012; Sopelsa Neto e outros, 2021).

Ainda no contexto de métodos de inspeção não invasivos, destaca-se o uso da termografia nas inspeções, no qual são utilizados aparelhos termovisores que têm a capacidade de fornecer uma imagem mapeada em função da temperatura. Com a ocorrência de uma irregularidade no funcionamento do isolador, aumenta-se a corrente de fuga, ocasionando o aquecimento anormal do componente. Assim, a inspeção de isoladores por termovisão é feita a partir da comparação das imagens térmicas registradas ao longo do tempo e entre os pares. Como limitação da técnica, pode-se elencar a dificuldade em classificar diversos níveis de poluição devido ao aquecimento pouco

representativo, quando o nível de poluição pode ser considerado de leve a mediano. Adicionalmente, a necessidade de interpretação das imagens por um operador, o que pode levar a interpretações subjetivas dos resultados (El-Arabaty e outros, 1979; Ferreira e outros, 2010; Guedes e outros, 2015; Ribeiro, 2017; Dias, 2021).

Outro método de inspeção a ser mencionado é a partir da irradiação de radiofrequência (RF) pelo isolador, conforme podem ser visualizados nos trabalhos de Riviere e outros (1976), Stewart e outros (1999), Português e outros (2002), Anjum e outros (2014a), Anjum e outros (2014b) e Rocha (2019). Este método é baseado na análise do sinal de radiofrequência irradiado pelo isolador e coletado por uma antena. O fundamento que viabiliza o método é devido à geração de sinais eletromagnéticos de alta frequência, acima de 50 MHz, quando ocorre a presença de descargas do tipo corona. O isolador energizado se comporta como uma antena emissora de RF, e a depender das suas propriedades físicas, irradia padrões de RF distintos, denominados de assinatura espectral. Sendo assim, aplicando técnicas de filtragem de sinais por faixas de frequências, em conjunto com algoritmos inteligentes de classificação de padrões, são propostas metodologias de classificação dessas assinaturas espectrais.

No contexto de RF, Identificação por Radiofrequência (RFID) é o nome genérico para sistemas compostos por dispositivos eletrônicos que utilizam RF para realizar identificação e localização de diversos parâmetros nos mais variados setores: gestão logística; cuidados médicos; indústria pecuária; sistemas produtivos; entre outros (Finkenzeller, 2010; Chao e outros, 2007).

No meio industrial, a inclusão desta tecnologia tem-se multiplicado ao longo dos últimos anos, com um número considerável de empresas a introduzir RFID nos seus processos produtivos. Isto proporcionou às empresas benefícios na redução de custos, melhoria da qualidade, aumento do valor do cliente, redução de mão de obra, aumento e melhoria do controle de produção e melhoria da eficiência dos processos. Sabe-se que a eficiência na utilização desta tecnologia depende de muitos fatores, como, por exemplo, os materiais utilizados nos produtos onde são colocados os transponders RFID, a direção das antenas e as leituras de vários produtos simultaneamente no mesmo ambiente reduzido (Araujo, 2020; Morais, 2019; Abugabah e outros, 2020; Ali & Haseeb, 2019; Ula e outros, 2021).

Um típico transponder RFID passivo, frequentemente chamado de *tags*, consiste em uma antena e um circuito integrado de aplicação específica (ASIC) (Rao e outros, 2005). Para etiquetas passivas, a potência recebida pela etiqueta para ativar o microchip

ou para ser espalhada pela etiqueta é função das características físicas do alvo onde a etiqueta está anexada (Abdulhadi & Denidni, 2017). Assim, qualquer alteração nos parâmetros alvo (por exemplo: quantidade de poluição depositada) provoca uma alteração na potência recebida pela etiqueta, bem como na potência espalhada que é recebida pelo leitor. Ao detectar essas alterações, as propriedades alvo pode ser monitoradas em tempo real.

Devido ao mecanismo de funcionamento do retroespalhamento, as etiquetas do sensor RFID UHF (860–960 MHz) possuem as características de estrutura de circuito simples, baixo custo, baixo consumo de energia e alta transmissão de dados (Deng e outros, 2020), o que é especialmente adequado para monitoramento de longo prazo e grandes distâncias de leitura (Occhiuzzi e outros, 2010). Além disso, considerando que cada etiqueta RFID UHF possui informações de identificação exclusivas, a aplicação pode se tornar adequada para rápida localização de falhas e catalogação de torres de alta tensão e equipamentos elétricos.

Apesar da sua grande versatilidade e potencial, a aplicabilidade da tecnologia RFID pode ser considerada recente no setor elétrico. Somente nos últimos anos foram desenvolvidos alguns projetos de etiquetas RFID aplicados ao setor elétrico, especificamente no sistema de transmissão, conforme apresentado nos trabalhos de Deng e outros (2020) e Wenhao Ou e outros (2021).

A utilização de etiquetas RFID UHF para monitoramento de poluição no sistema de transmissão elétrico apresenta diversas vantagens, entre as quais se pode citar: constituir um sistema não invasivo; constituir um sistema de baixo custo; ser de fácil aplicação na região de interesse; ser de fácil integração com o sistema IoT; possibilitar a catalogação de etiquetas/torres; constituir um banco para armazenamento de dados; e possuir protocolos de comunicação de aceitação mundial. Além disso, num contexto de aplicação, existe a possibilidade de uma etiqueta RFID UHF ser utilizada para fins de monitoramento remoto do indicativo de poluição, por meio de redes de comunicação ou simplesmente por meio da utilização de aeronaves não tripuladas. Como cada etiqueta RFID possui um ID exclusivo e todos os IDs autorizados podem ser armazenados nos bancos de dados do módulo, é possível determinar facilmente quais etiquetas (torres) possuem uma classificação de poluição pesada. Evitando interrupções catastróficas em linhas de transmissão por meio de ações otimizadas de manutenção preditiva.

Sendo assim, o estudo da aplicabilidade de etiquetas RFID se torna relevante dentro do contexto atual de monitoramento e identificação de poluição em torres de alta

tensão, impulsionando a realização de pesquisas acerca desta tecnologia na comunidade científica de engenharia de alta tensão. O objetivo geral destas pesquisas é proporcionar o desenvolvimento de estudos teóricos, de simulação e experimentais das etiquetas RFID em suas diversas vertentes:

- No projeto inicial, via simulações multifásicas e caracterização de materiais dielétricos;
- Na análise de sensibilidade, buscando por ganho e alcance máximos;
- Na classificação, buscando critérios, tais como padrões e parâmetros estatísticos, que permitam aumentar a eficiência na identificação da poluição;
- No mapeamento das torres/equipamentos elétricos em áreas consideradas críticas para o regulador de fornecimento de energia, auxiliando na assertividade e eficiência das equipes de manutenção.

Neste sentido, na Figura 1 pode ser visualizado, de forma sumarizado, o diagrama representativo do sistema RFID para identificação de poluição em torres de alta tensão proposta, nesta tese, segmentado nas etapas de sensoriamento, processamento de dados e diagnóstico.

Figura 1 - Sistema RFID para identificação de poluição em torres de alta tensão



Fonte: Própria autora.

1.3 MOTIVAÇÃO

Pelo exposto na seção anterior, constata-se a necessidade de implementação e adoção de estratégias inovadoras e eficientes para a estimativa da poluição nos isoladores em linhas de transmissão. Visto a relevância que os isoladores possuem no sistema de fornecimento de energia elétrica, ferramentas, metodologias e procedimentos são construídos objetivando uma manutenção preventiva e efetiva. Assim, pesquisas que se empenham em propor novas tecnologias para inspeção têm sido desenvolvidas, como é o caso de Auckland e outros (1996), Oliveira (2008), Ferreira (2011), Anjum e outros (2015), Azordegan e Kordy (2016), George (2019).

Nos últimos anos foi observado uma tendência do mercado internacional de expandir o uso da tecnologia RFID em aplicações para diagnósticos ambientais. Entretanto, por meio da literatura, é possível constatar que poucos trabalhos empregam a tecnologia RFID no setor elétrico com foco em aplicações voltadas para diagnósticos de possíveis falhas. Em contrapartida, Deng e outros (2020) e Wenhao Ou e outros (2021) apresentaram etiquetas instaladas em torres de alta tensão para diagnóstico de vibrações, desmistificando o uso das etiquetas RFID em ambientes com elevado campo elétrico.

Portanto, a motivação desta proposta de tese fundamenta-se na viabilidade técnica de aplicações das etiquetas RFID UHF para o diagnóstico de poluição não solúvel, possibilitando apresentar à comunidade científica e mercado nacional e internacional uma nova métrica de medição de poluição no setor elétrico, bem como, na escassez de trabalhos envolvendo a aplicação de etiquetas RFID UHF em equipamentos do sistema elétrico. Essa métrica consiste em uma tecnologia em forte crescimento, não-invasiva e de baixo-custo para implementação em torres de linhas de transmissão. Ademais, o uso dessa métrica possibilita uma maior assertividade e redução de custos na operação e manutenção (O&M), melhoria da confiabilidade e continuidade na disponibilidade do sistema elétrico. Além disso, a métrica pode ser ampliada para uso no futuro no monitoramento *on-line* de ativos nos sistemas elétricos, como os isoladores.

1.4 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa na qual esta tese está inserida podem ser divididos em geral e específicos, conforme destacado a seguir.

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é estudar, simular, desenvolver e propor uma etiqueta RFID UHF para identificação de poluição artificial em torres de alta tensão. Além disso, constitui o objetivo geral a emulação, medição, processamento e classificação de sinais RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), que permita identificar padrões de poluição artificial em torres de alta tensão.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

- Investigar materiais eficientes e técnicas otimização de geometria, via simulações multifísicas, utilizadas no desenvolvimento de etiquetas RFID UHF para aplicações sobre estruturas metálicas – torres de alta tensão;
- Analisar tipo de poluição artificial prejudiciais aos isoladores elétricos e as respectivas caracterizações dielétricas;
- Avaliar as condições de desempenho da etiqueta RFID UHF por meio da análise de sensibilidade da espessura e distribuição da poluição artificial, observando o ganho, diretividade e padrão de irradiação aplicados em torres metálicas;
- Avaliar, em área externa, a sensibilidade de detecção dos níveis de poluição em relação ao alcance de leitura;
- Implementar técnicas de processamento e análise dos sinais RSSI obtidos para diversos níveis de poluição, extraindo e avaliando os atributos para a identificação do nível de poluição depositada.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A partir das informações apresentadas na subseção anterior, pode-se destacar que as principais contribuições desta pesquisa são:

- Desenvolvimento de uma etiqueta RFID UHF acoplada a torres metálicas para identificação de poluição;
- Proposição de prova de conceito apresentada ao sistema elétrico de potência para identificação de poluição em torres metálicas de alta tensão baseado em um sistema não-invasivo e de baixo custo por meio das etiquetas RFID UHF;
- Proposição de um algoritmo computacional para processamento e análise dos dados RSSI obtidos com a etiqueta RFID UHF para quatro níveis de poluição;
- Catalogação de torres de alta tensão para auxílio no gerenciamento das torres, proporcionando uma manutenção com maior eficiência, bem como na gestão de ativos das concessionárias de energia elétrica.

1.6 PUBLICAÇÕES

A divulgação dos resultados obtidos ao longo desta pesquisa, e do doutoramento como um todo, foi realizada por meio de submissões e publicações de artigos em periódicos e congresso científico internacional. Sendo assim, na Tabela 1 são apresentados os trabalhos científicos que foram publicados durante esta pesquisa.

Tabela 1 - Artigos publicados em congressos e periódicos internacionais.

Artigos	Autores	Título	Congresso ou Periódicos	Ano
	ALVES, L. N. T. COSTA, E. G. SERRES, A. J. R. XAVIER, G. V. R. OLIVEIRA NETO, A. B.	Design and Application of a UHF RFID Tag for Monitoring Pollution in High Voltage Towers*.	<i>Electric Power Systems Research</i>	2023
	OLIVEIRA NETO, A. B. COSTA, E. G. FERRERIA, T. V. ALVES, L. N. T. ARAÚJO, B. V. S BRITO, K.-E. B.	Multiparametric Identification of Favorable Regions for Wind or Solar Generation in the State of Pernambuco.	<i>IEEE Latin America Transactions</i>	2022
Publicados	ALVES, L. N. T. COSTA, E. G. OLIVEIRA NETO, A. B. NOBREGA, R. B. FERRERIA, T. V.	Classificação da Hidrofobicidade Empregando PDI e RL em Isoladores de Vidro Revestidos de SIR, ATH e Carnáuba	ERiac (CIGRE)	2019
	RODRIGUES, L. H. M. SOUZA, R. T. GONCALVES, M. F. B. R. ALVES, L. N. T. LIRA, G. R. S. COSTA, E. G. TEIXEIRA, R.	Estudo Comparativo da Resposta em Frequência de Malhas de Aterramento Empregando Simulações Computacionais.	ERiac (CIGRE)	2019

*Principal publicação do trabalho de tese.

Fonte: Própria autora.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho de tese está dividido em seis capítulos. No capítulo 2 é apresentado o conteúdo teórico que serve de base para o desenvolvimento do trabalho, incluindo informações a respeito dos isoladores elétricos, as principais técnicas de medição de poluição, etiquetas RFID e seus principais parâmetros de desempenho.

Em seguida, no capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica, na qual são elencados os principais trabalhos correlatos ao tema desta proposta de tese, focando, principalmente, nos trabalhos relacionados ao monitoramento de poluição em isoladores elétricos e aplicabilidade de etiquetas RFID em ambientes de alta tensão.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia empregada para a realização das simulações e experimentos, necessários para atingir os objetivos específicos e geral estabelecidos nesta tese.

No capítulo 5, os resultados obtidos são apresentados, bem como as devidas análises e discussões, abrangendo os testes computacionais e em laboratório.

Posteriormente, no capítulo 6 são apresentadas as considerações obtidas durante do desenvolvimento desta pesquisa, bem como a sugestão de trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências e apêndice.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão apresentados os conceitos necessários para entendimento da nova metodologia e da análise dos resultados. Assim, conceitos sobre isoladores elétricos, poluição, medição de DDSE e DDNS (ABNT NBR 10621 e ABNT IEC 60815), mecanismo de ruptura dielétrica, etiquetas RFID UHF e os parâmetros de desempenho das etiquetas são descritos nas seções a seguir.

2.1 ISOLADORES ELÉTRICOS

Os isoladores elétricos, em geral, são utilizados no sistema elétrico de potência com a finalidade de realizar o isolamento elétrico entre cabos energizados e sua estrutura de suporte. Além de necessitar ser um excelente isolante, os isoladores elétricos devem prover a sustentação mecânica dos cabos entre duas estruturas.

Um isolador elétrico ideal comporta-se como um isolante sem perdas, garantindo uma isolação perfeita. Entretanto, em termos práticos, através do isolador circula uma parcela de corrente resistiva que é responsável por perdas de potência ativa, o que é indesejável considerando a finalidade do equipamento (Bogoroditsky e outros, 1979).

Atualmente existem isoladores cerâmicos (porcelana ou vidro) e compósitos (ou poliméricos), que podem apresentar diferentes formatos e dimensões, de acordo com as tensões nominais das linhas de transmissão e distribuição nos quais são empregados. Os isoladores cerâmicos são empregados pelo setor elétrico há mais de um século, enquanto os compósitos começaram a ser utilizados no decênio de 1940 em ambientes fechados. Entretanto, apenas no início do decênio de 1980 surgiu a primeira versão comercial de isoladores poliméricos para linha de transmissão (Hall, 1993; Mackev & Shah, 1997). Na Figura 2 são ilustradas fotos de isoladores de três tipos: vidro, porcelana e compósito.

A porcelana e o vidro são materiais inorgânicos bastante utilizados ao longo dos anos e conhecidos por serem resistentes à degradação natural, inertes para a maioria dos compostos químicos e possuírem elevada resistência ao calor resultante de arcos elétricos durante serviço. No entanto, devido à elevada energia superficial, estes isoladores apresentam alto nível de molhabilidade, de maneira que a umidade tende a se espalhar ao longo da superfície ao invés de formar gotas isoladas, favorecendo o desenvolvimento de

correntes de fuga. Além disso, são materiais densos e frágeis ao impacto, necessitando de estruturas mais reforçadas para comportá-los e estão sujeitos ao vandalismo (Kim e outros, 1992; Gorur e outros, 1999).

Figura 2 - Modelos de isoladores para linhas de transmissão de energia: (a) isolador de vidro; (b) isolador de porcelana (c) isolador de compósito.



Fonte: Adaptado de Silva, 2009.

Os isoladores a base de polímeros são constituídos de materiais orgânicos, principalmente hidrocarbonetos. Estes possuem melhores características hidrofóbicas, são leves, menores, e possuem custos associados reduzidos quando comparados aos de porcelana e de vidro. No entanto, estão mais propensos à deterioração decorrente do aquecimento ocasionado por descargas elétricas, reações químicas e intempéries, podendo resultar em mudanças nas características elétricas e mecânicas irreversíveis ao longo do tempo (Gorur e outros, 1999).

2.1.1 POLUIÇÃO EM ISOLADORES

A poluição superficial é um problema inerente à grande parte dos equipamentos que compõem o sistema elétrico e representa um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de falhas no isolamento externo.

A deposição de contaminantes na superfície dos isoladores ocorre, em geral, por ação do vento ou névoa. A composição dos contaminantes é diversa (sal, poeira, fertilizantes, fuligens, fungos etc.) e depende do tipo de ambiente que o equipamento se encontra instalado. Em regiões costeiras, por exemplo, é predominante a deposição de partículas solúveis na superfície do isolador, como cloreto de sódio (NaCl). Em regiões

industriais e desérticas a poluição é constituída, principalmente, por sais e elevados níveis de componentes não solúveis (IEC 60815-1, 2015; Braini, 2013).

O umedecimento da camada de poluição por meio do orvalho ou névoa reduz significativamente a suportabilidade dielétrica. A interação entre poluição e umidade pode ocasionar a formação de um composto condutivo na superfície do isolador e desencadear a evolução dos mecanismos responsáveis pela ruptura elétrica do isolamento, isto é, intensificação da corrente de fuga e ocorrência de descargas elétricas superficiais. A ocorrência de arcos elétricos na superfície pode ocasionar a degradação do isolador: trilhamento elétrico superficial, erosão do material isolante ou corrosão das ferragens devido à liberação de ozônio pelo arco elétrico (Nobrega, 2019).

2.1.1.1 MECANISMO DE RUPTURA DIELÉTRICA PARA SUPERFÍCIES

O processo de descarga disruptiva em isoladores submetidos a condições de poluição é bastante afetado pelas propriedades superficiais do material dielétrico, isto é, superfícies hidrofílicas ou hidrofóbicas. As superfícies hidrofílicas estão geralmente associadas com isoladores de vidro ou porcelana. As superfícies hidrofóbicas estão associadas com isoladores poliméricos. O processo de ruptura dielétrica em superfícies hidrofílicas submetidos a condições de poluição é apresentado na norma IEC 60815.

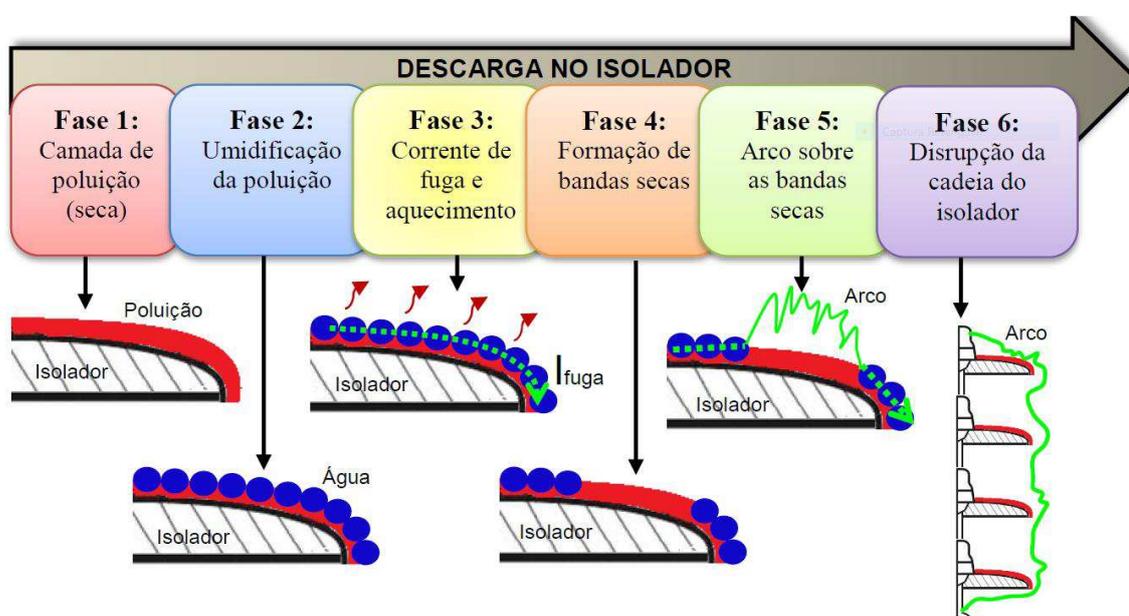
Segundo a norma IEC 60815, a descarga em superfície hidrofílica ocorre de maneira distinta, a depender do tipo de poluição depositada, tipo A ou tipo B, descritas na próxima seção. Para o caso da poluição do tipo A, o mecanismo de ruptura dielétrica é dividido em seis etapas. A ilustração das etapas do processo de mecanismo de ruptura pode ser visualizada na Figura 3 e as etapas são descritas a seguir:

- Fase 1: caracterizada por uma superfície poluída e seca. Neste caso, para ocorrer descarga, é necessário haver algum tipo de processo de umidificação do local.
- Fase 2: nesta etapa, considera-se que já ocorreu um processo de umidificação na superfície do isolador (umidade, condensação ou precipitação). Caso ocorra chuva forte, pode haver a lavagem da superfície, sendo a poluição removida parcialmente do isolador. Além disso, caso o volume de água seja muito intenso, pode acontecer uma

descarga direta devido ao encurtamento da distância entre as saias, devido à criação do caminho condutivo pela água.

- Fase 3: considerando que o isolador já esteja coberto por uma camada condutiva, ocorre o aumento da corrente de fuga, que por sua vez, gera aquecimento em determinados trechos de maior intensidade. Com o aquecimento nos pontos de maior densidade de corrente, conseqüentemente, há a formação de bandas secas sobre a superfície.
- Fase 4: como não há a secagem completa e uniforme de toda superfície poluída, o fluxo da corrente de fuga pelo caminho condutor é interrompido nos pontos que existem as bandas secas.
- Fase 5: sobre as múltiplas bandas secas, pode surgir uma tensão fase-terra, que origina um arco elétrico entre as camadas não secas, curto-circuitando a banda seca. Esse processo tem efeito cumulativo, pois a cada aparecimento de uma banda seca, há uma corrente de fuga originada.
- Fase 6: com o aumento progressivo da corrente de fuga, em conjunto com a quantidade de bandas secas sendo curto-circuitadas, em determinado instante ocorrerá a ruptura dielétrica sobre toda a superfície do isolador.

Figura 3 - Sequência do processo de descarga no isolador cerâmico.



Para o caso em que o isolador é submetido à poluição do tipo B, pode-se caracterizar essa poluição como do tipo névoa condutiva ou fezes de aves. No primeiro caso, considera-se a deposição rápida do material sobre a superfície, iniciando em menos de 1 hora os centelhamentos e retornando logo à condição anterior quando o evento termina. Trata-se de uma situação particular do processo descrito anteriormente (poluição do tipo A), contudo, tendo início na fase 3, e progredindo rapidamente até a fase 6. No segundo caso, quando se tem a deposição de fezes de aves sobre o isolador, forma-se um caminho altamente condutivo, diminuindo a distância de isolamento, podendo culminar na descarga disruptiva (Rocha, 2019).

2.1.2 ANÁLISE E MEDIÇÃO DE POLUIÇÃO

Devido à impossibilidade de impedir totalmente o acúmulo de poluição, necessita-se, então, o seu constante monitoramento, a fim de evitar o excesso de concentração da contaminação. A norma IEC 60815-1 classifica os tipos de poluição em duas categorias, A e B, as quais são detalhadas a seguir:

a) Tipo A: constituída de partículas sólidas, não solúveis, e quando depositadas sobre a superfície úmida do isolador, a torna condutiva. A poluição está mais associada a áreas interioranas, desérticas ou com poluição industrial. Esse tipo de poluição é constituído por uma parcela solúvel, responsável pela formação da camada condutora quando umidificada, e outra não solúvel, que proporciona a fixação da poluição solúvel no isolador.

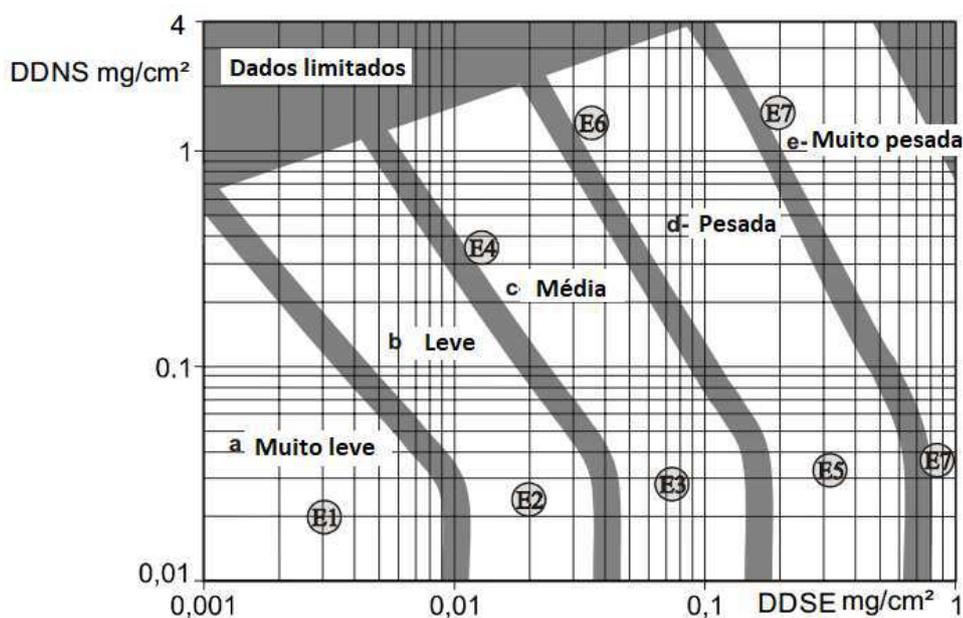
- Poluição solúvel: constituída de sais minerais e pode ser quantificada sua concentração por meio da medição da densidade de depósito de sal equivalente (DDSE), em mg/cm².
- Poluição não solúvel: constituída de partículas sólidas inertes, como poeira, argila, óleos etc. Sua quantificação se dá por meio da medição da densidade de depósito não solúvel (DDNS), em mg/cm².

b) Tipo B: constituída primordialmente por eletrólitos líquidos, partículas solúveis, associada a áreas costeiras, com a presença de maresia, ou névoa condutiva, e

em locais sujeitos à pulverização de culturas, névoa química e chuva ácida. Pode ser caracterizada pela medição da condutância ou da corrente de fuga pelo isolador.

Para fins de monitoramento dos níveis de agressividade da poluição local em isoladores, a norma IEC 60815 orienta a realização de medições de DDSE e DDNS nos isoladores desenergizados. Conforme a referência, a combinação desses dois índices indica um nível de severidade local, representado na Figura 4.

Figura 4 - Relação dos índices DDSE e DDNS de acordo com os níveis de severidade.



Fonte: Adaptado da norma IEC 60815.

A medição dos níveis de DDSE e DDNS é apresentada na norma IEC 60815, em que normatiza dois procedimentos possíveis para se realizar coleta da poluição, denominados de técnica do esfregão e da lavagem. O cálculo de DDSE e DDNS é apresentado nas subseções seguintes.

2.1.2.1 DDSE - DENSIDADE DE DEPÓSITO DE SAL EQUIVALENTE

De acordo com a IEC 60815, o DDSE corresponde a um índice que se refere a uma concentração de poluição sobre uma determinada área (densidade), seu cálculo deve conter os valores da área, da condutividade, e da temperatura. Como a condutividade da solução depende da sua concentração, sendo esta dependente, também, da temperatura ambiente, então, necessita-se, inicialmente, aplicar um fator de correção caso a temperatura seja diferente de 20°C, de acordo com as Expressões 2.1 e 2.2:

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)]. \quad (2.1)$$

$$b = -3200 \times 10^{-8} \theta^3 + 1032 \times 10^{-5} \theta^2 - 8272 \times 10^{-4} \theta + 3544 \times 10^{-2}. \quad (2.2)$$

Em que, θ é a temperatura da solução (°C), σ_{θ} e σ_{20} são as condutividades volumétricas das soluções nas temperaturas θ e 20°C, respectivamente, e b é um fator dependente da temperatura θ . Então, após o obter σ_{20} , o valor do DDSE é realizado a partir das Expressões 2.3 e 2.4.

$$S_a = (5,7 \sigma_{20})^{1,03}. \quad (2.3)$$

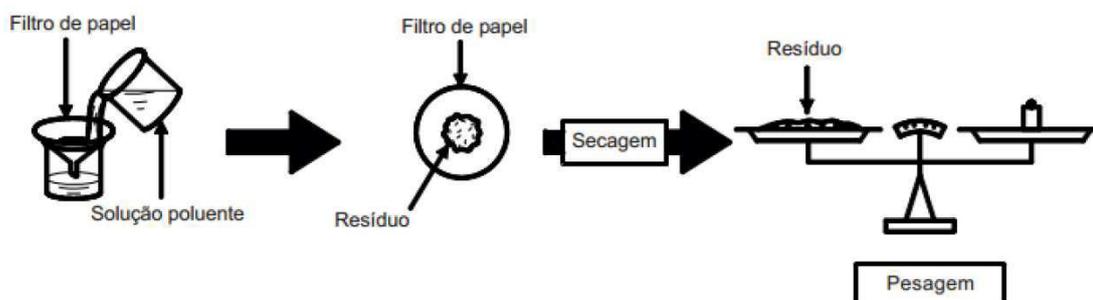
$$\text{DDSE} = S_a \frac{V}{A} [mg/cm^2]. \quad (2.4)$$

Em que, S_a é a salinidade em kg/m³, V é o volume total de água destilada (cm³) e A é a área da superfície (cm²) utilizada para a coleta da poluição. É recomendável que, para isoladores muito poluídos, o volume de água utilizado seja maior.

2.1.2.2 DDNS - DENSIDADE DE DEPÓSITO DE NÃO SOLÚVEL

Após a obtenção do DDSE, o procedimento para calcular o DDNS se inicia com a filtragem da água, contendo a poluição, por um filtro de graduação GF/A 1,6 μ m, ou similar. Após a filtragem, o filtro deve ser seco e os resíduos pesados. Na Figura 5 é ilustrado o procedimento detalhado.

Figura 5 - Procedimento para obtenção do DDNS.



Fonte: Adaptado ABNT/IEC 60815.

Após a pesagem, o DDNS é calculado conforme a Expressão 2.5.

$$DDNS = \frac{1000(W_f - W_i)}{A} [mg/cm^2]. \quad (2.5)$$

Em que, W_f é o peso do filtro de papel poluído (g), W_i é o peso do filtro de papel limpo e A é a área da superfície (cm^2) do isolador utilizada para a coleta da poluição.

2.1.3 ENSAIOS DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL

Os ensaios de poluição artificial são realizados para avaliar a suportabilidade dielétrica de isoladores expostos a atmosferas poluídas. A avaliação laboratorial do desempenho de isoladores em condições simuladas de poluição e umidade permite auxiliar na seleção e dimensionamento de isoladores para uso externo. O desempenho dos isoladores pode ser analisado em curtos períodos e o surgimento de falhas ou propriedades inadequadas pode ser detectada previamente (Nobrega, 2019).

Em geral, os ensaios de isoladores sujeitos à poluição são realizados seguindo recomendações prescritas pelas normas IEC 60507 e NBR 60621. Os métodos de ensaio de poluição especificados pelas normas são névoa salina e camada sólida. O método da névoa salina simula ambientes costeiros em que uma solução condutiva é depositada na superfície do isolador. O método da camada sólida reproduz os efeitos da poluição industrial e desértica, em que uma camada poluente e uniforme é formada na superfície do isolador a partir da deposição de resíduos solúveis e não solúveis.

A severidade da poluição é caracterizada por meio da concentração de contaminantes solúveis e não solúveis que são depositados na superfície do isolador. Os contaminantes solúveis e não solúveis são expressos pela densidade superficial de depósito de sal equivalente (DDSE) e densidade superficial de depósito não solúvel (DDNS), respectivamente. A DDSE consiste em um equivalente da quantidade de NaCl por unidade de área que proporciona a mesma condutividade superficial dos depósitos obtidos em campo. A DDNS corresponde à quantidade de materiais inertes ou não solúveis por unidade de área na superfície do isolador. Geralmente, caulim e kieselguhr (diatomito) são utilizados como agentes contaminantes para simular a deposição não solúvel em ensaios de poluição artificial (IEC 60815-1, 2015; Braini, 2013).

A preparação da solução de poluição artificial, necessita de conhecimento prévio a respeito da condutividade volumétrica desejada da poluição. Na prática, a solução é

preparada, inicialmente, apenas com água e material inerte, e em seguida, é adicionado o sal de cozinha de acordo com o valor da condutividade almejada. Entretanto, o nível de poluição do isolador é classificado em função dos índices de DDSE e DDNS e não por meio da condutividade da poluição.

2.2 TECNOLOGIA RFID

RFID é a abreviatura de *Radio Frequency Identification* – Identificação por Radiofrequência. A identificação por radiofrequência (RFID) faz parte da nossa vida diária. Este termo é utilizado para definir qualquer processo que, por meio de comunicação via rádio, pode trocar informações entre uma unidade estacionária e uma unidade móvel ou entre unidades móveis (Landt, 2005).

A base teórica física para o funcionamento do RFID data do final do século XIX, quando Michael Faraday (1791-1867), James Clerk Maxwell (1831-1879) e outros conseguiram encontrar fórmulas para melhor prever o comportamento de ondas eletromagnéticas. Com isso, começou-se a buscar a aplicação dessas recém-criadas leis em comunicação por rádio e radar. A primeira ideia de transmissão de potência elétrica sem fio foi concebida pelo famoso físico Nikola Tesla (1856-1943). Ele realizou diversos experimentos visando o envio de energia elétrica pelo ar. Ainda nessa época Heinrich Hertz demonstrou a propagação de ondas eletromagnéticas e sua possível detecção. Entretanto, não existiam, na época, geradores capazes de produzir ondas de comprimento pequeno suficiente para botar em prática esses conhecimentos (Duarte e outros, 2010).

No entanto, as raízes da RFID remontam à Segunda Guerra Mundial. Naquela época, o radar – descoberto em 1935 pelo físico escocês Sir Robert Alexander Watson-Watt – era usado para alertar sobre a aproximação de aeronaves. Os alemães, por exemplo, usaram uma manobra interessante em que os seus pilotos rodavam os seus aviões ao regressarem à base, de modo a alterar o sinal de rádio refletor. Este procedimento simples alertou a tripulação do radar de solo sobre o retorno de aviões alemães e não de aeronaves aliadas. Pode ser considerada uma das primeiras formas passivas de identificar um objeto por meio de um sinal de radiofrequência (Roberti, 2005; Hagl e Aslanidis, 2008; Crepaldi e Pimenta, 2017).

Ainda durante a Segunda Guerra Mundial, pesquisadores britânicos liderados por Watson-Watt desenvolveram um novo sistema com uma ideia muito inteligente. Eles colocaram transmissores em todos os aviões britânicos e, quando receberam sinais de estações de radar em terra, começaram a transmitir um sinal que identificava a aeronave como amiga. Esse é o conceito básico da operação RFID: um sinal é enviado a um transponder, que é ativado e reflete de volta um sinal (isto significa um sistema passivo)

ou transmite um sinal (sistema ativo). Este sistema era conhecido como “identificar amigo ou inimigo (IFF)” (Roberti, 2005; Hagl e Aslanidis, 2008; Crepaldi e Pimenta, 2017).

As comunicações por radar e RF tiveram um grande desenvolvimento nas décadas de 1950 e 1960, principalmente com a contribuição de pesquisas nos EUA e na Europa. Muitos artigos científicos explicam detalhadamente como uma energia na faixa de RF pode ser utilizada na detecção e identificação de objetos e, mais importante, remotamente. Entretanto, ainda existiam muitos empecilhos para a adoção em larga escala de qualquer tipo de sistema RFID devido a seu alto preço e a grande falta de regras e padrões.

Os desenvolvimentos tecnológicos nas décadas de 1980 e 1990 levaram à fabricação de sistemas RFID mais sofisticados e abrangentes, além de reduzir os custos envolvidos. Uma tarefa importante também começou: a padronização para a interoperabilidade de equipamentos ou sistemas RFID. Na década de 1990, os sistemas RFID alcançam a marca significativa de milhões de etiquetas apenas nos EUA, principalmente do setor automotivo.

No início década de 90, foi desenvolvido pela IBM um sistema de RFID de UHF (*Ultra High Frequency*), que oferecia maior alcance de leitura e maior velocidade de troca de dados, mas a tecnologia ainda era cara e faltavam padrões abertos e internacionais que facilitassem seu desenvolvimento. Para resolver esses problemas, agências reguladoras, como a Organização Internacional de Padrões (ISO), começaram a criar diretrizes para o futuro do RFID. Em 1999, fundou-se no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), com ajuda das instituições que regulavam códigos de barra na América do Norte e na Europa, da Procter & Gamble e da Gillette, o Auto-ID Center (Centro de Identificação Automática). Lá se idealizou uma nova possibilidade para as etiquetas de RFID. Com o grande desenvolvimento da internet, elas poderiam conter somente um número serial através do qual seus dados, guardados em bancos de informação, seriam encontrados. Isso possibilitou uma significativa queda de preço na produção das etiquetas (Roberti, 2005).

Ao longo de alguns anos, com apoio crescente de diferentes companhias, fundaram-se laboratórios ao redor do mundo. O centro desenvolveu protocolos, o Código Eletrônico de Produto (EPC) e uma arquitetura de rede para acesso de dados na internet. Em 2003 surgiu a EPC global para comercializar a tecnologia EPC, chamada posteriormente de RFID. O uso do RFID ganhou força mundial com sua adoção por gigantes de produção e vendas como Procter & Gamble, Target, Wal-Mart e Gillette (Domdouzis, 2007).

Na década de 2010, a diminuição do custo de equipamentos e etiquetas, o aumento do desempenho para uma confiabilidade de 99,9% e um padrão internacional estável trouxeram um grande impulso no uso de sistemas RFID. Em março de 2010, um laboratório coreano criou com sucesso um *chip* impresso utilizando nanotubos de carbono que resultou numa redução significativa no custo (Crepaldi e Pimenta, 2017).

As tecnologias RFID são utilizadas em centenas, senão milhares, de aplicações e setores industriais (aeroespacial, automotivo, logística, transporte, saúde, vida etc.), e a *International Standard Organization* (ISO) participou no estabelecimento de padrões técnicos e aplicativos que conduziu a um elevado grau de interoperabilidade ou permutabilidade. Hoje, existem várias bandas de frequência RFID, desde alguns quilohertz até uma banda de frequência de micro-ondas (2,4–2,5 GHz). Um dos mais recentes é o UHF Geração 2, que opera em 860–969 MHz (Chu, 2015).

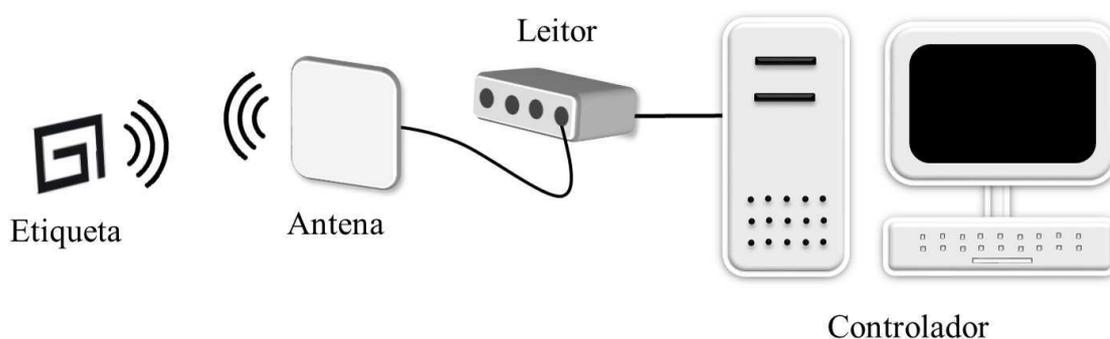
Os valores agregados perceptíveis da tecnologia RFID vão muito além da identificação de pessoas e produtos, tangem os campos de controles e aplicações que são utilizados para a melhoria das cadeias de negócio. Quando se trata de RFID, não se pode ater apenas aos sistemas de varejo de mercadorias. Tal tecnologia não é específica de um ou outro segmento de mercado, mas sim de toda a cadeia de negócios. O RFID não é somente um indicador de localização, mas sim uma tecnologia em constante crescimento, que oferece nova visibilidade nas áreas de operação, nos parceiros de comercialização ou ajudando a identificar problemas, bem como novas oportunidades que podem fortalecer os negócios.

2.2.1 SISTEMA RFID

A tecnologia RFID, é uma técnica de que permite a identificação por meio de sinais de onda de rádio de objetos anexados a uma etiqueta quando estas se encontram nas proximidades de um leitor RFID. Essas etiquetas são comumente anexadas às pessoas ou objetos móveis, para que assim possam ser rastreadas e identificadas utilizando leitores fixos em lugares diferentes. Uma vez que a comunicação entre etiqueta e leitor é estabelecida, o dado contido na etiqueta pode ser lido, e as vezes, sobrescrito por comandos específicos enviados pelo leitor. O sinal eletromagnético irradiado pelo leitor contém simultaneamente dados e energia, que pode ser utilizada para alimentação da etiqueta (Fonsêca, 2020).

Um sistema RFID é composto basicamente por três elementos principais: uma etiqueta, um leitor (ou interrogador) e um controlador, ilustrados na Figura 6. O leitor está constantemente emitindo um sinal de interrogação dentro da faixa de frequência de operação do sistema. No momento em que a pessoa ou o objeto que se deseja identificar entra na região de alcance do leitor, esse sinal reflete na etiqueta acoplada, modulado pela informação contida na mesma. Ao retornar para o leitor, o sinal refletido é repassado para o processador que fará a extração e tratamento desses dados (Rao e outros, 2005).

Figura 6 - Estrutura básica de um sistema RFID.



Fonte: Morais, 2019.

O mesmo leitor pode se comunicar com mais de uma etiqueta simultaneamente, da mesma forma que um sistema RFID pode consistir em diversos leitores espalhados ao longo de um ambiente, todos conectados a um mesmo controlador. A comunicação simultânea permite a leitura de milhares de etiquetas por segundo, com uma eficiência acima de 98% (Hunt; Puglia; Puglia, 2006). Uma das principais vantagens do RFID quando comparado a outras técnicas de identificação, como o código de barras, é a dispensabilidade de visada direta entre a etiqueta e a antena do leitor. Associada à eficiência conseguida com a comunicação simultânea, essa tecnologia permite uma verdadeira revolução nos processos de identificação conhecidos atualmente (Morais, 2019).

2.2.1.1 ETIQUETAS

A etiqueta, muitas vezes chamada de *transponder*, é o elemento mais representativo de um sistema RFID, uma vez que é utilizada para marcar o item de identificação. Sua principal função é a de armazenar as informações e transmiti-las para o leitor. Na sua forma básica, uma etiqueta RFID é composta por uma antena e um circuito

integrado, e pode ainda conter ou não uma bateria acoplada, permitindo classificá-la em etiqueta passiva ou ativa (Hunt; Puglia; Puglia, 2006).

Uma etiqueta é dita passiva quando não possui uma fonte de alimentação própria. Toda a energia necessária para operação (excitação do *chip* e transmissão da informação) é adquirida a partir do sinal de interrogação enviado pelo leitor. Sendo assim, a energia emitida pelo leitor é utilizada para transmitir em ambas as direções de comunicação (leitor-etiqueta e etiqueta-leitor), o que significa que uma etiqueta passiva fora da região de alcance do leitor não possui energia para enviar sinais (Finkenzeller, 2010).

Etiquetas ativas, por sua vez, são aquelas que possuem uma fonte de alimentação acoplada à sua estrutura. Essa energia é utilizada para excitar o *chip*, de forma que o sinal enviado pelo leitor é modulado pela informação armazenada nesse e refletido de volta ao leitor. Devido ao acréscimo dessa parcela de energia ao sistema, o alcance efetivo dos sistemas RFID ativos normalmente são maiores, assim como seu custo de produção (Finkenzeller, 2010).

As etiquetas podem ainda ser classificadas como semi-passivas, quando se comunicam da mesma forma que as etiquetas passivas, no entanto, possuem uma bateria para alimentação de sensores externos e semi-ativas quando a fonte de alimentação acoplada atua apenas após a recepção do sinal de interrogação do leitor (Ramos; Lazaro; Girbau, 2013).

2.2.1.2 COMPONENTES DE UMA ETIQUETA RFID COM *CHIP*

A etiqueta RFID com *chip* é normalmente composta por três elementos: o circuito integrado, a antena e o substrato (Fonsêca, 2020):

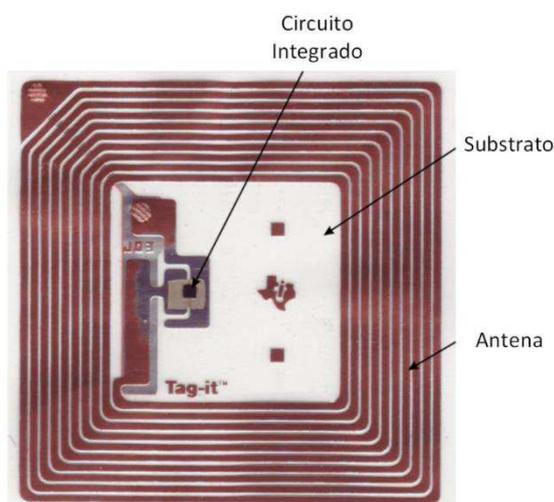
- **Circuito Integrado:** esse componente é um circuito eletrônico ou microchip de aplicação específica, sendo a parte principal da etiqueta RFID. O microchip contém um armazenamento de memória e um microprocessador ou unidade de tomada de decisões lógicas. O circuito integrado é configurado como um dispositivo de alimentação passiva (alimentado por acoplamento indutivo gerado a partir de outro dispositivo de alimentação própria) ou como um dispositivo de alimentação ativa (alimentado por um reservatório de energia independente ou bateria), com base na implementação desejada para a etiqueta. Além de codificar e decodificar

o protocolo de comunicação, sua função é transmitir o identificador único ou outra informação contida em sua memória;

- Antena: a antena interna é a principal responsável pelo formato, tamanho e aplicação da etiqueta RFID. Esta tem que ser capaz de receber o sinal e transmitir de volta a resposta modulada. De acordo com cada banda de frequência utilizada, o tamanho da antena deve ser adaptado ao comprimento de onda transmitido/recebido. Para as etiquetas RFID passivas, a antena também age como um coletor de energia para alimentar o *chip* a partir da energia do sinal enviado pelo leitor;
- Substrato: o substrato de uma etiqueta RFID é normalmente um polímero fino e flexível ou material plástico que mantém todos os componentes da etiqueta anexados. Outro objetivo do substrato é fornecer resistência a fatores ambientais (por exemplo, produtos químicos, umidade, temperatura, impacto) e dissipar o excesso de carga estática. Também é importante considerar o tipo de material utilizado para o substrato, pois isso pode afetar a durabilidade e a frequência operação da etiqueta. Para que a etiqueta possua alto desempenho, a sua concepção deve levar em conta as propriedades do substrato.

Na Figura 7 pode ser visualizada uma ilustração da etiqueta RFID com *chip* e as indicações dos respectivos componentes.

Figura 7 - Principais componentes de uma etiqueta RFID.



Fonte: Fonsêca, 2020.

Aplicações de etiquetas sem circuito RF, ou seja, sem *chip* (*chiplless*) já são encontradas em pesquisas. A tecnologia RFID sem *chip* surgiu como uma alternativa de baixo custo para o sistema RFID com *chip* e tem potencial para penetrar nos mercados de massa para etiquetagem de itens de baixo custo, considerando o alto custo dos transponders RFID com *chip* de silício em comparação com os códigos de barras ópticos.

2.2.1.3 LEITOR

Os leitores RFID, também denominados de interrogadores, apresentam a função de detectar a presença das etiquetas RFID que estão dentro da sua zona de interrogação (alcance de leitura) e se comunicar com estas. Para realizar a comunicação, o leitor é conectado a uma ou mais antenas, transmitindo e recebendo energia por irradiação eletromagnética (Marques, 2012). O alcance pode ser de poucos centímetros até vários metros, dependendo da frequência de operação e da sua potência. Uma atenção deve ser tomada no caso de sobreposição da zona de interrogação de dois leitores, uma vez que pode haver interferência nos sinais e impedimento na leitura das etiquetas (Angeles, 2005; Marques, 2012).

2.2.1.4 CONTROLADOR

Os controladores são o centro de integração de um sistema RFID, sendo utilizados para interligar uma rede de múltiplos leitores RFID e centralizar o processamento da informação (Hunt; Puglia; Puglia, 2006). Normalmente, o controlador consiste em um computador ou microcontrolador.

2.2.1.5 FAIXAS DE FREQUÊNCIA

Os sistemas RFID podem usar diferentes faixas de frequências para realizar a comunicação, dependendo da sua finalidade. De forma resumida pode-se dividir as faixas de frequências em quatro grandes grupos (Fonsêca, 2020):

- Baixa Frequência (LF) - 30 e 500 kHz: as etiquetas de baixa frequência são comumente utilizadas onde há exposição a líquidos, ruído elétrico ou metais presentes e quando uma taxa de leitura rápida não é necessária. A maioria dos sistemas de baixa frequência opera sem a necessidade de

bateria integrada nas etiquetas, possui distância de leitura curta e custos mais baixos. A faixa mais comum utilizada no rastreamento de animais, imobilizadores de carros, acesso a dispositivos de segurança, rastreamento de ativos, entre outros é a faixa de 125-134 kHz.

- Alta Frequência (HF) - 10 e 15 MHz: as etiquetas de alta frequência comumente utilizadas operam em 13,56 MHz, devido à adoção relativamente ampla de cartões inteligentes baseados na tecnologia RFID. O custo dos sistemas de alta frequência ainda é considerado baixo, mas superior aos sistemas de baixa frequência. Esses sistemas viabilizam uma distância de leitura mais longa e maiores velocidades de leitura, comparativamente aos sistemas de baixa frequência. Os sistemas de alta frequência são normalmente utilizados em controle de acesso e cartões inteligentes.
- Ultra Alta Frequência (UHF) - 860 e 950 MHz: esse sistema têm custos mais elevados em comparação com os outros. As etiquetas de ultra alta frequência são consideradas as mais adequadas ao rastreamento de objetos, pois oferecem um bom equilíbrio entre o alcance (até 20 m), uma alta velocidade de leitura e a capacidade de ler várias etiquetas simultaneamente. Ao contrário de outros sistemas, a orientação espacial necessária para a comunicação entre o leitor RFID e as etiquetas são bem mais flexíveis. Por terem um alcance de leitura mais longo, os sistemas UHF são normalmente utilizados para aplicações como rastreamento de vagões e cobrança automatizada de pedágio.
- Micro-ondas - 2,45 GHz ou 5,8 GHz: A faixa de frequência de micro-ondas, na qual os sistemas RFID, operam não possuem licenciamento vigente, permitindo que esses sistemas sejam utilizados globalmente. No entanto, as bandas de frequência estão lotadas e podem sofrer interferências, pois muitos dispositivos, como telefones sem fio e fornos de micro-ondas, operam nessas frequências. Os sistemas RFID que operam nessa banda de frequência são baseados nos princípios de acoplamento radiativo de campo distante ou retroespalhamento acoplado. Eles têm comprimentos de onda curtos e, portanto, podem ser utilizados

com metais. Eles usam uma mistura de etiquetas passivas, assistidas por bateria e ativas, com base no que a aplicação exige. Essas etiquetas também têm uma faixa ainda mais ampla de leitura, podendo chegar a centenas de metros. O intervalo de leitura para as etiquetas RFID ativas em micro-ondas é significativamente maior comparativamente às etiquetas passivas.

De forma simplificada, os sistemas que operam nas baixas frequências utilizam campos próximos e acoplamento indutivo para realizar a comunicação e o alcance de leitura é pequeno. Os sistemas que operam nas altas frequências utilizam acoplamento eletromagnético para sua comunicação e possuem um alcance de leitura maior. Dentre esses últimos, o sistema UHF é preferível, uma vez que permite a utilização de etiquetas passivas (Petrariu; Popa; Chirap, 2015). A frequência RFID UHF de operação no Brasil é a mesma frequência americana e dos Estados Unidos, de 915 MHz, enquanto na Europa é de 870 MHz (Finkenzeller, 2010).

A escolha da frequência de operação influi diretamente nas características do sistema, tais como: região de alcance, taxa de dados, tamanho e tipo da antena, preço, capacidade de interferência em outros sistemas via rádio, dentre outros (Hunt; Puglia; Puglia, 2006).

2.2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Nesta subseção, são introduzidos os conceitos dos principais dos parâmetros utilizados na avaliação do desempenho de um sistema RFID, incluindo diagrama de irradiação, ganho, impedância de entrada, e o alcance.

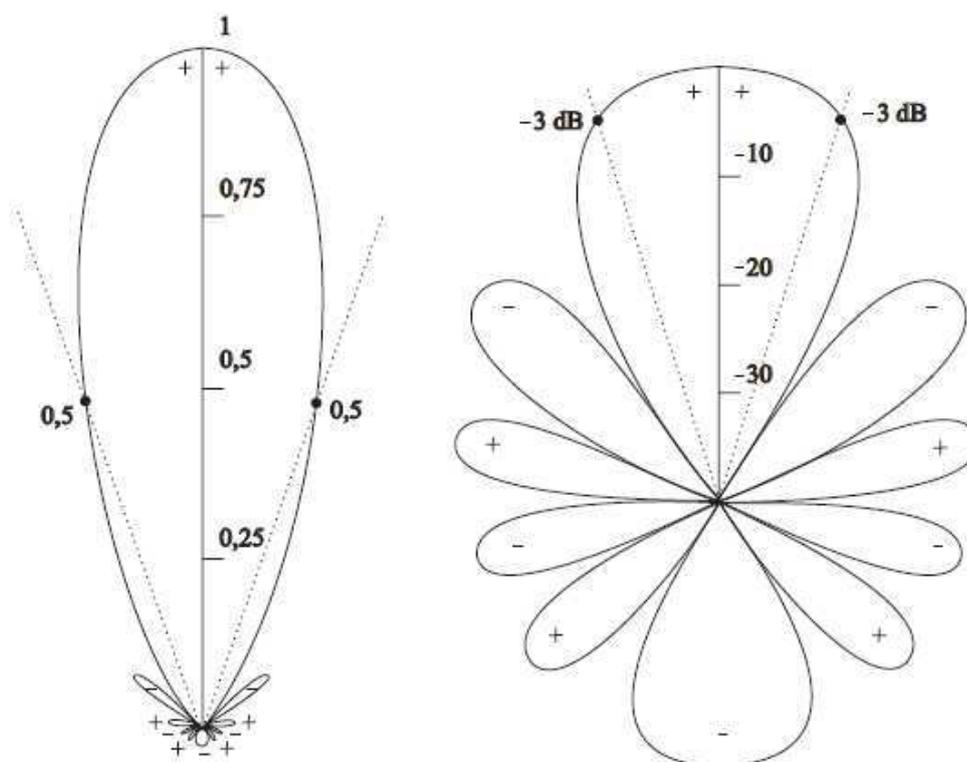
2.2.2.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação de uma antena pode ser definido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de irradiação em função do espaço de coordenadas (Kraus, 1988). Em geral, o diagrama de irradiação é determinado na região de campo distante e é representado como função das coordenadas direcionais. Os diagramas de irradiação apresentam informações, de modo normalizado, a respeito dos indicadores de desempenho de antenas, tais como: potência de irradiação, intensidade de

campos eletromagnéticos, diretividade, ganho e polarização. Para alguns diagramas de irradiação, como o de ganho, por exemplo, é usual a representação em escala logarítmica, o que permite maior detalhamento a respeito do desempenho da antena (Xavier, 2021).

Um exemplo gráfico de diagrama de irradiação, tanto para a escala linear quanto para logarítmica, é apresentado na Figura 8.

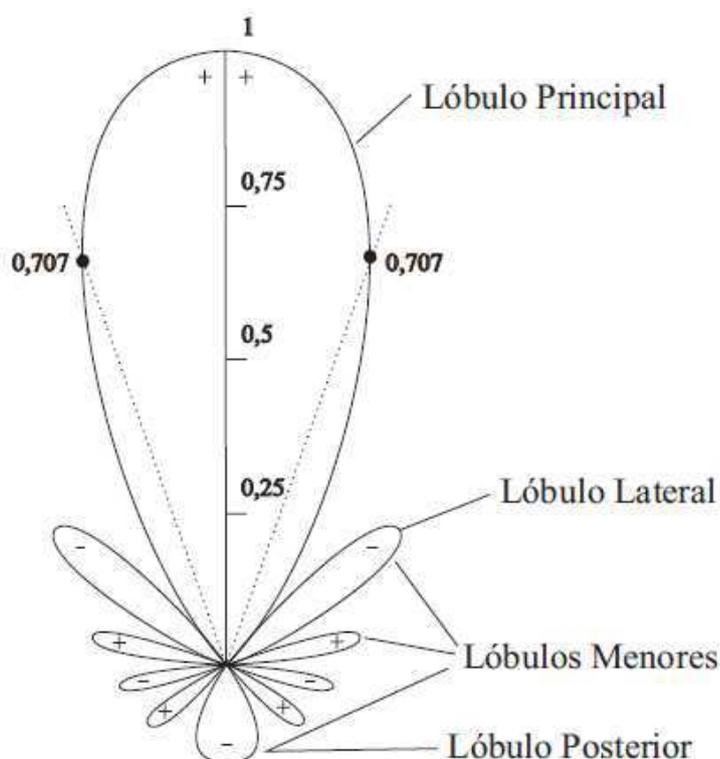
Figura 8 - Padrões de radiação em escala linear e logarítmica, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

Conforme pode ser visto na Figura 8, o diagrama de irradiação é composto por vários lóbulos, os quais são definidos como uma porção do diagrama que é limitada por regiões de baixa intensidade de irradiação (Kraus, 1988). O lóbulo de maior intensidade é designado como lóbulo principal, enquanto os demais são classificados como menores ou secundários. A depender da posição e intensidade em relação ao lóbulo principal, os lóbulos menores são subdivididos em laterais e posteriores, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Lóbulos de um padrão de radiação.



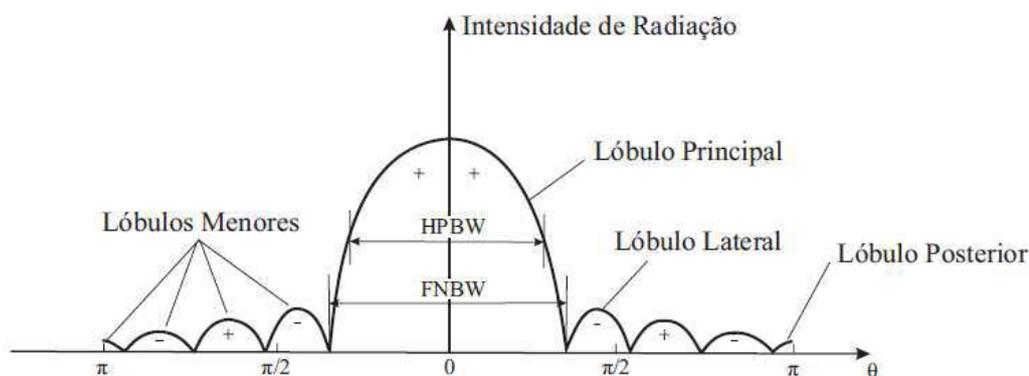
Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

Os lóbulos menores representam irradiações em direções indesejadas, resultando em perdas de desempenho direcional da antena. Os lóbulos laterais são aqueles que possuem maior intensidade, enquanto o lóbulo posterior é aquele que ocupa o hemisfério na direção oposta ao principal.

A partir do lóbulo principal, pode-se estimar o parâmetro definido como *beamwidth*, ou largura de feixe. A largura de feixe de uma antena pode ser definida como a separação angular entre dois pontos idênticos localizados em lados opostos do lóbulo principal (Balanis, 2005). A maneira mais comum de expressar a largura de feixe é por meio dos pontos que representam a metade do valor de intensidade máxima de irradiação no lóbulo principal. Esta forma de representação da largura de feixe é conhecida como HPBW (do inglês: *Half Power Beamwidth*).

A largura de feixe também pode ser representada pela separação angular entre os primeiros nulos do diagrama de irradiação, sendo designada como FNBW (do inglês: *First Null Beamwidth*). Ambas as formas de representação da largura de feixe podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10 - Representação da HPBW e FNBW.



Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

A largura de feixe de uma antena representa a relação entre o lóbulo principal e os menores, pois, quanto maior a largura de feixe, menor será a intensidade dos lóbulos menores e vice-versa. Portanto, a largura de feixe pode ser utilizada como um indicador de desempenho da antena, visto que é desejável a minimização de lóbulos menores para maximização da capacidade de detecção de uma antena em determinada direção.

2.2.2.2 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

A impedância de entrada (Z_{in}) de uma antena é a impedância medida nos seus terminais de entrada e pode ser obtida pela razão entre a tensão e a corrente nos seus terminais, podendo ser representada como (Balanis, 2005):

$$Z_{in} = R_A + jX_A, \quad (2.6)$$

em que R_A é a resistência da antena nos terminais e X_A é a reatância da antena em seus terminais.

A fim de um adequado casamento de impedância, é necessário que o valor da impedância da linha de transmissão (Z_0) seja o mais próximo possível ou mesmo igual ao conjugado da impedância de entrada da antena (Z_{in}), o que permite uma boa transferência de potência entre o transmissor e a antena ou entre a antena e o receptor (Fernandes, 2016).

2.2.2.3 GANHO

O ganho, em uma determinada direção, pode ser definido como a razão entre a intensidade máxima de irradiação obtida pela antena e a intensidade de irradiação que seria obtida se a potência de entrada fosse irradiada isotropicamente (Kraus, 1988).

Matematicamente,

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}, \quad (2.7)$$

em que $U(\theta, \phi)$ representa a intensidade de irradiação na direção específica e P_{in} a potência de entrada da antena que, quando dividida por 4π , define a potência que seria irradiada igualmente em todas as direções caso a antena fosse isotrópica (Balanis, 2005).

2.2.2.4 ALCANCE DE LEITURA

O alcance de leitura teórico é representado pela equação de transmissão de Friis, na qual são relacionadas a potência recebida e a potência transmitida entre duas antenas que estão separadas por uma distância determinada.

O alcance de leitura (AL) de uma etiqueta RFID é definido pela expressão (Paredes e outros, 2018):

$$AL = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP \times G \times \tau}{P_c}}, \quad (2.8)$$

em que λ representa o comprimento de onda, EIRP a potência equivalente isotropicamente irradiada (do inglês, *Equivalent Isotropic Radiated Power*), determinada por regulações locais (por exemplo, 3,3 W na Europa e 4 W nas Américas) e G o ganho da etiqueta. Ademais, τ representa o coeficiente de transmissão, que pode ser calculado a partir do coeficiente de reflexão S_{11} como sendo $\tau = 1 - |S_{11}|^2$ e P_c a potência mínima necessária para ativar o *chip* (Paredes e outros, 2018).

2.2.2.5 INDICADOR DA INTENSIDADE DO SINAL RECEBIDO

O indicador da força do sinal recebido (do inglês, *Received Signal Strength Indicator* ou RSSI) é um índice que quantifica a potência do sinal de retroespalhamento

da etiqueta para o leitor. As causas para variações nesse parâmetro incluem (Chapre e outros, 2013; Morais, 2019):

- Equipamento: orientação, direção e tipo da antena;
- Espacial: distância entre o transmissor e o receptor;
- Temporal: tempo e período de medição;
- Interferência: interferência RF de dispositivos próximos operando na mesma frequência;
- Humano: presença ou não do usuário, orientação e mobilidade.

2.2.2.6 REGULAMENTAÇÃO E PADRÃO

A etiqueta RFID proporciona o gerenciamento físico da comunicação (frequência, taxa de transferência, modulação, entre outros.) e a gestão lógica da troca (protocolo) e o armazenamento de dados. No atual mundo globalizado, uma vez que os produtos rastreáveis em cadeia de produção podem viajar pelo mundo, é necessário que um padrão garanta a interoperabilidade dos sistemas. Atualmente, o padrão do protocolo de comunicação majoritariamente adotado pelos fabricantes de *chips* RFID é o EPC Global Standards (Fonsêca, 2020). O EPC Global Standards apresenta cinco categorias distintas para as etiquetas RFID:

- Classe 0: apenas leitura. O código é gravado durante o processo de manufatura;
- Classe 1: apenas leitura, mas permite uma única gravação de dados. O código pode vir programado de fábrica, mas o usuário poderá regrava-lo apenas uma única vez;
- Classe 2: leitura e gravação. Permite a regravação do código múltiplas vezes;

- Classe 3: leitura e gravação. Possui sensores integrados capazes de registrar parâmetros como temperatura, pressão e movimento. Pode ser semipassiva ou ativa;
- Classe 4: leitura e gravação. Essa classe abrange etiquetas ativas com transmissores integrados. Podem se comunicar tanto com outras etiquetas quanto leitores;
- Classe 5: semelhante às etiquetas da Classe 4, mas com uma funcionalidade adicional: podem fornecer energia a outras etiquetas e se comunicar com dispositivos que não sejam leitores, inclusive etiquetas passivas. Conceitualmente podem ser classificadas como leitores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica contemplando trabalhos essenciais ao desenvolvimento da pesquisa. Para tanto, são apresentados os principais trabalhos referentes aos estudos de diagnóstico de poluição em isoladores elétricos baseados em medições de radiofrequência (RF), em especial pesquisas em que os isoladores foram instalados em torres de alta tensão. Também são apresentados trabalhos que discorrem sobre a aplicação de etiquetas RFID em ambientes de alta tensão. Por fim, na subseção 3.1 é apresentado o quadro sinóptico da revisão bibliográfica realizada, destacando quais as contribuições desta tese para o estado da arte na área de identificação de poluição via etiqueta RFID em torres metálicas de alta tensão.

Na literatura existem estudos que abordam diversas técnicas/métodos de diagnósticos e monitoramento de poluição em isoladores, tais como: corrente de fuga, como abordado por (Khalifa e outros, 1988; Garcia e outros, 1988; George, 2019); ruído ultrassônico, conforme estudado por (Ferreira, 2011); aquecimento (termografia), como pesquisado por (Xinliang & Xia, 2010; Liu e outros, 2012). Sendo assim, considerando as inúmeras pesquisas sobre monitoramento e diagnóstico de isoladores, bem como os objetivos traçados neste trabalho de tese, a revisão apresentada foca inicialmente na exposição dos principais trabalhos que utilizam dados de medições de radiofrequência (RF).

A ideia em se estimar o estado de depósito de poluição em torres de alta tensão por meio de ondas de RF pode refletir no diagnóstico do estado operacional de isoladores instalados nas torres. As primeiras pesquisas que analisaram as perturbações no campo eletromagnético originadas por descargas parciais em condutores e equipamentos de alta tensão fundamentaram estudos para diagnosticar o estado operacional de isoladores a partir de ondas de RF.

Na abordagem dos estudos iniciais sobre irradiação de ondas eletromagnéticas (OEM) em linhas de transmissão, Slemon (1949) em sua pesquisa analisou os impactos que o efeito corona proporciona na geração de ondas de radiofrequência. O autor relatou vários experimentos em campo, cujo objetivo era determinar as condições para que acontecesse o fenômeno da irradiação eletromagnética.

Sequencialmente, Adams (1956) em seu trabalho buscou descrever matematicamente o mecanismo pelo qual a onda que se propaga ao longo de uma linha poderia interferir em sistemas de recepção de rádio. O autor descreveu em detalhes os testes realizados, bem como

realizou uma comparação do nível de interferência de duas linhas com o mesmo condutor, diferenciando-se apenas na disposição dos cabos, sendo uma horizontal e outra vertical. Pode ser constatado que a partir do trabalho de Adams (1956), a literatura passou a considerar o problema da interferência que as linhas de transmissão poderiam provocar em sistemas de rádio. Assim, trabalhos posteriores passaram a analisar as consequências das propagações de ondas EM por linhas de alta tensão.

Em uma outra linha de abordagem, Heintz (1959) apresentou em seu artigo os primeiros estudos acerca do espectro de frequência gerado pela presença de corona em condutores. Nos experimentos, o autor relatou que, para a medição, foi utilizado um espectrômetro de alta frequência, além de osciloscópio. Após a leitura do espectrômetro, com o auxílio da transformada de Fourier, foi obtida a forma do pulso original que originou o pulso de descarga. O referido trabalho possibilitou o desenvolvimento de outras pesquisas no que tange à análise por componentes de frequência.

No trabalho de El-Debeiky e Khalifa (1971), os autores realizaram uma exposição mais detalhada das características da corona, incluindo o equacionamento das formas de pulso positivo e negativo, a variação de amplitude, além dos espectros de RF. Embora tenham realizado várias simplificações em seus cálculos, os resultados obtidos a partir dos modelos matemáticos foram validados com dados experimentais. Até então, o estudo das emissões de RF abrangia, principalmente, apenas os condutores.

Riviere e outros (1976) publicaram um trabalho sobre geração de RF focado especificamente em isoladores, no qual foi estudado a irradiação OEM por isoladores em linhas de transmissão. O referido trabalho foi relativamente extenso, e incluiu, primeiramente, um resumo de todo conteúdo de trabalhos anteriores sobre o tema. Além disso, foram feitos experimentos com isoladores poluídos naturalmente e artificialmente, e por fim, foi proposto um método para determinar os níveis de ruídos de RF aceitáveis para isoladores. A partir de então, as pesquisas relacionadas ao tema foram direcionadas para o desenvolvimento de sensores que detectassem a ocorrência de descargas parciais em isoladores, a partir da medição da irradiação OEM.

Várias outras pesquisas foram conduzidas com objetivo de desenvolver meios de monitoramento da corrente de fuga em isoladores, baseados em medições da amplitude da corrente, contagem da frequência de surtos, e estimação da condutância da camada de poluição sobre o isolador. Nesse contexto, Anis e outros (1986) propuseram um novo método de avaliação da poluição em isoladores baseado na irradiação OEM originada pela presença da corrente de fuga. Foram testados isoladores poluídos artificialmente, com diferentes valores de condutividade elétrica, em uma câmara de névoa. Os autores projetaram um

sistema de detecção, com frequência de 0,5 MHz até 100 MHz, composto por um circuito de amplificação de sinal e processamento. No estágio de processamento, fazia soar um alarme caso os valores de referência fossem ultrapassados. A principal vantagem do método proposto foi a possibilidade de se realizar a avaliação do isolador de forma não-invasiva, sem a necessidade de interrupção do sistema elétrico.

Ainda com relação às pesquisas sobre detecção de irradiações OEM originadas por isoladores, Mattos e outros (1996) desenvolveram uma nova técnica para a medição dos campos OEM produzidos por isoladores em LT. O diferencial do trabalho foi a realização de medições dos sinais nos domínios do tempo e da frequência, sendo possível caracterizar melhor o sinal e identificar com maior precisão o tipo da fonte de descarga. Os autores realizaram experimentos em laboratório com isoladores novos e quebrados, com objetivo de obter os dois tipos de padrões de irradiação OEM. Nos resultados, foi constatado que os ruídos de RF originados pelas descargas ocorriam sempre em torno de 11,8 MHz.

Com o aumento da tecnologia disponível nos equipamentos de medição e o aprimoramento das técnicas empregadas em experimentos foi possível a idealização de estudos que investigassem outras faixas de frequência de RF, conforme descrito sequencialmente.

Stewart e outros (1999) realizaram experimentos de medição de RF na faixa de 0 MHz até 60 MHz, apenas no domínio da frequência. No estudo, foram empregados isoladores cerâmicos e poliméricos, sendo possível avaliar o padrão de irradiação de ambos. Devido à presença de estações emissoras na faixa de frequência analisada, para se obter o sinal irradiado do isolador, foi necessário fazer a diferença dos sinais coletados com o isolador desenergizado (ruído de fundo), com o outro quando o isolador está energizado. Os resultados obtidos, na referida pesquisa, indicam a irradiação de RF nas frequências em torno de 21 MHz, 30 MHz e 36 MHz, no isolador polimérico, enquanto no isolador de cerâmico foi constatada a irradiação nas frequências em torno de 16,8 MHz, 33 MHz, 36 MHz, 48 MHz. Estes resultados estão de acordo com as pesquisas realizadas anteriormente, visto que nelas eram utilizados apenas isoladores cerâmicos. Com intuito de expandir o conceito de análise de descargas por meio da irradiação OEM, alguns estudos voltaram a focar em outras fontes de descargas.

Raja e outros (2002) em sua pesquisa reconheceram, por meio da irradiação de RF, diversos tipos de descargas parciais (DP) que poderiam ocorrer entre dielétricos. No referido trabalho, a partir de modelos reduzidos, foram realizados experimentos de geração de DP óleo-ar em configuração ponta-plano, além de descargas superficiais em um dielétrico em configuração plano-plano. Os autores realizaram a coleta de sinais na faixa de 200 MHz até

1.500 MHz. Como resultado da pesquisa, foi possível identificar padrões de irradiação de RF (assinatura espectral) distintas, de acordo com o tipo de DP gerada. Este estudo foi importante pois, além de abranger uma larga faixa de frequência, também foi constatado que o padrão espectral irradiado de DP se altera em relação ao tipo de descarga.

Portugués e outros (2002) em seu trabalho além de detectar a DP, eles estimaram a localização espacial em que se encontrava a fonte da descarga, a partir de um arranjo de 4 antenas monopolo. A frequência de resposta das antenas era centrada em 2,0 GHz. O sistema desenvolvido na pesquisa alcançou resultados satisfatórios e promissores, visto que se tratava de um protótipo inicial, com erro máximo de 0,15 m do local real da fonte para o local estimado pelo método. Embora os autores tenham relatado uma aplicação do método para identificar interferência de RF em equipamentos eletrônicos domésticos, a aplicabilidade do método pôde alcançar várias outras possibilidades.

Na mesma linha de pesquisa de Português e outros (2002), Moore e outros (2004) desenvolveram uma metodologia de ensaios em campo para localização de fontes de DP em isoladores de LT, a partir de medições de RF. Os autores instalaram um arranjo de 4 antenas sobre um veículo, tornando mais eficiente o procedimento de medição de RF. As medições foram realizadas com um osciloscópio que capturava os sinais até a frequência de 1,0 GHz. Uma dificuldade encontrada nas medições dos autores diz respeito ao baixo nível de sinal recebido, o que acarretou incertezas com relação à exatidão do método, visto que não foi possível afirmar com segurança se foi identificado corretamente o componente defeituoso.

Azordegan e outros (2010) realizaram um estudo considerando dois isoladores de porcelana de linhas de distribuição, um poluído artificialmente e outro quebrado intencionalmente. Nos experimentos em laboratório, foram coletados os sinais de irradiação eletromagnética a partir de uma sonda pontual de campo elétrico e uma antena corneta, ambas conectadas em um osciloscópio. Para a apresentação dos resultados, os autores fizeram uma análise nos domínios tempo-frequência, com o gráfico do tipo espectrograma, no qual é possível identificar as componentes de frequência coletadas ao longo do tempo. Foi feita a quantificação de descargas ocorridas em função do ângulo de fase da tensão em cada ciclo, e ao final, foi calculada a média em relação ao total de ciclos capturados. Como conclusão, foi constatado que as irradiações EM foram mais intensas no final do semiciclo positivo para o isolador quebrado, enquanto no isolador poluído foram no semiciclo negativo.

Shurrab e outros (2012), em sua pesquisa, inovaram ao utilizar uma rede neural artificial (RNA) com objetivo de classificar diferentes tipos de DP originadas em uma amostra de borracha de silicone (SIR). Para extração dos atributos dos sinais, foram utilizados os coeficientes da transformada discreta de Fourier e os parâmetros estatísticos média,

variância, curtose e assimetria. A faixa de frequência investigada foi de 10 MHz até 150 MHz. Para a melhor avaliação de toda a faixa, segmentou-se a análise do método por subfaixas de frequência. Os melhores resultados do método classificador foram nas faixas de 10 MHz a 18 MHz, 26 MHz a 28 MHz e 67 MHz a 69 MHz, com taxa de 92,8% de acertos. Embora a pesquisa não tenha utilizado isoladores reais, sua principal contribuição foi a introdução de um método computacional de classificação, baseado em inteligência artificial (IA), para processar os dados obtidos. Dessa forma, o processamento e interpretação dos dados foi mais objetivo, dispensando a análise subjetiva dos gráficos, que antes era feita de forma visual.

Giussani e outros (2012) implementaram um estudo a partir da coleta do sinal de RF irradiado devido à ocorrência de corona em uma câmara de vácuo. Na pesquisa, foi investigada a influência da pressão local sobre a irradiação de RF na faixa de 25 MHz até 2,5 GHz. As fontes de corona utilizadas nos testes foram duas amostras de configuração lâmina-plano, espaçadas de 3 e 6 mm, e as medições ocorreram no domínio do tempo. Posteriormente, foram calculadas as componentes de frequência a partir da transformada de Fourier. Na conclusão, os autores relataram que não houve alteração no sinal de RF coletado em função da variação da pressão atmosférica local.

Anjum e outros (2014) investigaram alguns casos de defeitos em isoladores cerâmicos, analisando-os sob o ponto de vista dos padrões de irradiação de RF originados. Quatro possíveis fontes de DP foram utilizadas: um disco parcialmente quebrado; um disco com um furo na parte superior; um disco totalmente quebrado; e uma fonte de corona de configuração ponta-plano. A antena utilizada cobriu a faixa de 1,0 GHz a 2,0 GHz. Foram testados dois métodos de classificação, um estatístico, baseado em Máquina de Vetor de Suporte (MVS), e outro baseado em RNA. Como técnica de eliminação de ruído foi utilizada a transformada *wavelet* discreta e selecionado o terceiro nível de coeficientes de aproximação. Para a extração dos atributos dos sinais, utilizou-se seis medidas estatísticas: média; desvio padrão; moda; mediana; curtose; e assimetria. Os autores concluíram que o classificador que obteve melhor resultado foi o baseado em RNA, com acurácia de 95%. No referido trabalho, foi possível identificar padrões de irradiação de RF de isoladores, e discriminá-los em uma faixa de frequência acima de 1,0 GHz. Essa constatação é importante pois possibilita a confecção de antenas de tamanho reduzido. Adicionalmente, outra contribuição foi a comparação dos resultados de dois métodos de classificação, comprovando que o baseado em RNA se mostrou mais eficaz.

Jiang e outros (2015) em sua pesquisa apresentaram um método inovador de estimação de poluição em isoladores. A partir de conceitos de reflectometria de micro-ondas, o método proposto se baseia na medição da energia refletida na camada de poluição do

isolador, devido a incidência de uma fonte de sinal de 10,45 GHz. Uma antena emissora é direcionada à superfície do isolador, enquanto uma outra antena (receptora) é posicionada de forma a captar o sinal refletido no isolador. Os autores descreveram um modelo teórico que relaciona a energia refletida com o nível equivalente da densidade de deposição de sal equivalente (DDSE) na superfície do isolador. Nos resultados experimentais obtidos em laboratório, os pesquisadores demonstraram que o reflectômetro foi capaz de distinguir os sinais relativos às amostras com diferentes níveis de poluição em condições secas. Embora haja um grande potencial no método, o mesmo ainda possui alguns desafios como, por exemplo, em relação ao complexo sistema de transmissão e recepção dos sinais que necessita de altíssima precisão. Somado a isto, tem-se o efeito que a rugosidade da superfície do isolador provoca ao refletir o sinal em outras direções, além do difícil posicionamento das antenas, que devem ser alocadas precisamente para que a antena receptora consiga captar o sinal refletido. Esses desafios elencados se referem, apenas, com relação aos experimentos em laboratório, pois em campo, com certeza, deverão existir outros mais complexos.

Anjum e outros (2015), em seu estudo, realizaram medições externas com os mesmos isoladores defeituosos já relatados na pesquisa de Anjum outros (2014). Na pesquisa do ano de 2015, a cadeia de isoladores cerâmicos defeituosos foi instalada no alto de uma torre específica para testes, com aproximadamente 12 metros de altura. Nas medições, a distância da antena até a cadeia de isoladores variou entre 5 e 10 metros. Para isso, utilizou-se um caminhão com cesto aéreo isolado, que possibilitou a aproximação da antena até o objeto de teste. O algoritmo classificador utilizado foi baseado em RNA, e para a extração dos atributos dos sinais, foi empregada a transformada *wavelet*, juntamente com cálculo de parâmetros estatísticos. A RNA foi alimentada com parâmetros referentes aos valores de entropia, curtose, assimetria e energia de cada um dos coeficientes *wavelet*, até o terceiro nível. Como conclusões, os autores relataram que a taxa de acerto foi de aproximadamente 90% na identificação dos defeitos nos isoladores. Ao analisar o trabalho desenvolvido, salienta-se que, embora tenham sido feitas medições em ambiente externo, a metodologia ainda não contemplou as condições reais de medições em campo. Além disso, as medições ocorreram a uma distância muito próxima à cadeia de isoladores, com auxílio de um caminhão do tipo cesta. Portanto, ainda não foi possível avaliar o método em condições mais próximas da realidade encontrada em campo.

Jiang e outros (2016) realizaram um estudo contemplando experimentos com cadeias de isoladores cerâmicos em uma câmara de névoa. Foram testadas três cadeias, diferenciando-se em relação ao grau de poluição que se encontravam: limpa; levemente poluída (DDSE – 0,0356 mg/cm²); e muito poluída (DDSE – 0,1138 mg/cm²). No interior da câmara, foi

posicionada uma antena e o sinal no domínio da frequência foi coletado na faixa de 50 MHz a 1,0 GHz. Para fins comparativos, foram feitos experimentos na câmara de névoa em condições secas e com alta umidade. Os resultados demonstraram que os sinais de RF apresentavam alteração significativa, de acordo com tipo de poluição, apenas após a superfície do isolador ser molhada. Em condições secas, o padrão espectral coletado praticamente não apresentava distinção em relação às medições dos três tipos de isoladores testados.

Rocha e outros (2019) em sua pesquisa apresentaram um método de diagnóstico de isoladores de alta tensão a partir da análise da irradiação de RF do isolador. Para tanto, ao longo da pesquisa, foram empregadas técnicas de processamento espectral de sinais, como a transformada *wavelet*, e um classificador baseado em RNA. A configuração do método que se mostrou mais eficiente foi com a extração dos coeficientes *wavelet* do terceiro nível, em que foram calculados os parâmetros: média; desvio padrão; coeficiente de variação; e área da região do gráfico das envoltórias máxima e mínima do sinal de RF. Os isoladores foram analisados em campo durante 12 meses por meio dos índices de DDSE e DDNS. O método proposto foi avaliado considerando três possíveis classes de saída, as quais representam os níveis de criticidade de poluição: leve; médio; e pesado. Como conclusões, os autores relataram que a classificação via RNA resultou em uma taxa de sucesso de aproximadamente 95% na faixa de frequência de 1,2 a 1,4 GHz.

Orellana e outros (2023) propuseram uma análise da série temporal de descargas parciais medidas com uma antena em condição de poluição crescente até a descarga elétrica. Utilizaram um algoritmo de aprendizagem profunda para identificar os primeiros sinais de uma descarga elétrica incidente. O *flashover* foi produzido aumentando gradualmente a poluição sobre um isolador e em seguida realizava-se uma classificação binária de sinais, de baixo ou alto perigo. Os autores testaram diferentes limites de tempo e concluíram que as descargas parciais medidas com as antenas podem ser utilizadas para a detecção precoce de *flashover* promovido por poluição. O limite de tempo de 70% do tempo total do experimento apresentou o melhor resultado, sendo perceptível a transição de sinais de perigo de baixo para alto antes da ocorrência do *flashover*.

Considerando a vasta aplicabilidade da tecnologia RFID, bem como toda a abordagem acerca dos estudos de diagnóstico de poluição em isoladores elétricos baseados em medições de radiofrequência, algumas poucas pesquisas idealizaram aplicações de etiquetas RFID UHF no sistema elétrico de potência, conforme descrito sequencialmente.

A utilização de etiquetas RFID UHF em torres de alta tensão teve sua primeira aplicação no estudo de Deng e outros (2020), no qual os autores propuseram um método de identificação de vibração de ruptura externa de torre de linha de transmissão baseado em um sensor de identificação por radiofrequência (RFID) e aprendizado profundo. O sensor RFID foi projetado para obter o sinal de vibração da torre da linha de transmissão. Com o objetivo de obter o monitoramento de longo prazo e maior alcance de trabalho, a etiqueta RFID proposta emprega uma célula fotovoltaica combinada com um capacitor como módulo de gerenciamento de energia. A rede neural de convolução (CNN) e máquina de vetor de relevância (RVM) foram adotadas para extrair as características dos sinais de vibração e obter a identificação do padrão de vibração, respectivamente. Os resultados dos experimentos demonstraram que a sensibilidade mínima da etiqueta RFID movido a energia solar foi de - 29 dBm e a duração da descarga do capacitor foi de 63,35 h quando a frequência de consulta é de 5 vezes por minuto.

Ainda no contexto de aplicação das etiquetas RFID UHF em torres de alta tensão, na pesquisa de Ou e outros (2021) foi projetado um sensor de deformação de baixa potência para monitoramento em tempo real dos dados de deformação das torres de transmissão a partir da tecnologia RFID. Os sensores de tensão de baixa potência foram inseridos nos quatro pés da torre a ser medida, sendo adquiridas as informações de deformação da torre em intervalos fixos, como por exemplo 12 horas. No projeto, as informações são armazenadas em uma memória não volátil. Os dados são lidos e registrados por um leitor portátil, e as informações históricas podem ser transmitidas para um servidor da estação mestra via rede 3G/4G.

Como evolução das etiquetas RFID para medição de temperatura tradicional, Zhang e outros (2022) desenvolveram uma etiqueta RFID anti-metal para medições de temperatura em equipamentos elétricos. A etiqueta anti-metal tem como objetivo solucionar interferência metálica provocadas pela superfície do condutor metálico. Essas interferências podem reduzir a faixa de identificação da etiqueta de medição de temperatura RFID tradicional. O projeto desenvolvido consiste em uma antena interna da etiqueta de medição de temperatura RFID do qual adota o design anti-metal com base na estrutura de curto-circuito. Por meio da simulação no ambiente HFSS, os autores concluíram que a etiqueta de medição de temperatura RFID projetada apresenta boa resistência ao efeito do metal e consequentemente é indicado para aplicação em ambiente metálico complexo.

3.1 SINTETIZAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DESTA PESQUISA

A partir da revisão bibliográfica apresentada pode-se constatar que a temática relacionada aos estudos de diagnóstico de poluição em isoladores elétricos baseados em medições RF é amplamente estudada. Também é inegável que a literatura retrata a vasta aplicabilidade da tecnologia RFID. Em contrapartida, pode ser constatado, também, poucos trabalhos diretamente relacionados com aplicações de etiquetas RFID no sistema elétrico de potência, visto tamanha potencialidade de aplicação.

Adicionalmente, de uma forma geral, é notada uma preocupação dos pesquisadores em escolher/elaborar metodologias/tecnologias que possibilitem o diagnóstico de poluição em isoladores elétricos de forma não-invasiva, eficaz, segura, objetiva e de baixo custo. Assim sendo, neste campo de aplicação, é que esta pesquisa fundamenta seu discernimento.

A fim de sintetizar as contribuições dos trabalhos supracitados, no Quadro 1 são apresentadas as principais referências e contribuições abordadas na revisão bibliográfica, assim como as contribuições desta pesquisa.

Quadro 1. Contribuições constatadas na revisão bibliográfica e nesta pesquisa.

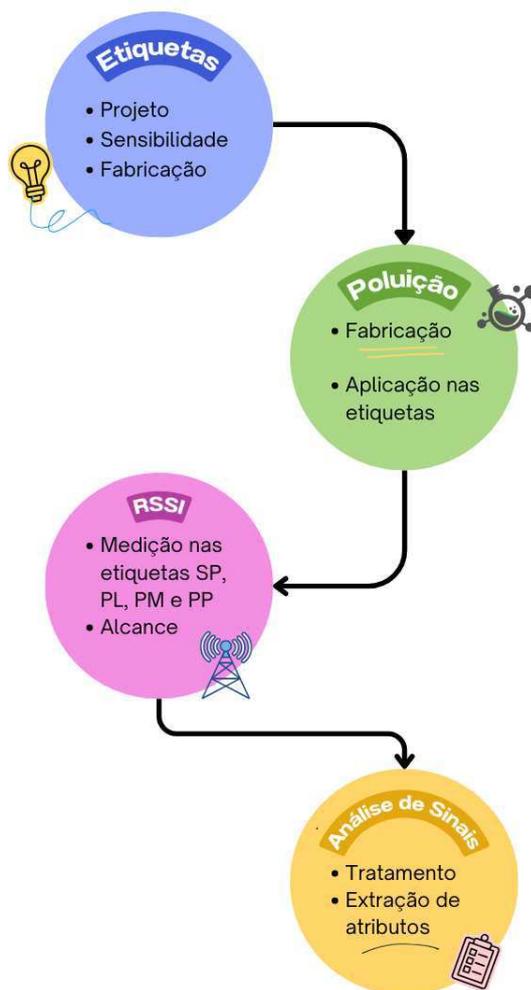
Pesquisadores	Contribuições						
	1	2	3	4	5	6	7
Slemon (1949)	✓						
Adms (1956)	✓						
Heintz (1959)	✓			✓			
El-Debeiky; Khalifa (1971)	✓						
Riviere e outros (1976)	✓	✓	✓				
Anis e outros (1986)	✓	✓	✓	✓			
Mattos e outros (1996)	✓		✓				
Stewart e outros (1999)	✓			✓			
Raja e outros (2002)	✓		✓				
Portugués e outros (2002)	✓		✓	✓			
Moore e outros (2004)	✓		✓	✓			
Azordegan e outros (2010)	✓	✓	✓	✓			
Shurrab e outros (2012)	✓		✓	✓			
Giussani e outros (2012)	✓		✓	✓			
Anjum e outros (2014)	✓		✓	✓	✓		
Jiang e outros (2015)	✓	✓	✓	✓	✓		
Anjum e outros (2015)	✓		✓	✓	✓		
Jiang e outros (2016)	✓	✓	✓				
Rocha e outros (2019)	✓	✓	✓	✓	✓		
Deng e outros (2020)			✓	✓	✓	✓	
Ou e outros (2021)			✓	✓	✓	✓	
Zhang e outros (2022)				✓		✓	
Orellana e outros (2023)	✓		✓	✓	✓		
Esta pesquisa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Descrição das Contribuições							
<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresentação de estudos sobre irradiação de RF em materiais isolantes. 2. Análises de DDSE e DDNS. 3. Experimentos laboratoriais e/ou em campo. 4. Emprego de processamento de sinais. 5. Emprego de métodos de classificação de sinais. 6. Emprego de etiquetas RFID UHF em torres de alta tensão e equipamentos elétricos. 7. Emprego de etiquetas RFID UHF para identificação e monitoramento de poluição. 							

Fonte: Própria autora.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia que será aplicada para o cumprimento dos objetivos traçados nesta tese. A metodologia está baseada em procedimentos para o desenvolvimento de uma etiqueta RFID UHF que promova o monitoramento de poluição em torres de alta tensão. Os procedimentos são: projeto e fabricação das etiquetas; fabricação e aplicação do poluente artificial representativo; aquisição de sinais das etiquetas limpas e poluídas em diferentes distâncias; tratamento dos sinais; e análise estatística a fim de uma indicação de diagnóstico. Para fins de representação da ordem de usabilidade dos procedimentos supracitados foi elaborado um fluxograma, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma representativo do projeto proposto.



Fonte: Própria autora.

A seguir, é apresentada a descrição de cada um dos procedimentos inseridos na Figura 11.

4.1 PROJETO E SIMULAÇÃO DAS ETIQUETAS

Nesta seção são apresentados os procedimentos computacionais para as simulações e processos de projeto das etiquetas RFID UHF. Para tanto, é utilizado o *software* HFSS (do inglês: *High Frequency Structure Simulator*), pertencente à ANSYS Electronics Desktop.

Por meio dos procedimentos computacionais são extraídos os valores de coeficiente de reflexão e de ganho para as etiquetas RFID simuladas sem a adição de poluição e com poluição depositada, com o objetivo de avaliar o impacto nos parâmetros ao aplicar a poluição. Assim, nas subseções seguintes são apresentados os procedimentos relativos à modelagem, projeto e simulação das etiquetas RFID UHF.

4.1.1 MODELAGEM DA ETIQUETA RFID

Na modelagem das etiquetas RFID existem requisitos gerais de design cuja relevância depende da aplicação das etiquetas. Esses requisitos determinam amplamente os critérios para a seleção de uma antena de etiqueta RFID (Rao e outros, 2005; Ferro e outros, 2013; Morais, 2019). Logo, neste trabalho de pesquisa são utilizados os seguintes requisitos:

1. **Banda de frequência.** A banda de frequência de operação desejada depende de regulamentação do país onde a etiqueta será usada. No Brasil, a frequência de operação é 915 MHz.
2. **Tamanho e forma.** A forma e o tamanho da etiqueta devem ser incorporados ou anexados aos objetos necessários ou caber dentro de uma etiqueta impressa. Neste trabalho de tese, a etiqueta deve ser incorporada a uma representação de torre de alta tensão e a poluição característica.
3. **Ler o alcance.** O intervalo de leitura mínimo necessário é geralmente especificado para:

- EIRP. O EIRP é determinado pela regulamentação local de cada país. No caso da América do Sul o valor de EIRP é 4 W.
- Objetos. O desempenho da etiqueta é alterado quando é colocado em objetos diferentes ou quando outros objetos estão presentes nas proximidades do objeto marcado. A antena da etiqueta pode ser projetada ou ajustada para desempenho ideal em um objeto específico ou projetada para ser menos sensível ao conteúdo no qual a etiqueta é colocada. Neste trabalho de proposta de tese, a etiqueta deve ser projetada para ser inserida em torres metálicas de alta tensão.
- Orientação. O alcance da leitura depende da orientação da etiqueta. Algumas aplicações exigem que uma etiqueta tenha um padrão de diretividade específico, como cobertura omnidirecional ou hemisférica. Neste trabalho de tese não é exigido diretividade específica.

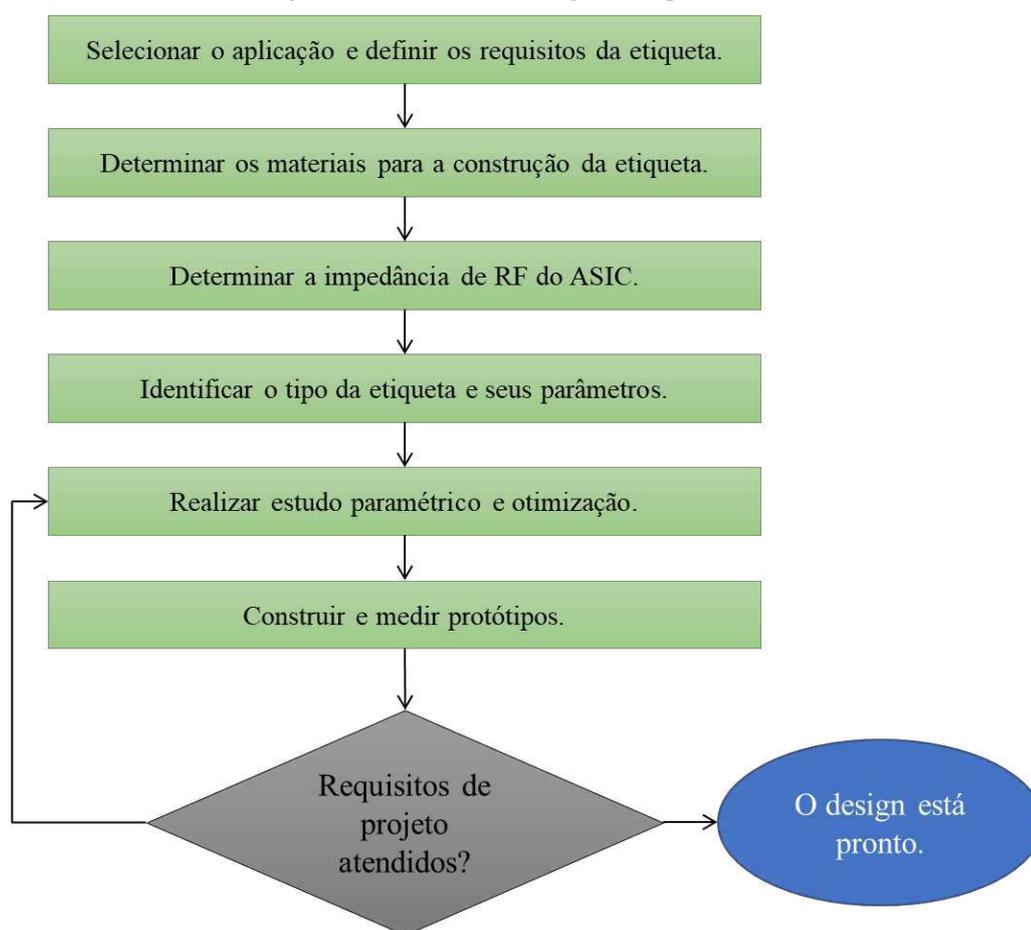
Após estabelecidos os requisitos de modelagem das etiquetas RFID é idealizado o processo de design da etiqueta RFID, conforme apresentado na Figura 12.

Por meio do fluxograma apresentado na Figura 12 pode ser observado que após a seleção da aplicação RFID, os requisitos do sistema podem ser traduzidos em requisitos de etiqueta. Esses requisitos determinam os materiais para construção da antena das etiquetas e a determinação do *chip*.

Em seguida, a etiqueta é modelada, simulada e otimizada via processo computacional. Isto possibilita monitorar o alcance da etiqueta, o coeficiente de reflexão, o ganho da etiqueta e a impedância, proporcionando ao projetista uma boa compreensão do desempenho da antena.

Na última etapa do processo de design, protótipos são construídos e seus desempenhos são medidos. Se os requisitos de design forem atendidos, o design da etiqueta está finalizado. Caso contrário, o design deve ser modificado e otimizado até que os requisitos sejam atendidos.

Figura 12 - Processo de design da etiqueta RFID.



Fonte: Própria autora.

4.1.2 PROJETO E SIMULAÇÃO

Para o projeto das etiquetas RFID inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca da aplicação da tecnologia RFID na detecção de poluentes e em uso da tecnologia em sistemas de alta tensão. Entretanto, poucas informações foram encontradas para os temas referenciados. Logo, neste trabalho de pesquisa, são utilizados designers de etiquetas com aplicações descritas na literatura (Lim e outros, 2008; Kuo e outros, 2012; Barman e outros, 2018; El Ahmar e outros, 2019), com padrões geométricos diversos, até alcançar um desenho representativo final das etiquetas.

Com relação aos materiais aplicados, o substrato dielétrico utilizado no projeto das etiquetas foi a fibra de vidro (FR-4) que consiste em um substrato indicado para aplicações em sistemas de alta tensão, além de ser resistente a altas temperaturas (Tarzwell & Bahl, 2004).

O material poluente simulado foi determinado conforme a norma IEC 60815, em que especifica o caulim como composto poluente não solúvel. O material caulim é caracterizado de forma a se obter as principais características elétricas (permissividade dielétrica e tangente de perdas) necessárias para a realização das simulações (Lima e outros, 2018).

Em posse das propriedades dielétricas do substrato são realizadas as simulações da etiqueta no *software* HFSS, como foco na simulação eletromagnética 3D. A caracterização dielétrica dos materiais simulados para as etiquetas RFID são:

- **Poluição:** Caulim - $\epsilon' = 2,5$; $\tan \delta = 0,14$; e espessura de 0,05 mm;
- **Substrato:** FR-4 - $\epsilon' = 4,4$; $\tan \delta = 0,02$; e espessura 1,52 mm;
- **Elemento irradiante (cobre):** material condutor com espessura de 0,035mm;
- **Torre (aço):** material condutor com espessura de 5 mm e 20 m de comprimento.

No *software* HFSS é construída a geometria da etiqueta com especificação das suas dimensões e materiais constituintes, incluindo a camada condutora e o substrato dielétrico. Também é inserida uma caixa de ar que modela o espaço aberto, para que a irradiação seja absorvida e não refletida. Adicionalmente, são utilizadas as principais técnicas de casamento de impedância presentes na literatura para adequação à impedância de entrada do *chip* escolhido na frequência de operação RFID UHF de 915 MHz.

Nas simulações, foram consideradas uma impedância $Z_c = 12,7 - j199 \Omega$ na fonte de excitação, correspondendo à impedância do *chip* SL3S4011 da NXP em 915 MHz, o qual foi utilizado na fabricação das etiquetas.

4.2 FABRICAÇÃO E APLICAÇÃO DO POLUENTE

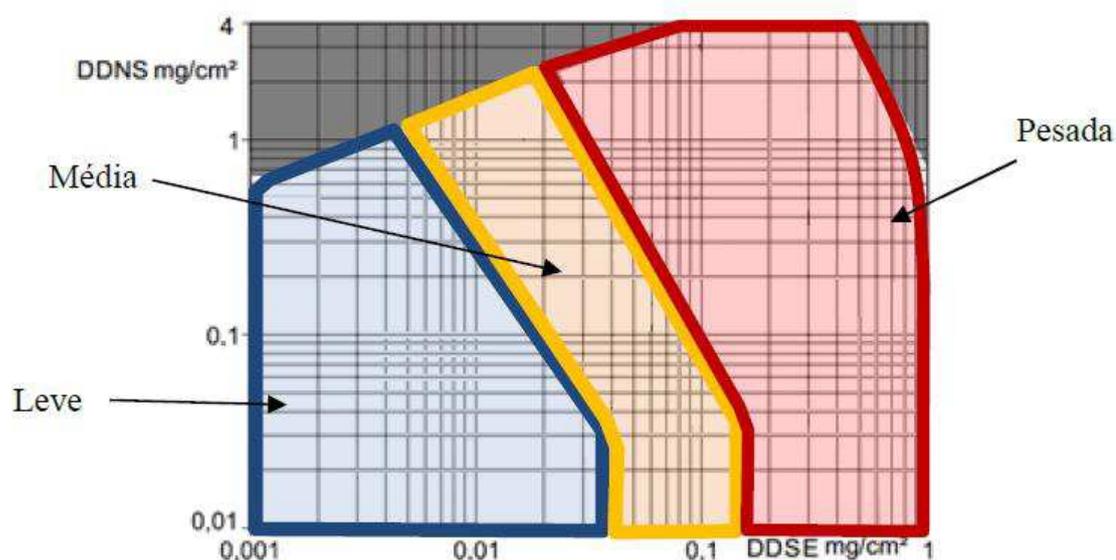
Nesta seção é apresentado o procedimento de poluição utilizado nesta tese, seguindo os critérios das normas ABNT NBR 10621 e ABNT IEC 60815 que trata sobre poluição e testes em isoladores com poluição artificial.

4.2.1 NÍVEIS DE POLUIÇÃO

Conforme a norma IEC 60815, a combinação dos valores de DDSE e DDNS indica o nível de poluição local a que o isolador está submetido. A referida norma classifica o grau de poluição em cinco níveis: “muito leve”; “leve”; “média”; “pesada”; e “muito pesada”. Para efeitos práticos, na rotina de inspeção de isoladores, a classificação em cinco níveis de poluição pode ser excessiva e desnecessária. Portanto, para fins desta pesquisa, o método de classificação proposto foi desenvolvido para produzir o grau de poluição em 3 níveis.

Para dar objetividade ao método de classificação, a norma supracitada foi tomada como referência. Entretanto, devido ao excesso de níveis de poluição que a norma trata, foi necessário fazer pequenas modificações com relação aos conjuntos dos níveis de poluição. Dessa forma, os níveis de poluição “muito leve”, “leve” foram unidos e passou-se apenas a ser denominado “leve”. Já os níveis “pesada” e “muito pesada” foram também unidos e passou a ser apenas “pesada”. A Figura 13 apresenta as regiões do gráfico, com a modificação, referente a cada nível de poluição.

Figura 13 - Níveis de poluição com base na IEC 60815.



Fonte: Adaptação de IEC 60815.

4.2.2 NÍVEL DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL DAS ETIQUETAS

Para que o procedimento de poluição possa seguir padrões mais próximos do real, são utilizadas como referência as normas ABNT NBR 10621 e ABNT IEC 60815, que

tratam sobre execução de ensaios de poluição artificial em isoladores, e os resultados de medição de poluição em campo nas torres de alta tensão obtidos por Rocha (2019).

O processo de deposição e caracterização do nível de poluição seguiu a metodologia adotada por Rocha (2019). Na sua pesquisa Rocha foi motivado a realizar medições em campo no interior do estado de Alagoas, onde predomina o plantio de cana-de-açúcar e localiza-se a 30 km, em linha reta, do mar. Ademais, na época de colheita de cana-de-açúcar ocorre a prática da queima da plantação, o que caracteriza o local como crítico em termos de severidade de poluição. Em sua pesquisa, Rocha (2019) aplicou um cronograma de medições com o objetivo de avaliar as variações do nível de poluição dos isoladores ao longo de um ano. Foram instalados quatro isoladores de amostra em torres de alta tensão, sendo retirado um isolador amostra a cada três meses. Ao final do cronograma de medições, todos os isoladores de amostra foram analisados conforme norma. Os resultados das medições podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Medições em campo por Rocha (2019).

Medição	DDSE	DDNS	Criticidade de Poluição
Etapa 03	0,0042	0,024	Leve
Etapa 06	0,018	0,21	Média
Etapa 09	0,048	0,069	Média
Etapa 12	0,088	0,72	Pesada

Fonte: Adaptado de Rocha (2019).

Para esta tese são utilizados os níveis de poluição provenientes das etapas 03, 06 e 12 apresentadas na Tabela 2.

O composto de poluição foi criado artificialmente de acordo com as normas ABNT NBR 10621 e ABNT IEC 60815, em que são apresentadas as expressões para o cálculo de DDSE e DDNS, conforme pode ser visualizado nas expressões (2.4) e (2.5) do capítulo 2.

Por meio dos valores de DDSE e DDNS disponibilizados por Rocha (2019) foi feita a matemática inversa para encontrar os valores referentes à quantidade de material solúvel e não solúvel necessário para determinados valores de DDSE e DDNS. Assim, na Tabela 3 pode ser visualizada a composição utilizada para cada nível de poluição estabelecida, considerando o tamanho da etiqueta.

Tabela 3 – Solução das poluições produzidas.

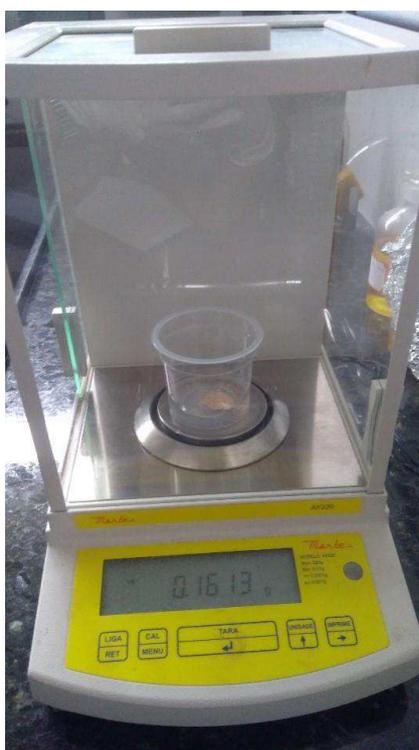
Nível de poluição	DDNS (mg/cm ³)	Caulim (g)	Total + 5%	Condutividade	Temp.	Volume ml	DDSE
Leve	0,024	0,0096	0,01008	0,167 mS/cm	25°C	20	0,0042
Média	0,21	0,084	0,0882	0,344 mS/cm	25°C	50	0,018
Pesada	0,72	0,288	0,3024	1,43 mS/cm	25°C	50	0,088

Fonte: Própria autora.

4.2.3 PROCESSO DE POLUIÇÃO DAS ETIQUETAS

O procedimento se inicia com a preparação da solução poluente, composta por água destilada, material inerte e sal de cozinha. Nos experimentos, foi utilizado o caulim como material inerte, água destilada, e quantidade de sal variante a depender do nível da condutividade elétrica da solução desejada, conforme descrito nas normas ABNT NBR 10621 e ABNT IEC 60815. Nas Figura 14 e 15 são apresentadas parte do processo da confecção da poluição, em que foi utilizada uma balança de precisão para medição do caulim, um termômetro para controle da temperatura da solução e um condutivímetro para garantir a condutividade normalizada da solução.

Figura 14 – Processo de medição do caulim.



Fonte: Própria autora.

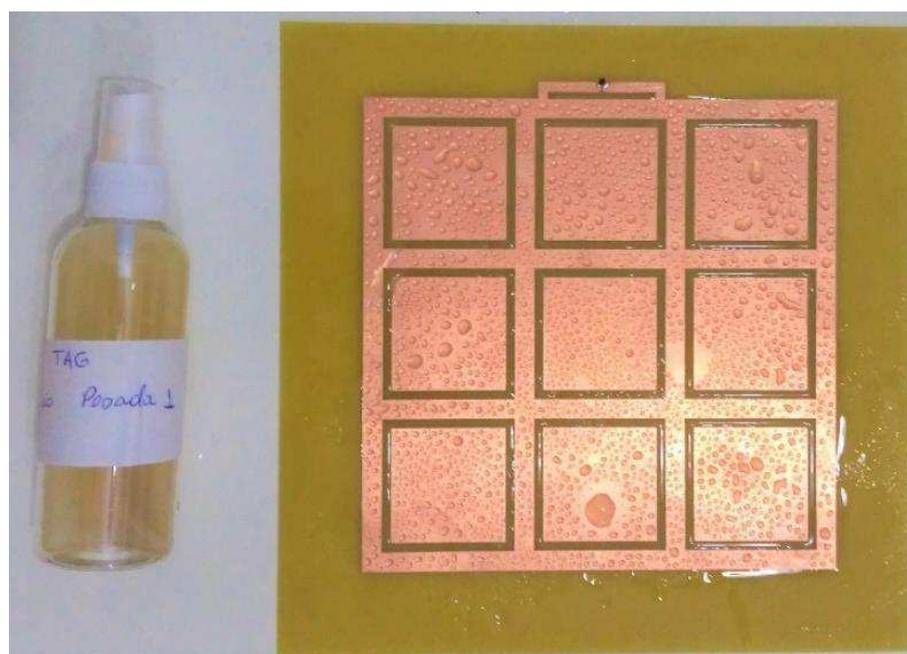
Figura 15 – Medição de condutividade e temperatura da solução da poluição.



Fonte: Própria autora.

Após a preparação das três soluções salinas, as soluções são aplicadas na superfície das etiquetas com auxílio de um borrifador. Para cada procedimento de medição de RF, a aplicação da solução foi feita com antecedência, de modo a garantir a secagem da superfície das etiquetas. Na Figura 16 pode ser visualizada a aplicação da solução poluente sobre a etiqueta.

Figura 16 – Procedimento de aplicação da poluição.



Fonte: Própria autora.

Após o processo de fabricação e aplicação da solução poluente, são obtidas as três etiquetas poluídas com os seguintes níveis de criticidade: leve; média; e pesada.

4.3 MEDIÇÕES E TESTES

Com os resultados de simulação atendendo os limites mínimos de operação eficiente em termos de coeficiente de reflexão, ganho e alcance de leitura, as etiquetas passam para o processo de fabricação e posterior poluição para validação experimental. Para tanto, é utilizada uma antena Laird® PAL90209H de polarização circular e ganho de 9 dBic na faixa de frequência RFID UHF acoplada ao leitor RFID Honeywell® Intermec 1009FF01. Nas Figura 17 e Figura 18 podem ser visualizadas, respectivamente, as imagens da antena e do leitor.

Figura 17 – Imagens da antena RFID PAL90209H.



Fonte: Laird®.

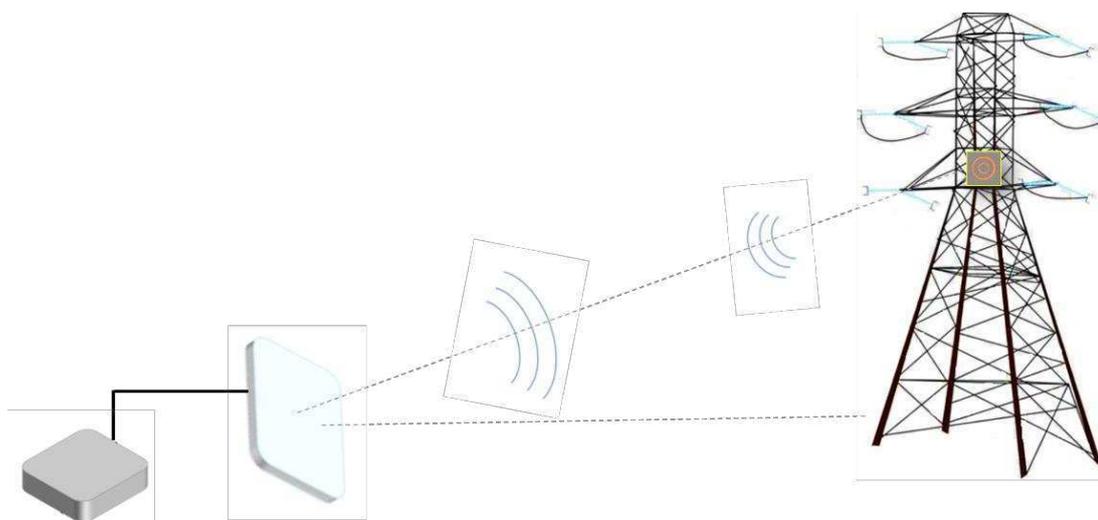
Figura 18 - Imagem do leitor RFID Intermec 1009FF01.



Fonte: Honeywell®.

Com relação às medições, nos testes iniciais é analisado o desempenho das etiquetas fabricadas. Nesta etapa é obtido o alcance máximo (distância máxima) de leitura das etiquetas por meio do leitor. Na Figura 19 é apresentado um arranjo esquemático experimental para as medições de alcance.

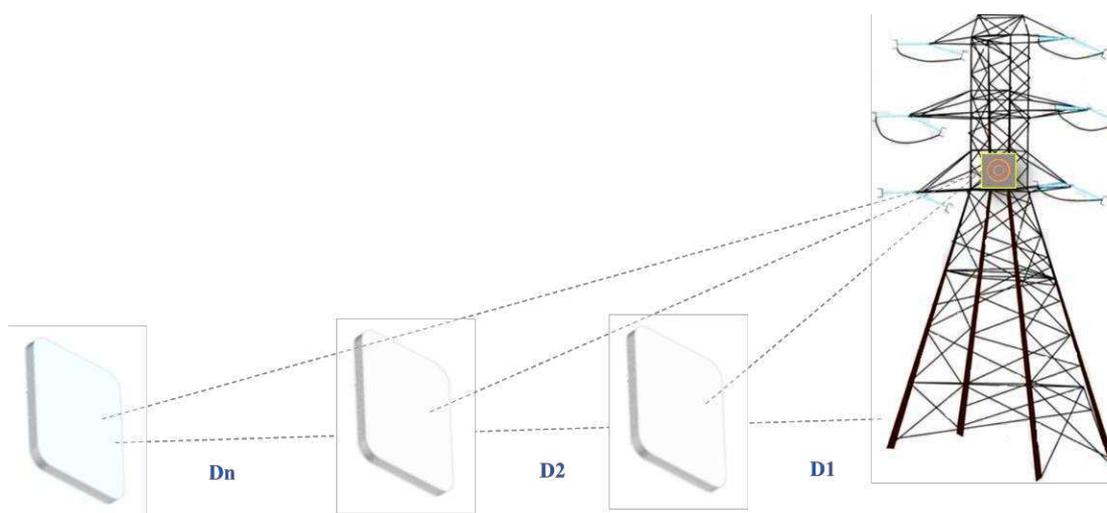
Figura 19 – Arranjo experimental.



Fonte: Própria autora.

As medições de alcance são realizadas com passo de um metro, tanto para a etiqueta limpa quanto para a etiqueta com poluição depositada. Na Figura 20 é apresentado um esquemático das medições em passos de distância fixa.

Figura 20 – Esquemático da medição de alcance.



Fonte: Própria autora.

As medições são realizadas em ambientes do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. Inicialmente, as medições são realizadas em um galpão auxiliar ao LAT onde é utilizada uma mísula como “torre metálica” para testes iniciais. Em um segundo momento, é empregado um protótipo de torre de alta tensão em ambiente externo para as medições de alcance. Na Figura 21 podem ser visualizadas fotografias dos ambientes utilizados nas medições de alcance das etiquetas RFID.

Figura 21 – Fotografias dos ambientes de medições e testes.



Fonte: Própria autora.

4.4 TRATAMENTO DO RSSI

O método de identificação, proposto neste trabalho, tem por objetivo final relacionar cada RSSI medido a um respectivo nível de poluição. Como descrito no tópico anterior, foram definidos três níveis classificatórios para os sinais coletados: “leve”; “média”; e “pesada”. Assim, a depender do padrão do sinal a ser apresentado, o método deverá resultar como saída um dos três níveis previamente definidos.

Quando o método de classificação é tratado como um sistema composto por estruturas ou etapas individualizadas e com funções específicas, pode-se, assim, analisar separadamente cada estrutura. O fluxograma simplificado das etapas a serem analisadas pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma simplificado para sistema de classificação.



Fonte: Própria autora

Por meio do fluxograma apresentado na Figura 22, nota-se que o sistema de reconhecimento de padrão deve ser projetado com as seguintes estruturas e suas respectivas funções:

- **Extração de características (atributos).** Etapa caracterizada pelo recebimento de todo conjunto de dados de entrada (domínio). É responsável por selecionar apenas os dados que efetivamente servirão para o processo de classificação. Informações consideradas não úteis são excluídas do sistema.
- **Seleção de características.** Etapa em que são tratados todos os dados, de forma numérica, para que os mesmos possam ser inseridos no classificador. É responsável por preparar e formatar todos os dados de entrada do classificador.
- **Sistema de classificação.** Etapa final responsável pela classificação dos dados a ele apresentados. O sucesso desta etapa depende, essencialmente, das etapas anteriores.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos utilizando-se a metodologia descrita no capítulo anterior. Para tanto, na Seção 5.1 são apresentados os projetos das etiquetas RFID passivas por meio de simulações no *software* HFSS. Na Seção 5.2 são feitas análises de sensibilidade do desempenho das etiquetas em relação à poluição superficial. Sequencialmente, na Seção 5.3, são apresentadas a implementação da confecção das etiquetas RFID UHF, bem como os testes iniciais para as duas geometrias projetadas. Por fim, na Seção 5.4, são apresentadas as medições de RSSI realizadas em ambiente externo e as respectivas análises.

5.1 PROJETOS DAS ETIQUETAS RFID UHF PASSIVAS

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações das duas geometrias de etiquetas RFID UHF passivas para monitoramento da poluição em torres de alta tensão, assim como uma análise comparativa.

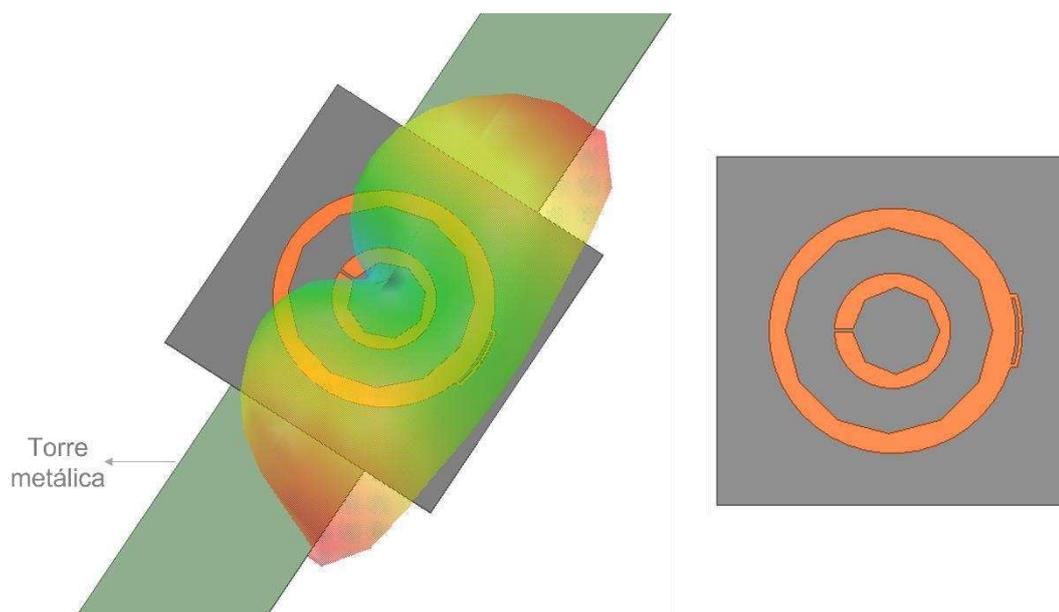
5.1.1 ETIQUETA RFID CIRCULAR

A etiqueta RFID UHF circular simulada nesta subseção foi geometricamente inspirada no trabalho de Barman (2018). Entretanto, a etiqueta apresentada na pesquisa de Barman (2018) visa a evolução das etiquetas de banda dupla UHF, diferente da aplicação buscada por esta tese.

Neste sentido, por meio de ajustes geométricos foi obtida uma configuração de etiqueta RFID UHF circular para identificação de poluição em torres de alta tensão, conforme pode ser visualizada na Figura 23. Os materiais utilizados para simulação e fabricação da etiqueta RFID UHF circular são descritos na subseção 4.1.2.

Complementarmente, foram realizadas análises paramétricas e otimizações nas quais as dimensões e geometria foram variadas no intuito de obter um adequado casamento de impedância. Consequentemente, foi obtida uma frequência de ressonância mais próxima de 915 MHz para os casos sem poluição depositada e com 0,05 mm de poluição depositada.

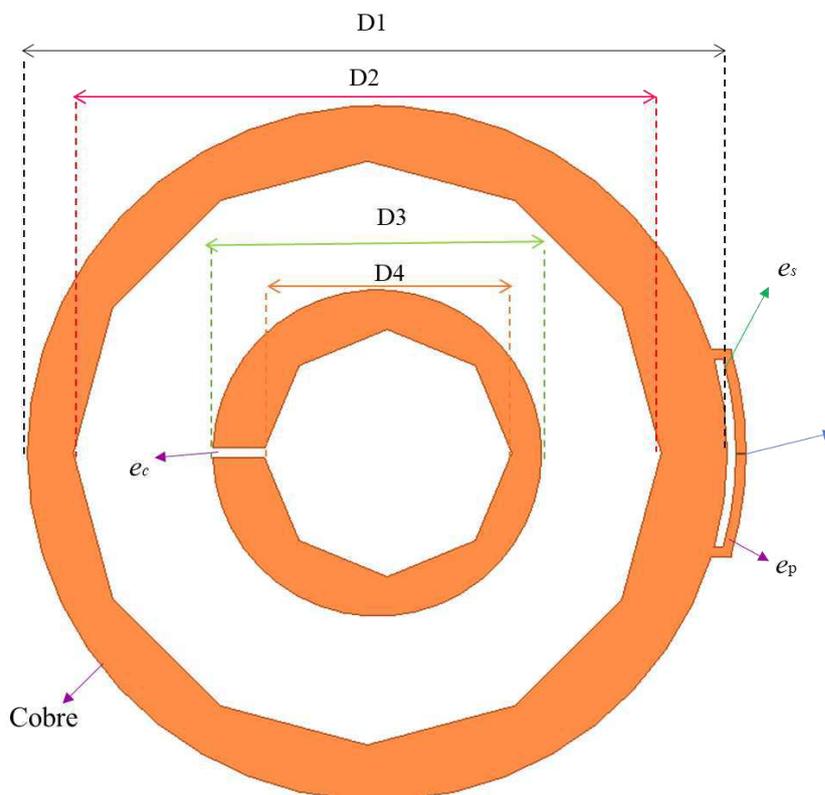
Figura 23 – Estrutura simulada: (a) torre e etiqueta circular 3D; (b) etiqueta circular 2D.



Fonte: Própria autora.

A geometria e as dimensões detalhadas da etiqueta RFID UHF proposta são apresentadas, respectivamente, na Figura 24 e na Tabela 4. A geometria empregada foi projetada sobre uma área de superfície plana compacta em FR-4 de 20 cm².

Figura 24 – Geometria da etiqueta RFID circular.



Fonte: Própria autora.

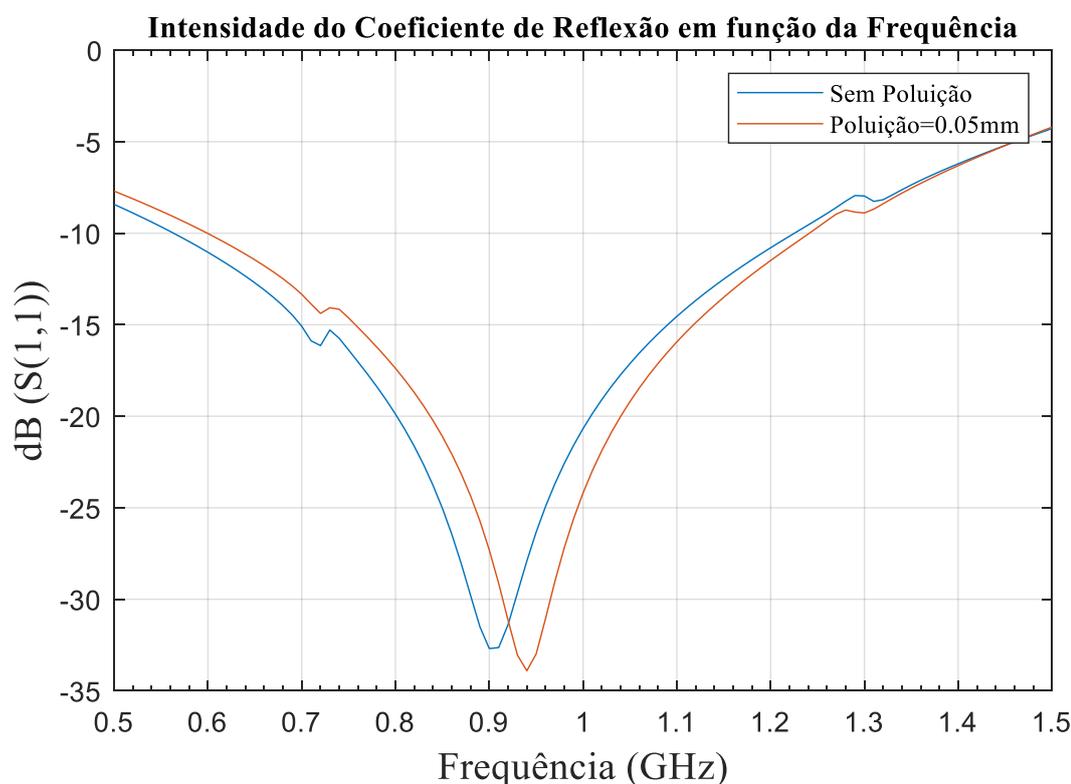
Tabela 4 - Dimensões da etiqueta RFID UHF circular.

D1	D2	D3	D4	ϵ_s	ϵ_p	ϵ_c
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
140,5	118,0	66,0	50,0	1,5	2	2

Fonte: Própria autora.

Com a geometria projetada, alcançou-se um coeficiente de reflexão (S_{11}) de - 32,62 dB para a etiqueta sem poluição e - 30,25 dB para a etiqueta com poluição, ambas na frequência de 915 MHz. O coeficiente de reflexão das etiquetas pode ser observado na Figura 25. Com relação à largura de banda, que compreende a faixa de frequência em que o valor do $S_{11} \leq -10$ dB, nota-se que ela inclui tanto a banda de frequência UHF americana e dos Estados Unidos (902-928 MHz), quanto à europeia (865,6-867,6 MHz) (Riaz e outros, 2018), uma vez que o valor do S_{11} é menor do que -10 dB em toda a faixa de frequência entre 600 MHz e 1,20 GHz.

Figura 25 – Intensidade do coeficiente de reflexão (S_{11}) para a etiqueta RFID com geometria circular.

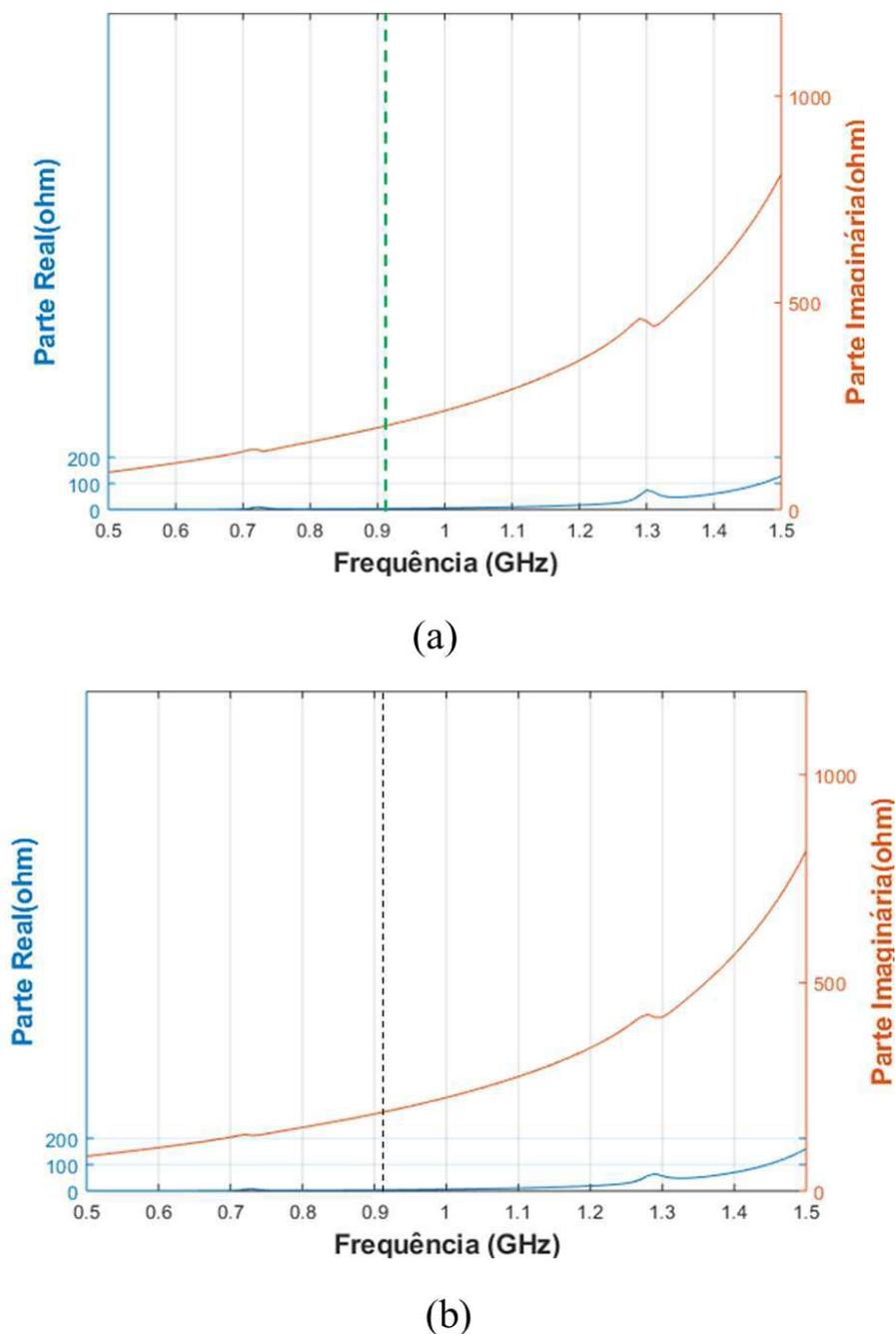


Fonte: Própria autora.

Com relação à impedância de entrada na frequência de operação (915 MHz), foram obtidas: $Z_{in} = 3,73 + j201 \Omega$ para a etiqueta sem poluição; e $Z_{in} = 4,12 + j189,62\Omega$ para a etiqueta com poluição (espessura: 0,05 mm). Nota-se que o valor da reatância das

etiquetas é próximo ao valor da reatância do *chip* para os dois casos simulados, indicando um casamento de impedância adequado para ambos os casos, conforme apresentado na Figura 26.

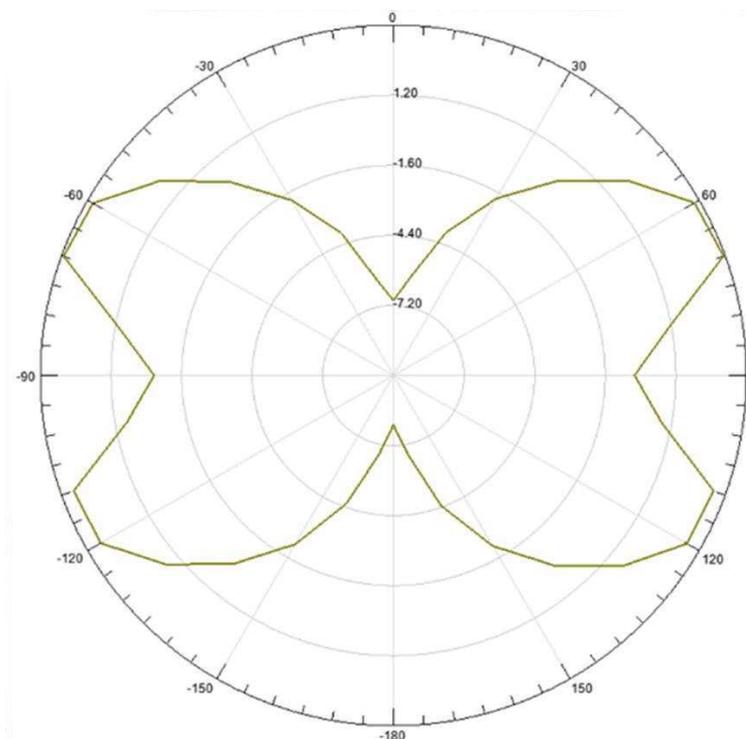
Figura 26 - Impedância de entrada simulada da etiqueta: (a) sem poluição e (b) com poluição.



Fonte: Própria autora.

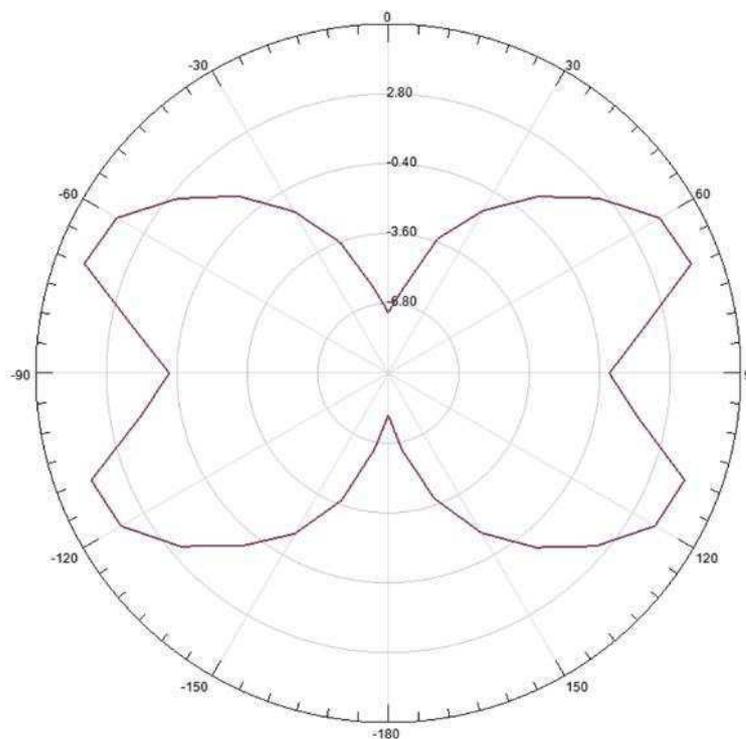
De forma complementar, podem ser visualizados nas Figura 27 e Figura 28 os diagramas de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF no plano $\phi = 0^\circ$.

Figura 27 - Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] sem poluição - plano $\phi = 0^\circ$.



Fonte: Própria autora.

Figura 28 – Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] com poluição - plano $\phi = 0^\circ$.

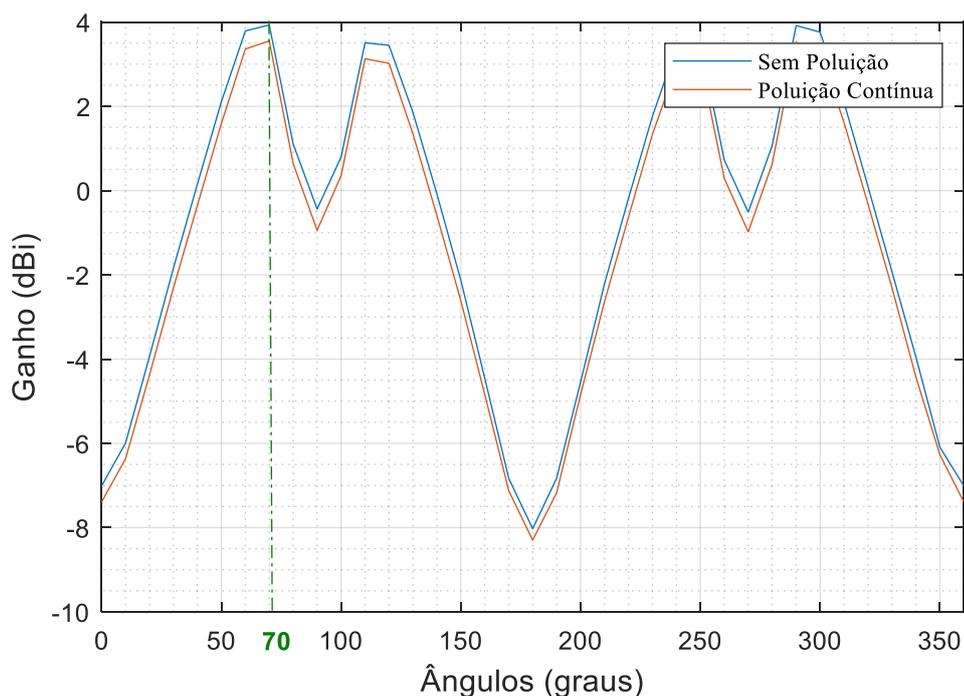


Fonte: Própria autora.

A partir da Figura 27 e Figura 28, pode-se verificar que a adição da poluição não resultou em impactos negativos nos diagramas de irradiação da etiqueta RFID UHF com

relação à etiqueta sem depósito de poluição. No entanto, conforme exemplificado na Figura 29, na direção de 70° a etiqueta apresenta melhor desempenho, considerando o ganho máximo de 3,89 dBi para a etiqueta sem poluição e de 3,53 dBi para etiqueta com poluição depositada.

Figura 29 – Comparativo do diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] sem e com poluição.



Fonte: Própria autora.

Por meio dos parâmetros simulados e da equação de transmissão de Friis, conforme detalhado na secção 3.1, foi realizado o cálculo teórico do alcance da etiqueta RFID UHF sem poluição e com poluição. Para a condição sem poluição foi calculado um alcance de 20,76 metros e para etiqueta com poluição um alcance de 19,60 metros. Estes alcances possibilitam uma leitura estável e segura para os técnicos de manutenção de linhas de transmissão.

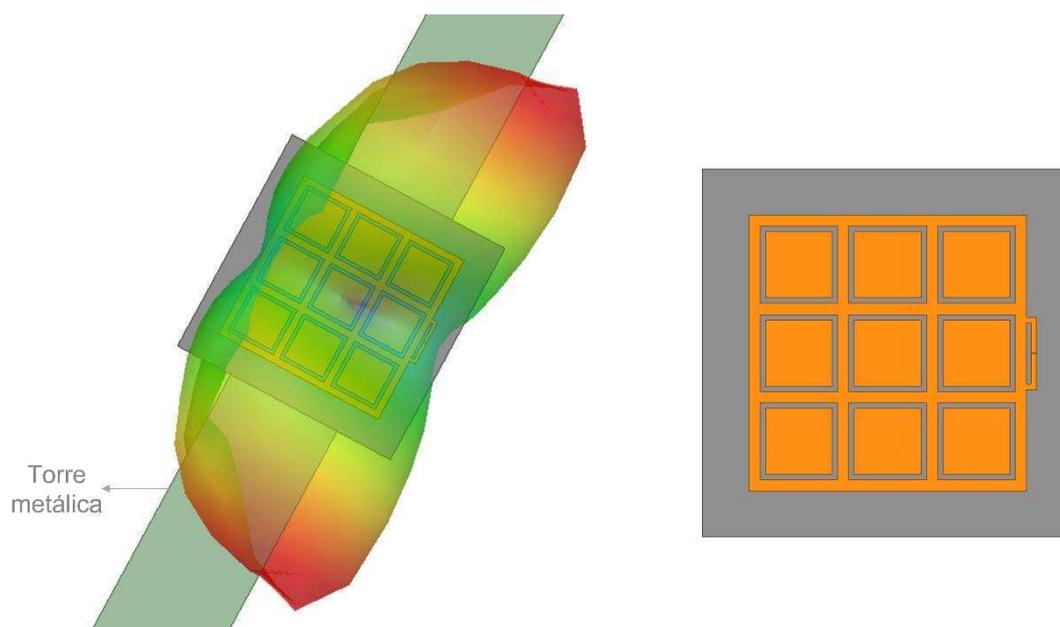
A partir dos resultados medidos de coeficiente de reflexão e de ganho apresentados nesta subsecção, a etiqueta RFID UHF circular foi considerada como adequada para fabricação e testes de sensibilidade de detecção de poluição artificial em torres metálicas por meio de um sistema emulado em laboratório.

5.1.2 ETIQUETA RFID UHF QUADRICULAR

A etiqueta RFID UHF quadricular simulada nesta subseção foi geometricamente inspirada nos populares elementos irradiadores geométricos. Na literatura é abrangente o uso de formatos circulares, retangulares, quadrados, triangulares e dipolos como elementos irradiadores devido à facilidade de confecção e características de irradiação atrativas.

Assim, similarmente ao caso da etiqueta RFID UHF circular, por meio de ajustes geométricos foi obtida uma configuração de etiqueta RFID UHF quadricular para identificação de poluição em torres de alta tensão, conforme pode ser observado na Figura 30. Os materiais utilizados para simulação e fabricação da etiqueta RFID UHF quadricular também são descritos na subseção 4.1.2.

Figura 30 - Estrutura simulada: (a) torre e etiqueta quadricular 3D; (b) etiqueta quadricular 2D.



Fonte: Própria autora.

Em seguida, foram realizadas as análises paramétricas e otimizações, nas quais as dimensões e geometria foram variadas, no intuito de obter um adequado casamento de impedância e, conseqüentemente, uma frequência de ressonância mais próxima de 915 MHz para os casos sem poluição depositada e com 0,05 mm (espessura) de poluição depositada. A geometria e as dimensões detalhadas da etiqueta RFID UHF quadricular proposta são apresentadas, respectivamente, na Figura 31 e na Tabela 5. A geometria

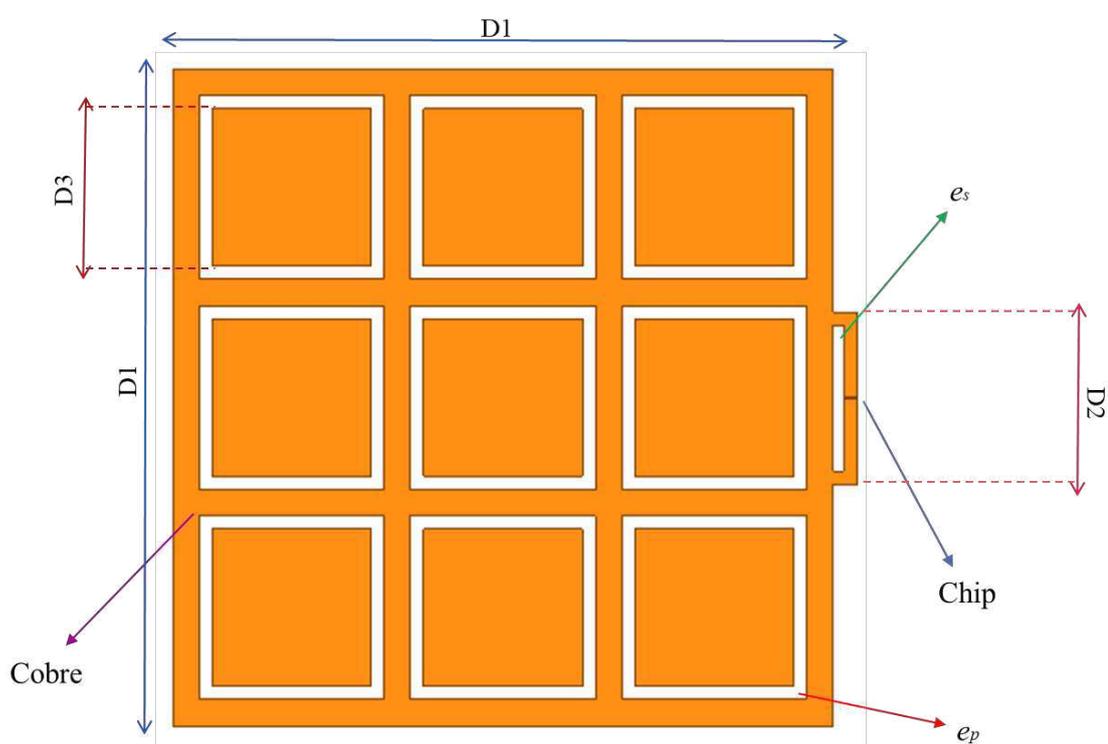
apresentada também foi projetada sobre uma área de superfície plana compacta em FR-4 de 20 cm².

Tabela 5 - Dimensões da etiqueta RFID UHF quadrangular.

D1	D2	D3	ϵ_s	ϵ_p
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
150	39,3	36,0	2,5	3

Fonte: Própria autora.

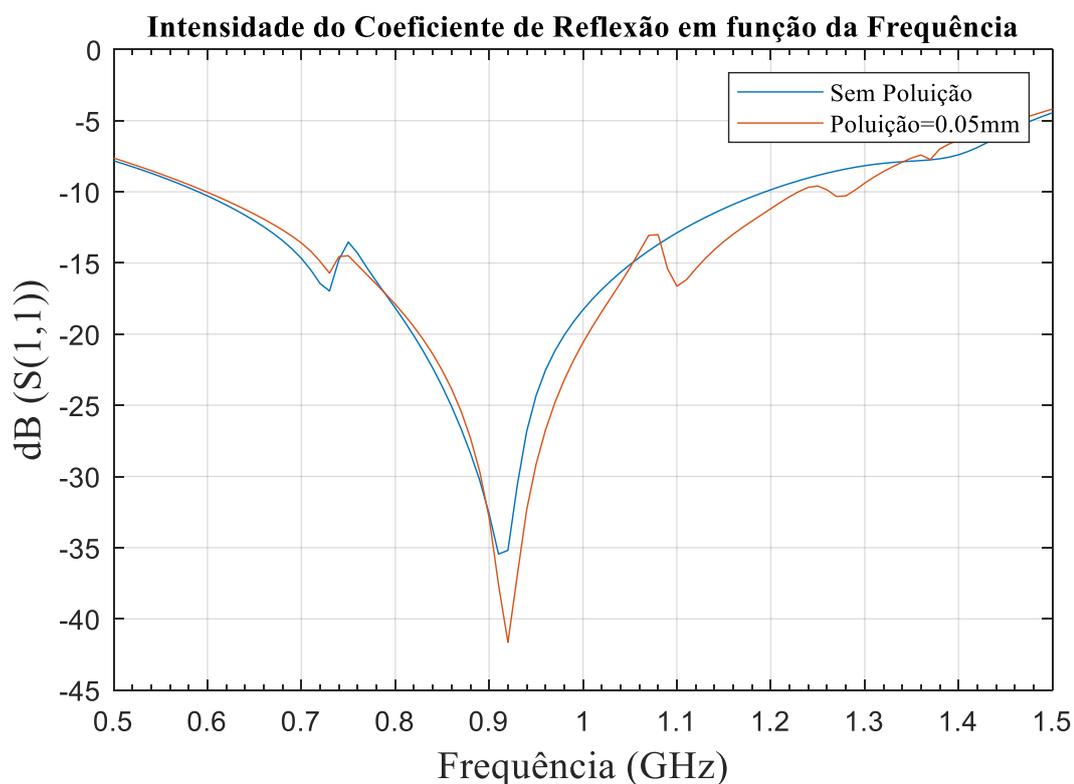
Figura 31 - Geometria da etiqueta quadrangular.



Fonte: Própria autora.

Com a geometria projetada foi obtido um coeficiente de reflexão (S_{11}) de - 36,3 dB para etiqueta sem poluição e - 39,7 dB para a etiqueta com poluição, todas na frequência de 915 MHz. O coeficiente de reflexão das etiquetas pode ser visualizado na Figura 32. Com relação à largura de banda, observa-se que são incluídas as bandas de frequências UHF americana (902-928 MHz) e europeia (865,6-867,6 MHz), uma vez que o valor do S_{11} é menor do que -10 dB em toda a faixa de frequência entre 600 MHz e 1,20 GHz.

Figura 32 - Intensidade do coeficiente de reflexão (S_{11}) para a etiqueta RFID com geometria quadricular.

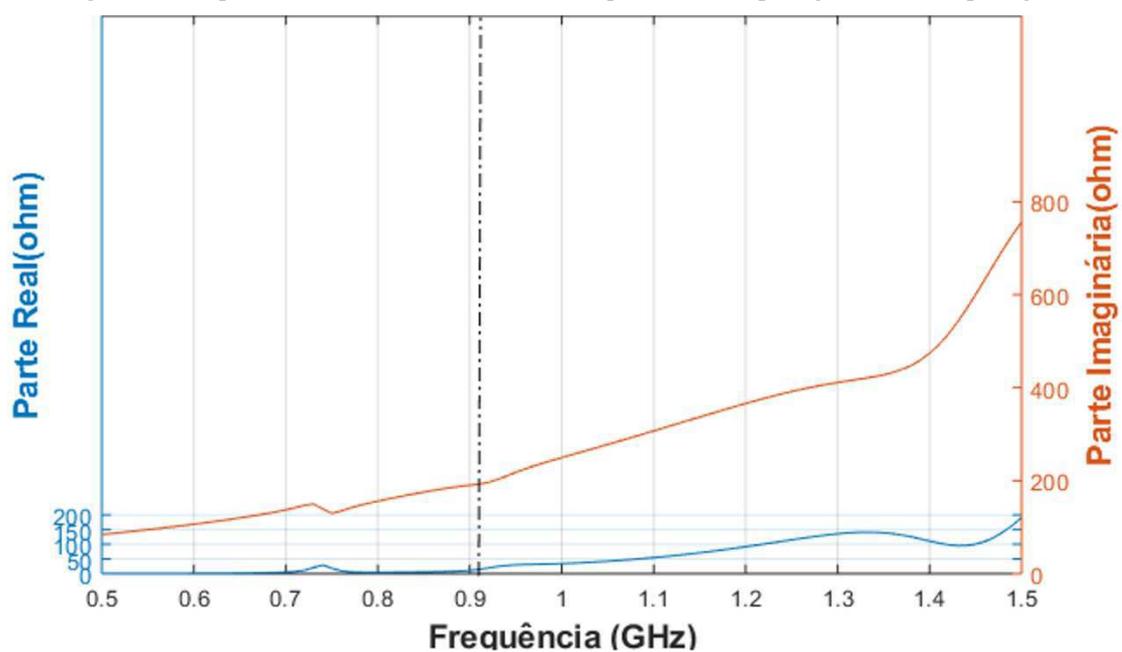


Fonte: Própria autora.

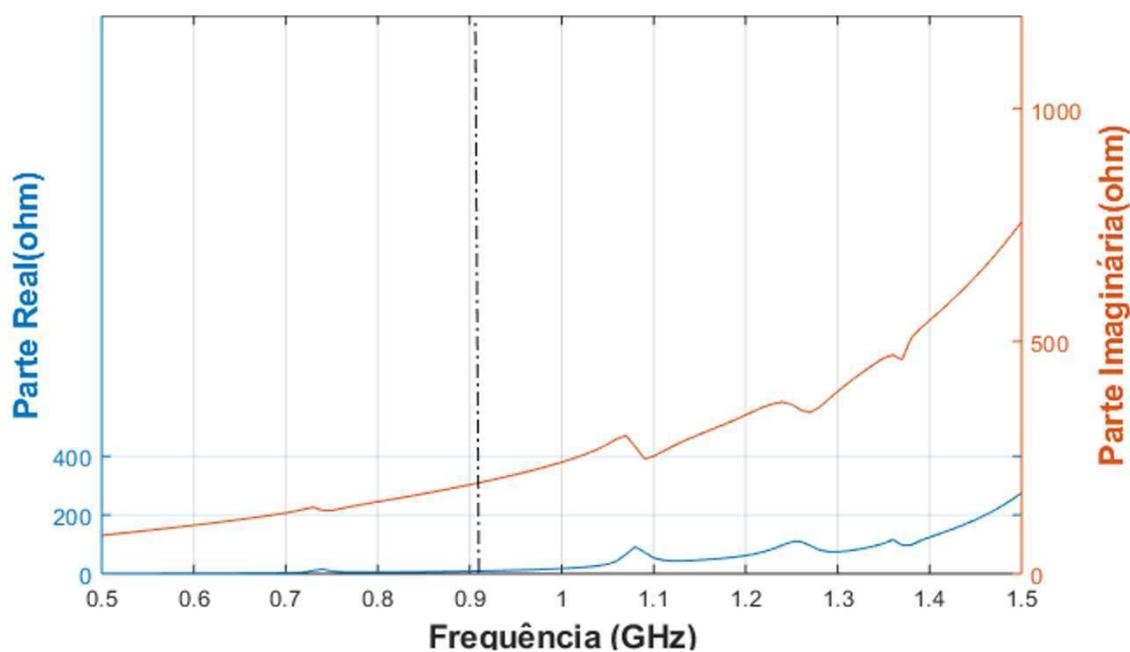
De forma de complementar, na Figura 33, pode-se observar a impedância de entrada obtida na frequência de operação (915 MHz) para a etiqueta sem poluição (a) e com poluição (b).

A partir da Figura 33 (a) pode-se verificar que a impedância para a frequência de operação projetada foi $Z_{in} = 16,26 + j194,5 \Omega$ para a etiqueta sem poluição. Na Figura 33 (b) pode ser visualizado uma impedância para a frequência de operação para a etiqueta com poluição (0,05 mm) de $Z_{in} = 9,12 + j197,5 \Omega$. Nota-se que o valor da reatância e da resistência das etiquetas são próximos aos valores da reatância e da resistência do *chip* ($Z_c = 12,7 - j199 \Omega$) para os dois casos simulados, indicando um casamento de impedância adequado para ambos os casos.

Figura 33 - Impedância de entrada simulada da etiqueta: (a) sem poluição e (b) com poluição.



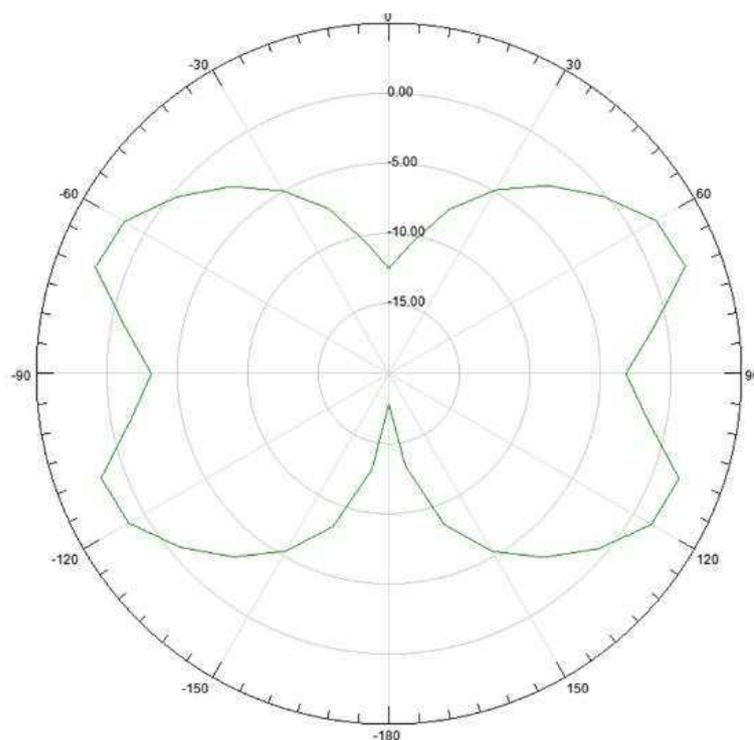
(a)



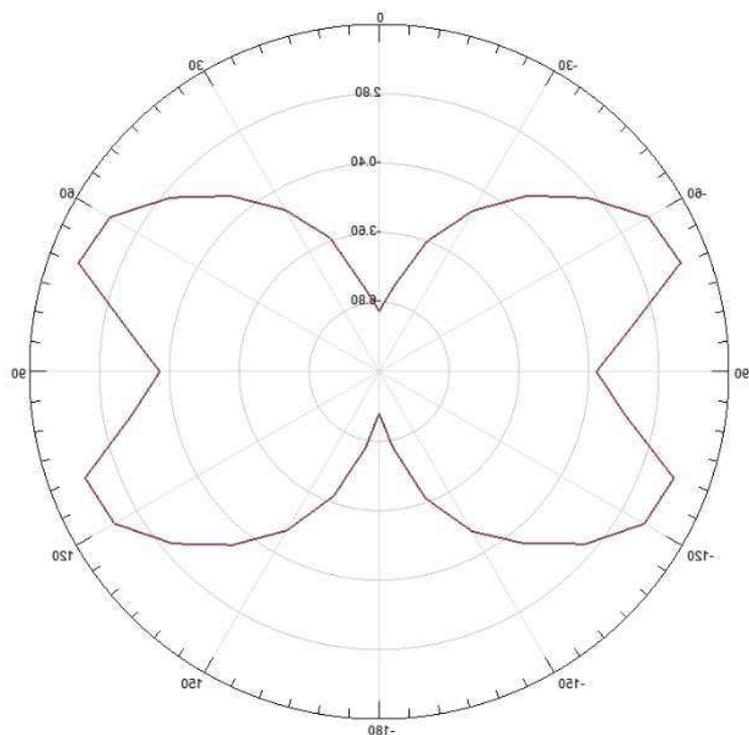
(b)

Fonte: Própria autora.

Adicionalmente, os diagramas de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF no plano $\phi = 0^\circ$ podem ser visualizados nas Figura 34 e 35.

Figura 34 – Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] sem poluição - plano $\phi = 0^\circ$.

Fonte: Própria autora.

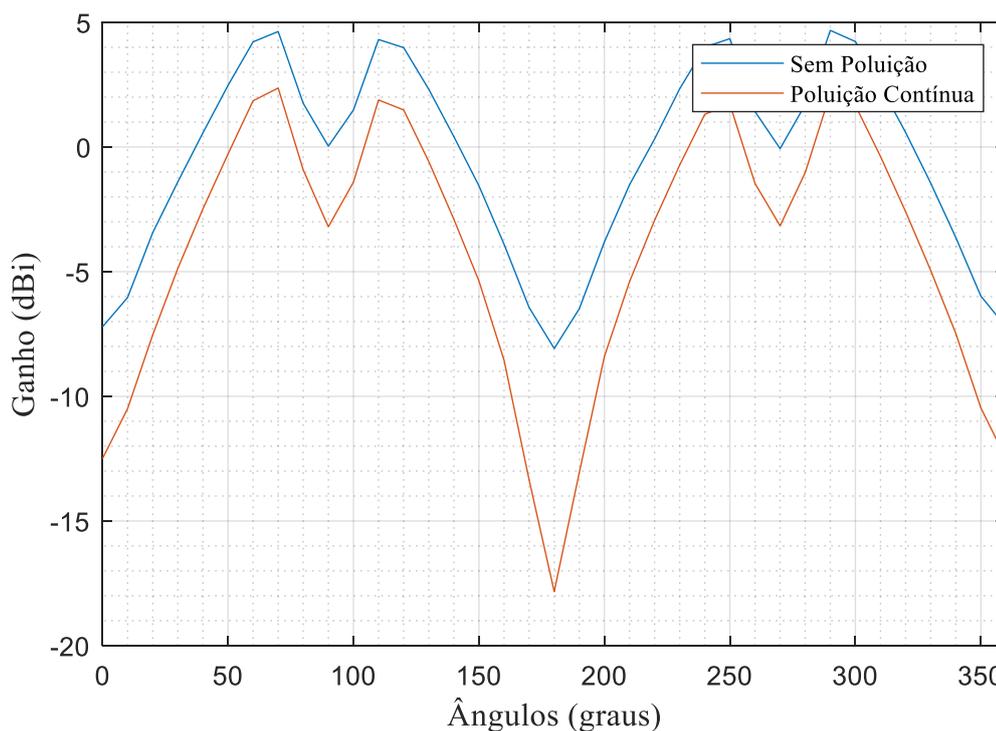
Figura 35 – Diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dB] com poluição - plano $\phi = 0^\circ$.

Fonte: Própria autora.

A partir da Figura 34 e Figura 35, pode-se verificar que a adição da poluição resultou em impactos positivos nos diagramas de irradiação da etiqueta RFID UHF com

relação a etiqueta sem depósito de poluição. Conforme exemplificado na Figura 36, na direção de 70° a etiqueta apresenta melhor desempenho, considerando o ganho máximo de 2,36 dBi para a etiqueta sem poluição e de 4,68 dBi para etiqueta com poluição depositada.

Figura 36 - Comparativo do diagrama de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] sem e com poluição.



Fonte: Própria autora.

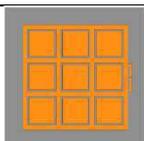
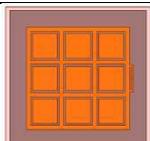
Logo, por meio dos parâmetros simulados e da equação de transmissão de Friis, foi realizado o cálculo teórico do alcance da etiqueta RFID sem poluição e com poluição. Para a condição sem poluição foi calculado um alcance de 19,97 metros e para etiqueta com poluição um alcance de 22,46 metros. Estes alcances são maiores do que os obtidos no projeto da etiqueta RFID UHF circular, possibilitando uma leitura estável e mais segura para os técnicos de manutenção de linhas de transmissão.

A partir dos resultados medidos de coeficiente de reflexão e de ganho apresentados nesta subseção, a etiqueta RFID UHF quadricular foi selecionada para análise de sensibilidade da poluição via simulação, apresentada na próxima seção. Ademais, a etiqueta RFID UHF quadricular foi selecionada para fabricação e testes de sensibilidade de detecção de poluição artificial em torres metálicas por meio de um sistema emulado em laboratório.

5.1.3 CONSIDERAÇÕES

Para fins de sumarização e comparação, os parâmetros de desempenho extraídos durante as simulações para as etiquetas RFID UHF circular e quadricular são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Síntese dos parâmetros de desempenho das etiquetas simuladas: circular e quadricular.

Etiquetas	S11	Ganho	Z_{in}	Alcance
	-32,62 dB	3,89 dBi	$3,73 + j201,6$	20,76 m
	-30,25 dB	3,53 dBi	$4,12 + j189,6$	19,60 m
	-36,3 dB	2,36 dBi	$16,26 + j194,5$	19,97 m
	-39,7 dB	4,68 dBi	$9,12 + j197,5$	22,46 m

Fonte: Própria autora.

Os valores apresentados na Tabela 6 correspondem aos parâmetros de desempenho obtidos para a frequência de 915 MHz para as duas etiquetas simuladas. A partir da Tabela 6 é possível visualizar uma leve melhoria da etiqueta quadricular com poluição com relação aos parâmetros de intensidade de irradiação, ganho e alcance simulados. Realizando um comparativo entre as etiquetas simuladas, tem-se que os parâmetros de desempenho para ambas as etiquetas possuem valores similares, podendo ambas serem aplicadas em torres de alta tensão para identificação de poluição artificial.

Visando a seleção de uma etiqueta que atenda os critérios para a identificação de poluição em torres metálicas, selecionou-se as etiquetas de geometria circular e quadricular para fabricação e aplicação de testes preliminares em laboratório.

Adicionalmente, na seção seguinte é apresentada uma análise de sensibilidade para a etiqueta RFID UHF quadricular visto que esta apresentou melhores parâmetros de desempenho em relação ao projeto de etiqueta RFID UHF circular.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – SIMULAÇÃO

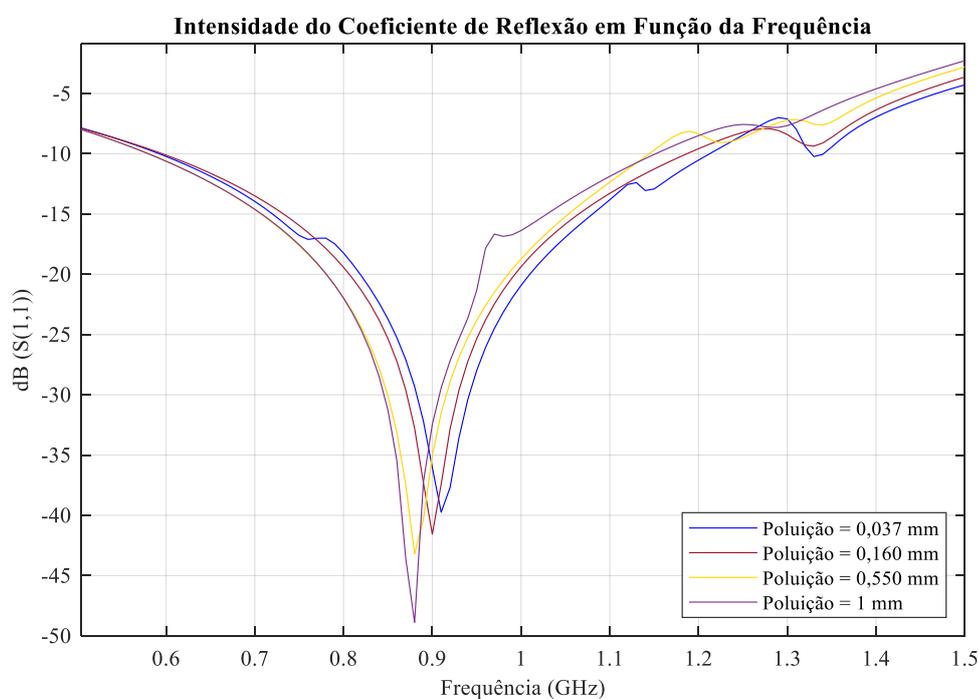
Nesta seção é apresentada uma análise de sensibilidade considerando a espessura e a distribuição da poluição superficial depositada para o projeto da etiqueta RFID UHF com geometria quadricular.

5.2.1 ESPESSURA DA POLUIÇÃO

Com o objetivo de verificar o desempenho da etiqueta RFID UHF quadricular para níveis de poluição depositada, foram analisadas quatro espessuras de poluição. Cada espessura simulada é correlacionada com o depósito de poluição, sendo que quanto maior a espessura maior é o nível de poluição depositada.

Os níveis de poluição foram estimados conforme a granulação e a área superficial do caulim (Silva e outros, 2010). Sendo assim, foram estimadas as seguintes espessuras: 0,037 mm; 0,160 mm; 0,550 mm; e 1 mm. Os resultados S_{11} obtidos são apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Coeficiente de reflexão da etiqueta RFID com diferentes espessuras de poluição.

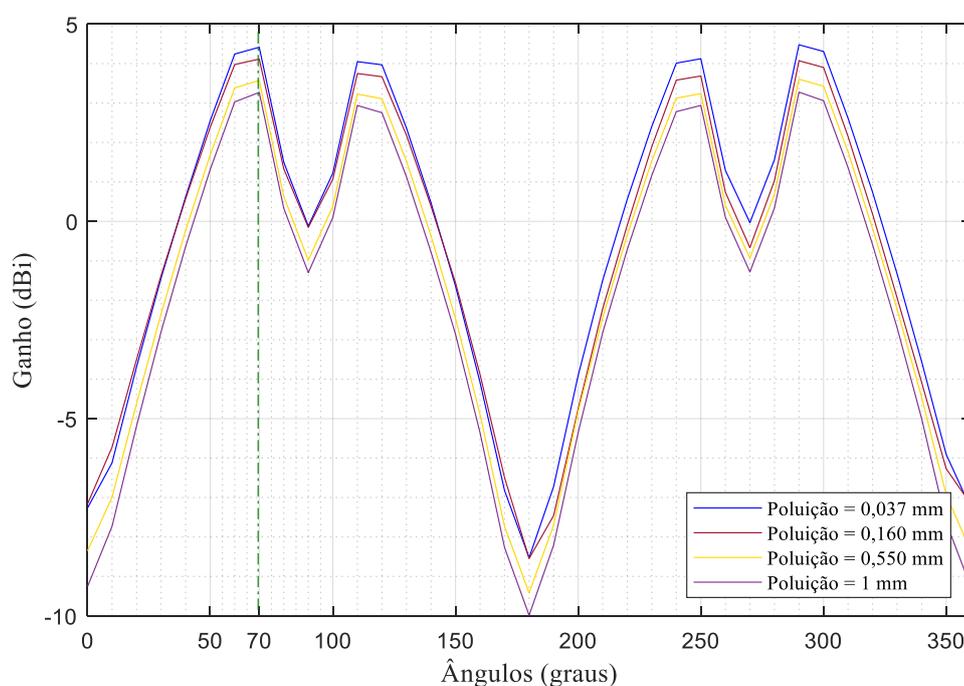


Fonte: Própria autora.

Na Figura 37, pode ser observado que há um deslocamento na frequência de ressonância ao variar a espessura da poluição, obtendo-se menores valores do S_{11} na frequência de 915 MHz, o que se deve ao descasamento de impedância entre a antena e o *chip*. Ademais, pode ser constatado que a frequência de ressonância diminui como aumento da espessura.

Com relação ao ganho, verificou-se um comportamento semelhante para todos os casos analisados, em que as etiquetas apresentam melhor desempenho na direção de 70° . Os diagramas de irradiação 2D e os parâmetros da etiqueta RFID UHF podem ser visualizados, respectivamente, na Figura 38 e na Tabela 7.

Figura 38 - Padrão de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] para diferentes espessuras de poluição.



Fonte: Própria autora.

Tabela 7 - Síntese dos parâmetros de desempenho para diferentes espessuras de poluição.

Espessura (mm)	S_{11}	Ganho	Z_{in}	Alcance
 0,037	-38,67 dB	4,41 dBi	$8,97 + j200,99$	21,78 m
 0,160	-35,01 dB	4,11 dBi	$10,36 + j205,7$	21,04 m
 0,550	-30,14 dB	3,57 dBi	$12,51 + j210,9$	19,76 m
 1,000	-28,24 dB	3,27dBi	$14,12 + j214,8$	19,08 m

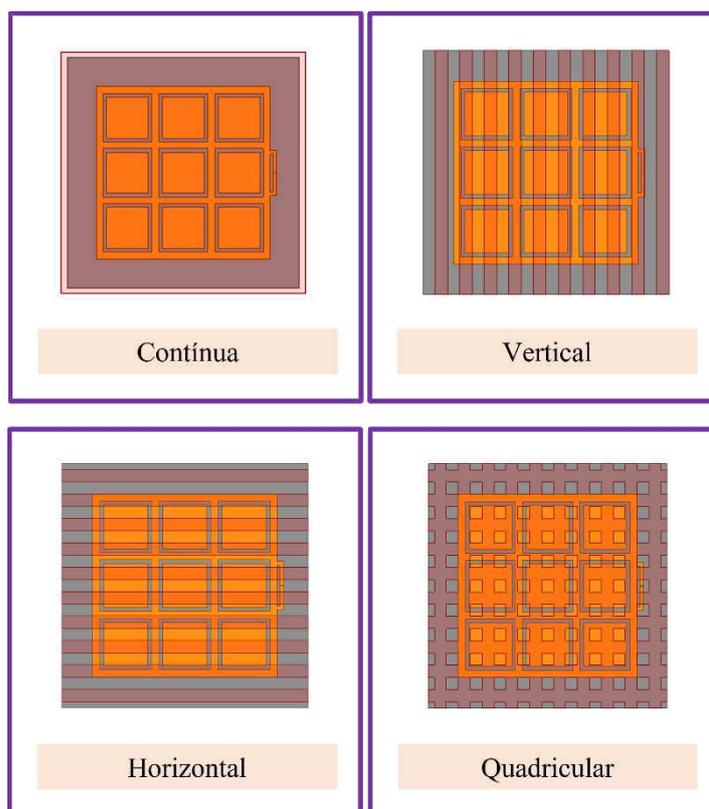
Fonte: Própria autora.

A partir dos resultados obtidos via simulação e explicitado nas Figura 38 e Tabela 7, constata-se que a etiqueta RFID UHF quadricular apresenta desempenho adequado e promissor para os 4 níveis de espessura de poluição simuladas. Os resultados atendem os requisitos para inserção das etiquetas em torres de alta tensão para identificação da poluição.

5.2.2 DISTRIBUIÇÃO DA POLUIÇÃO

Sabendo que a distribuição da poluição ambiental não tem um comportamento de distribuição contínua, foi realizado simulações com quatro distribuições geométricas de poluição, na expectativa de emular de uma forma mais próxima a distribuição da poluição ambiental. Na Figura 39 podem ser visualizadas as geometrias de distribuição aplicadas na simulação para a etiqueta quadricular com 0,05 mm de espessura de poluição.

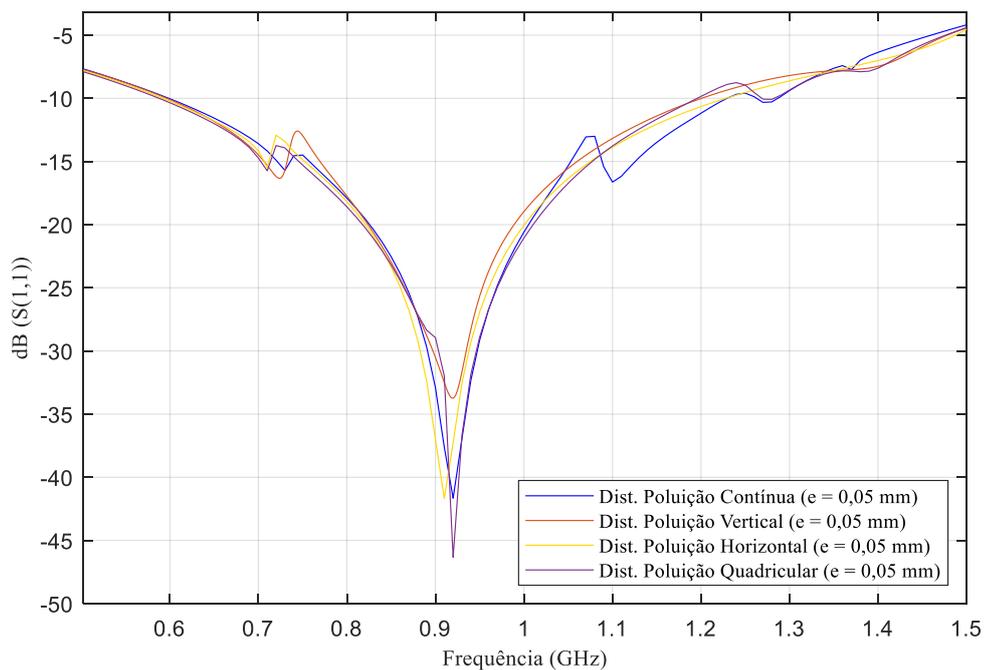
Figura 39 - Representação das distribuições de poluição depositadas na etiqueta RFID.



Fonte: Própria autora.

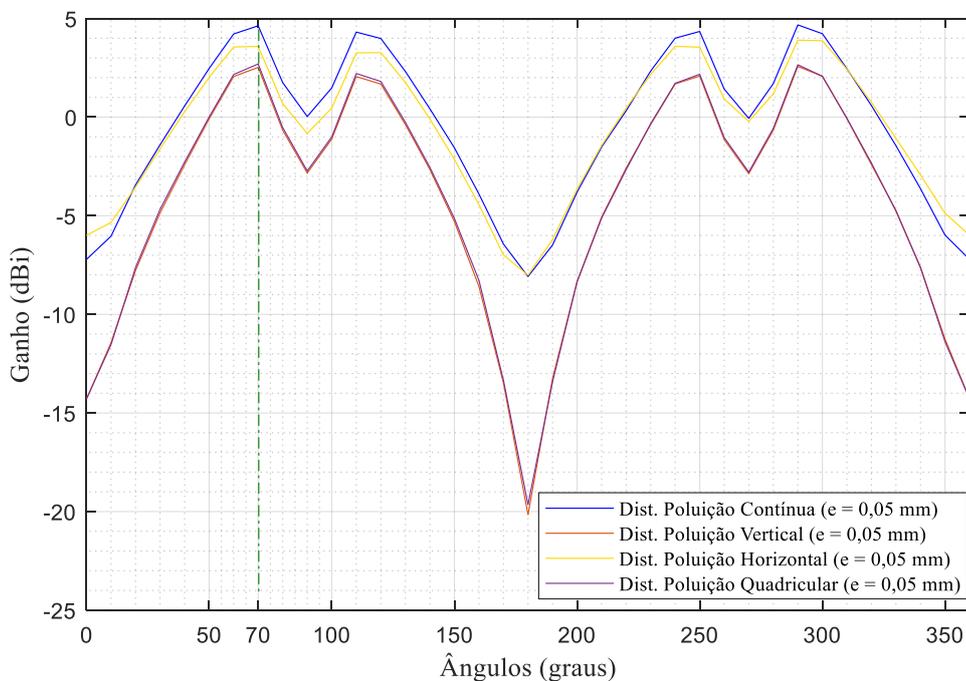
Os comportamentos de cada um dos parâmetros de desempenho para a etiqueta RFID UHF quadricular, coeficiente de irradiação e ganho, podem ser visualizados nas Figura 40 e Figura 41.

Figura 40 – Coeficiente de reflexão da etiqueta RFID UHF com diferentes distribuições de poluição.



Fonte: Própria autora.

Figura 41 - Padrão de irradiação 2D da etiqueta RFID UHF [dBi] para diferentes distribuições de poluição.



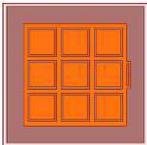
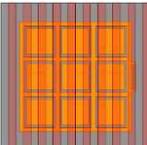
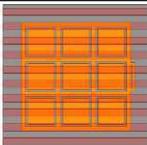
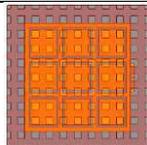
Fonte: Própria autora.

Analisando a Figura 40, identifica-se menores valores com relação ao coeficiente de reflexão para a frequência de 915 MHz. Entretanto, foi constatada que para todas as curvas analisadas é mantida a largura de banda de 600 MHz.

Com relação ao ganho, conforme pode ser visualizado na Figura 41, verificou-se um comportamento semelhante para todos os casos analisados, em que as etiquetas apresentam melhor desempenho na direção de 70°. Entretanto, foram observados valores de ganho menores para as distribuições vertical e quadricular.

De forma sumarizada, na Tabela 8, são apresentados os parâmetros de desempenho da etiqueta RFID UHF para as quatro distribuições de poluição depositada.

Tabela 8 - Síntese dos parâmetros de desempenho para as quatro distribuições de poluição.

Etiquetas	S11	Ganho	Z_{in}	Alcance
	-39,7 dB	4,68 dBi	3,73 + j201,6	22,46 m
	-33,39 dB	2,57 dBi	4,12 + j189,6	17,62 m
	-39,47 dB	3,90 dBi	16,26 + j194,5	20,53 m
	-39,61 dB	2,70 dBi	9,12 + j197,5	17,89 m

Fonte: Própria autora.

A partir dos resultados obtidos via simulação, constata-se que a etiqueta RFID UHF quadricular apresenta desempenho adequado, para inserção da etiqueta nas torres metálicas de alta tensão, considerando as quatro distribuições de poluição simuladas. De forma similar à análise de espessura, os resultados obtidos na análise de distribuição de poluição atendem os requisitos de alcance para inserção das etiquetas em torres metálicas de alta tensão para identificação da poluição.

5.2.3 CONSIDERAÇÕES

Ambas as análises de sensibilidade realizadas obtiveram resultados satisfatórios para aplicação da etiqueta RFID UHF em torres de alta tensão. Os parâmetros de

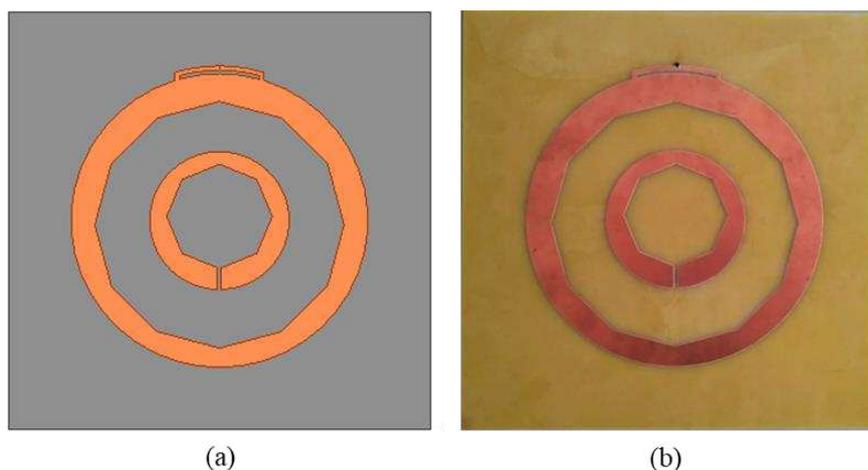
desempenho simulados se mostraram eficazes na identificação da poluição em todas as configurações avaliadas, evidenciando a potencialidade do uso das etiquetas em torres de alta tensão para monitoramento da poluição depositada.

5.3 FABRICAÇÃO E TESTES DAS ETIQUETAS

5.3.1 FABRICAÇÃO E TESTES INICIAIS

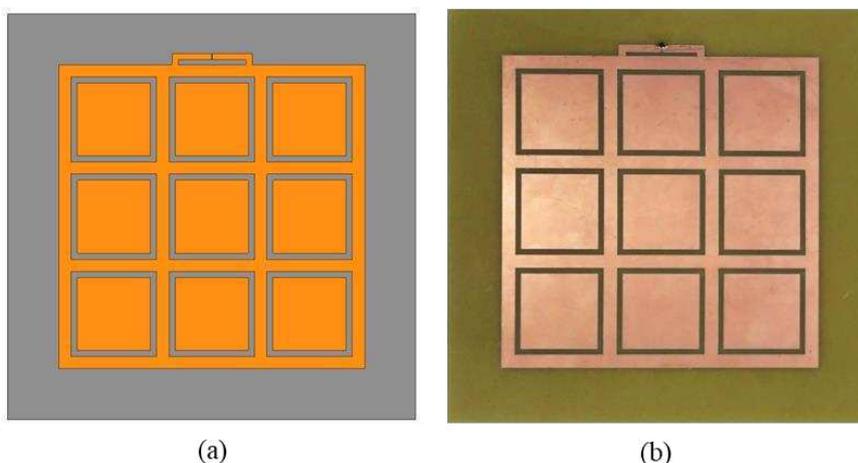
A partir dos resultados das simulações computacionais dos modelos apresentados nas Figura 24 e Figura 31, foram confeccionadas as etiquetas RFID UHF com geometria circular e quadricular, conforme apresentado nas Figura 42 e Figura 43.

Figura 42 - Etiqueta modelo circular: (a) simulada; (b) fabricada.



Fonte: Própria autora.

Figura 43 - Etiqueta modelo quadricular: (a) simulada; (b) fabricada.



Fonte: Própria autora.

Após a fabricação das etiquetas foram realizados testes iniciais no intuito de verificar o seu funcionamento sobre superfícies metálicas e obter o alcance máximo de leitura dessas etiquetas por meio do leitor RFID. Esse alcance máximo corresponde a distância na qual foi possível obter um percentual de 100% de sucesso nas tentativas de leitura. O arranjo experimental para as medições das etiquetas sem poluição depositada pode ser visualizado na Figura 44.

Figura 44 – Fotografia do arranjo experimental para análise da funcionabilidade das etiquetas fabricadas.



Fonte: Própria autora.

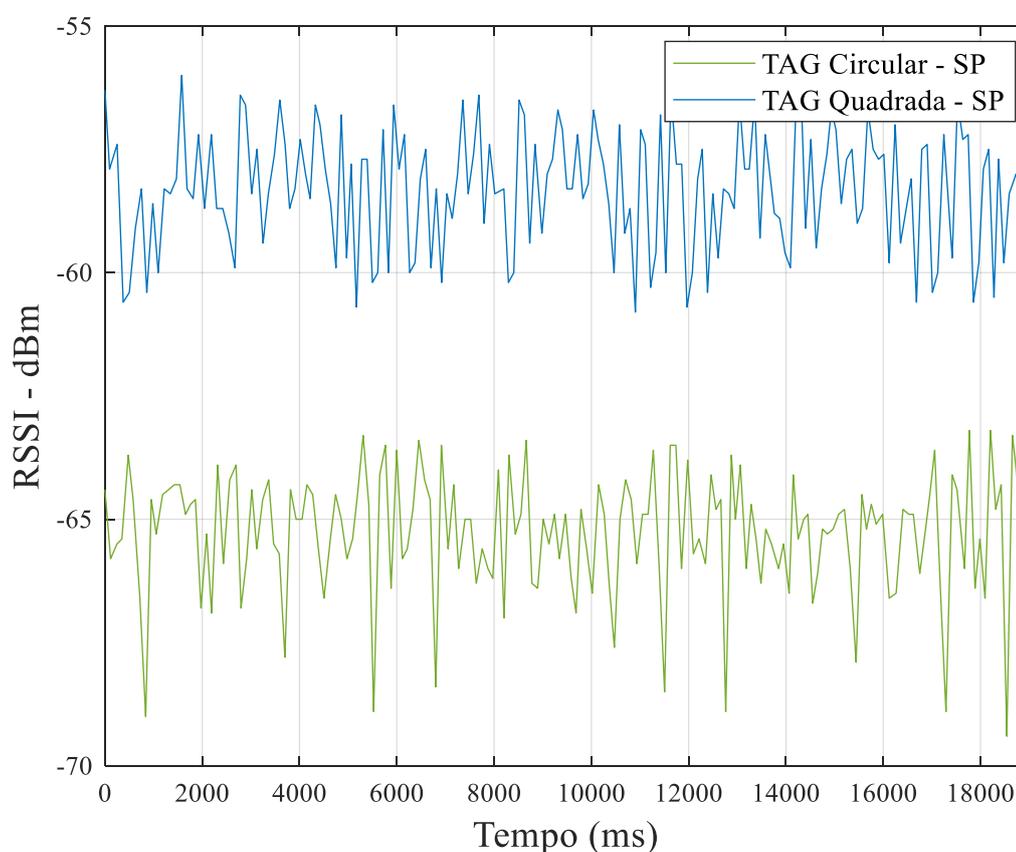
O arranjo experimental consistiu em uma mísula emulando uma torre de alta tensão (2,55 metros de altura), uma antena, um leitor e um computador. O local escolhido para as medições foi um galpão ao lado do Laboratório de Alta Tensão da UFCG, em que tinha como comprimento livre para as medições cerca de 12 metros. As etiquetas foram inseridas na mísula, posicionadas de forma vertical com o *chip* direcionado para a antena. A medição de alcance foi realizada para duas etiquetas conforme descrito no capítulo 4.

De acordo com os dados medidos, foi verificado que o alcance máximo de leitura para as etiquetas RFID UHF quadrangular e circular foi 11 metros (área máxima disponível

no momento da medição). Entretanto, pode ser observado que o valor médio do RSSI obtido nas medições com as etiquetas circular e quadrangular foram divergentes, apresentado um valor médio de - 61 dBm para etiqueta quadrangular e - 66 dBm para a etiqueta circular.

Para efeito visual ilustrativo, na Figura 45 é apresentado o RSSI obtido na medição das etiquetas RFID UHF circular e quadrangular, sem depósito de poluição, para um alcance de 8 metros.

Figura 45 - RSSI das etiquetas circular e quadrangular com distância de 8 m.



Fonte: Própria autora.

A partir da Figura 45, pode ser observada uma diferença nas faixas dos sinais RSSI com relação as etiquetas testadas. O RSSI para a etiqueta de geometria quadrangular apresentou uma faixa de valores entre -60,5 dBm a -57 dBm e uma estabilidade do sinal recebido, portanto, pode ser considerado o sinal recebido de boa qualidade relativa. Enquanto isso, o RSSI medido para a etiqueta de geometria circular apresentou picos próximos aos -70 dBm, refletindo em uma qualidade do sinal recebido inferior à etiqueta quadrangular. Logo, pode-se constatar que para a identificação da poluição em torres

metálicas a etiqueta RFID UHF com geometria quadricular apresentou desempenho superior quando comparada com a etiqueta com geometria circular. Por conseguinte, a etiqueta com geometria quadricular foi escolhida para as medições de sinais em ambiente externo.

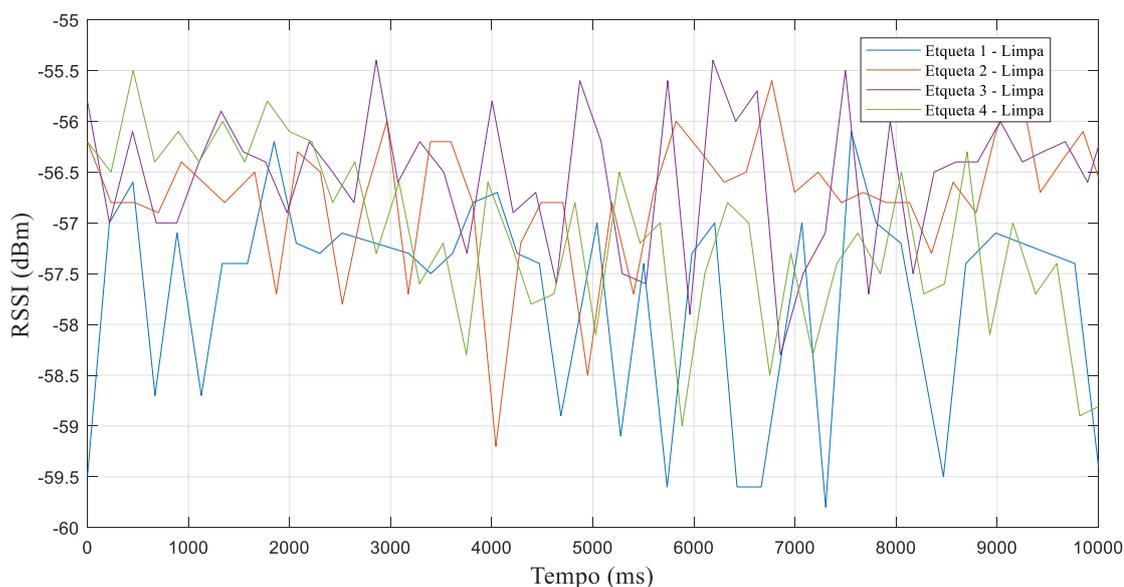
5.3.2 VALIDAÇÃO DAS ETIQUETAS

Com o objetivo de obter sinais de referência para cada etiqueta fabricada, proporcionando maior confiabilidade nas análises de classificação dos sinais, foram realizadas medições de RSSI para uma distância de 8 m em todas as etiquetas sem poluição (limpas) fabricadas.

Após testes iniciais e escolha do modelo da etiqueta, foram fabricadas quatro etiquetas RFID UHF, de geometria quadricular. As etiquetas (limpas) tiveram seu desempenho testado e validado por meio das medições de alcance. A métrica utilizada para avaliação do desempenho das etiquetas RFID UHF foi o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) durante 1 minuto. A medição de alcance foi realizada para as etiquetas conforme descrito no capítulo 4 e com distância fixada em 8 metros.

Na Figura 46 e Tabela 9 podem ser visualizados os dados de RSSI medidos com as etiquetas limpas e as respectivas análises estatísticas dos sinais (média, desvio padrão, máximo pico e mínimo pico).

Figura 46 - RSSI das etiquetas fabricadas (limpas) com distância de 8 m.



Fonte: Própria autora.

Tabela 9 - Extração de atributos para etiquetas limpas – 8 metros.

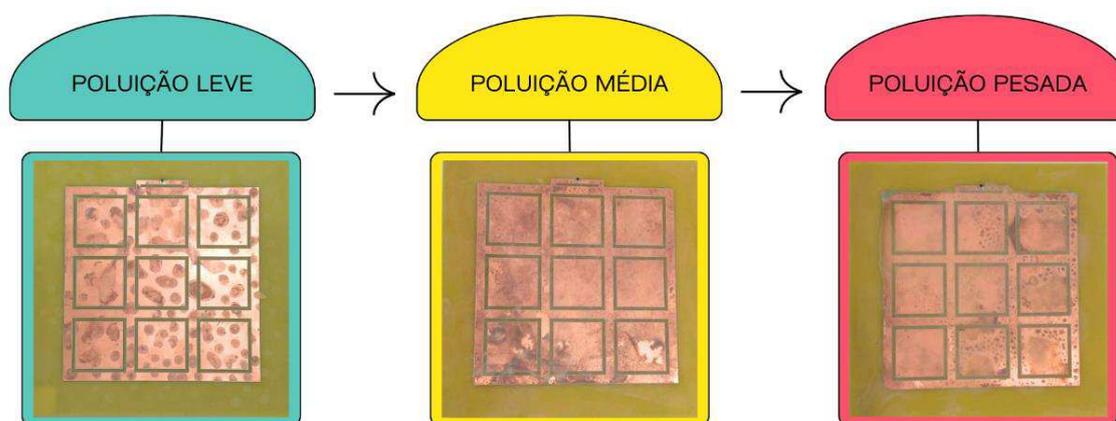
	Média (dBm)	Máx. Pico (dBm)	Min. Pico (dBm)	Desvio P. (dBm)
Etiqueta 1	-57,62	-55,9	-60,2	1,02
Etiqueta 2	-56,77	-55,4	-59,2	0,77
Etiqueta 3	-56,54	-54,6	-59	0,69
Etiqueta 4	-57,72	-55,5	-60,8	1,00

Fonte: Própria autora.

Para as quatro etiquetas fabricadas foi observado um desempenho paramétrico semelhante, obtendo-se um valor médio dos dados RSSI de - 57,19 dBm e um desvio padrão de 0,59 dBm. No entanto, existem discrepâncias entre os sinais adquiridos provenientes do processo artesanal de fabricação (tamanho efetivo do cobre, soldagem de *chips*, entre outros).

Após as medições dos sinais de referência para as etiquetas limpas, foram realizadas medições com as etiquetas com poluição leve, média, pesada e sem poluição. Na Figura 47 podem ser visualizadas as fotografias das etiquetas com poluição leve, média e pesada.

Figura 47 - Fotografias das etiquetas com poluição leve, média e pesada.



Fonte: Própria autora.

5.3.3 CONSIDERAÇÕES

Por meio dos testes iniciais para as etiquetas RFID UHF fabricadas foi possível obter uma escolha do modelo representativo para os testes com poluição em ambiente externo. A partir das análises realizadas foi constatado que a etiqueta RFID UHF com geometria quadricular apresentou um desempenho adequado para um potencial monitoramento de poluição em torres metálicas de alta tensão. Entre os parâmetros de

avaliação pode-se destacar a estabilidade de leitura durante as medições e o alcance máximo de 11 metros.

5.4 MEDIÇÕES E ANÁLISES

A etiqueta RFID UHF com geometria quadricular proposta foi testada, por meio das medições de alcance, em quatro níveis de poluição com o objetivo de verificar o desempenho efetivo de comunicação e sensoriamento. As medições foram realizadas em ambiente externo ao Laboratório de Alta Tensão na UFCG. O arranjo experimental consistia em uma torre miniatura de 2,55 metros de altura (emulando uma torre de alta tensão), uma antena, um leitor e um computador. As etiquetas poluídas foram inseridas na torre emulada, posicionadas de forma vertical com o *chip* direcionado para a antena. A medição de alcance foi realizada para as etiquetas poluídas conforme descrito no capítulo 4. O local e arranjo experimental podem ser visualizados na Figura 48.

Figura 48- Fotografia do arranjo experimental externo – LAT UFCG.



Fonte: Própria autora.

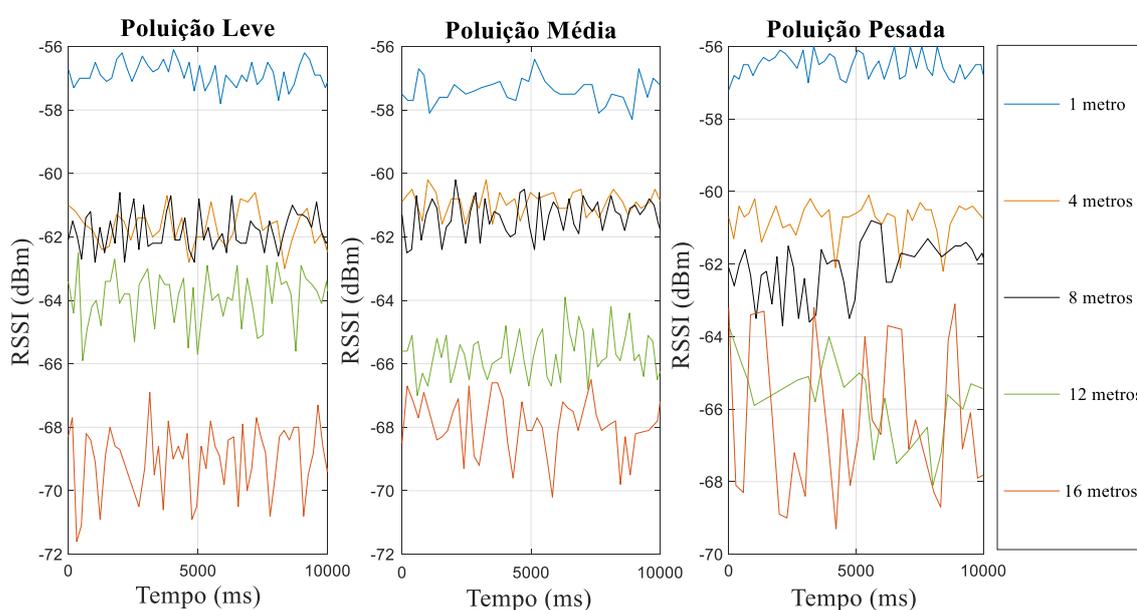
De acordo com os dados medidos, foi verificado que a etiqueta RFID UHF desenvolvida obteve um alcance máximo de 18 metros para a etiqueta com poluição leve e 16 metros para os níveis: sem poluição; poluição média; e poluição pesada.

A discrepância entre o alcance teórico (alcance simulado) de 19,97 m para etiqueta sem poluição e de 22,46 m para a etiqueta com poluição e o alcance medido em ambas as situações é provavelmente devido a uma combinação de: *multipath* no ambiente; perda

de apontamento entre a antena da etiqueta e a antena do leitor; e perda de compatibilidade entre o *chip* da etiqueta e a antena.

De forma sumarizada, na Figura 49 são apresentadas as medições realizadas para os três níveis poluição com variação da distância de leitura. Para melhor visualização foram inseridas as medições, sobremaneira, com passos de 4 metros. Adicionalmente, as medições realizadas, com níveis de poluição, em ambiente externo podem ser visualizadas no Apêndice A.

Figura 49 - RSSI versus medições de alcance para poluição leve, média e pesada.



Fonte: Própria autora.

Uma análise estatística foi realizada a partir dos dados de RSSI medidos para as distâncias de leitura de 1, 4, 8, 12 e 16 metros e foram obtidos os parâmetros: média; máximo valor de pico; mínimo valor de pico; e desvio padrão. Por meio destes parâmetros é possível explorar o comportamento do RSSI medido para cada nível de poluição, buscando uma distância de leitura adequada. Na Tabela 10 podem ser visualizados os valores paramétricos obtidos por meio dos dados RSSI medidos para as respectivas distâncias de leitura.

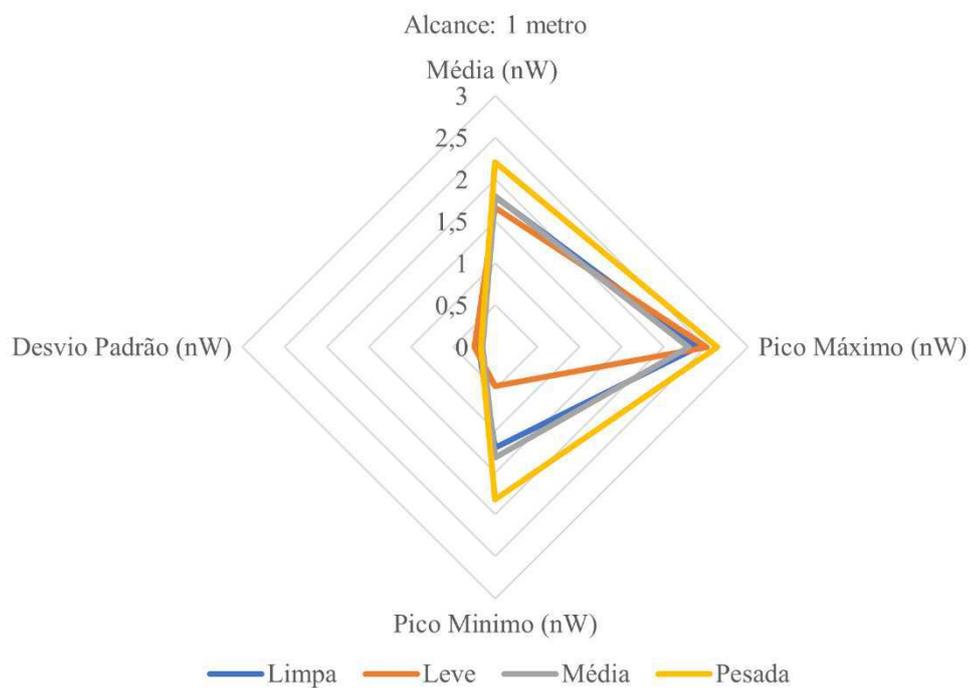
Tabela 10 - Extração de atributos para as etiquetas: sem poluição; poluição leve; poluição média; e poluição pesada.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Limpa	Leve	Média	Pesada
1 metro	Média	-57,48	-57,84	-57,46	-56,58
	Máx. Pico	-56,2	-56	-56,4	-55,8
	Min. Pico	-59,2	-63,3	-58,8	-57,4
	Desvio P.	0,48	0,65	0,36	0,33
4 metros	Média	-56,64	-61,57	-60,91	-60,87
	Máx. Pico	-54,1	-60,3	-59,7	-59,7
	Min. Pico	-59,7	-64,5	-63,3	-63
	Desvio P.	1,37	0,61	0,43	0,59
8 metros	Média	-56,54	-61,21	-61,34	-61,89
	Máx. Pico	-54,6	-59,9	-60,1	-60,3
	Min. Pico	-59	-62,4	-63,1	-67,8
	Desvio P.	0,69	0,47	0,57	0,87
12 metros	Média	-60,36	-63,97	-65,68	-65,58
	Máx. Pico	-57,8	-62,4	-63,6	-63,5
	Min. Pico	-64,4	-66,8	-68,4	-70,3
	Desvio P.	1,65	0,88	0,72	1,19
16 metros	Média	-60,44	-69,13	-68,11	-66,25
	Máx. Pico	-57,2	-66,2	-65,7	-62,7
	Min. Pico	-63,8	-72,6	-72,2	-71,4
	Desvio P.	1,54	1,09	1,09	1,89

Fonte: Própria autora.

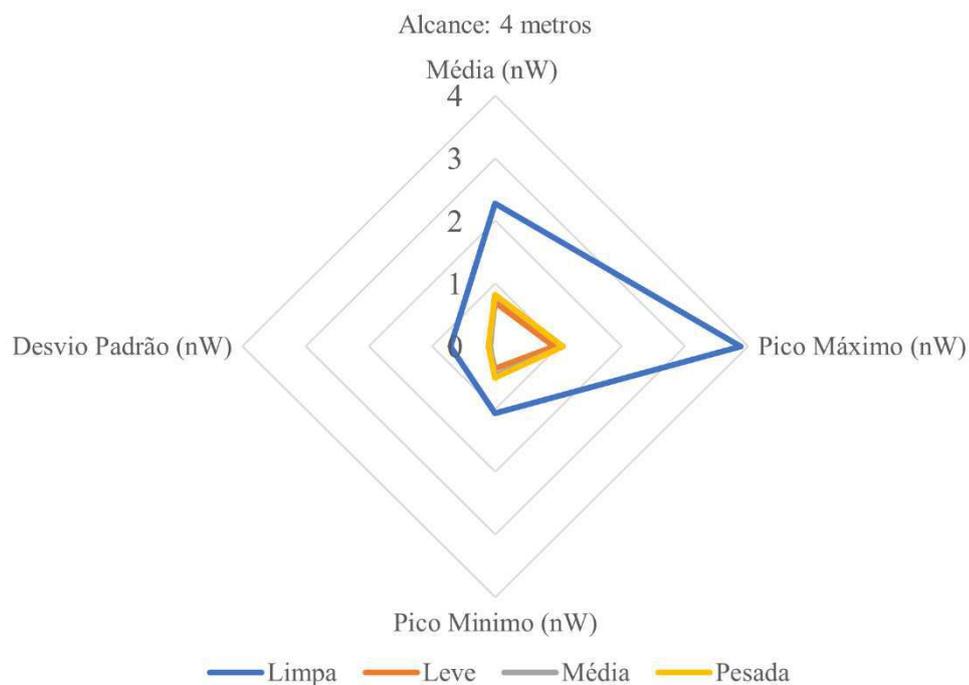
Com o objetivo de auxiliar na visualização e no potencial diagnóstico da poluição sob diferentes distâncias de leitura os parâmetros apresentados na Tabela 10 foram representados em gráficos de radar. Para fins de uma melhor visualização, foi adotada a unidade de medida nW (nanoWatt) para os parâmetros: média; máximo valor de pico; mínimo valor de pico; e desvio padrão. Assim, foram gerados os gráficos de radar, conforme pode ser visto nas Figuras 50 a 54.

Figura 50 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 1 metro.



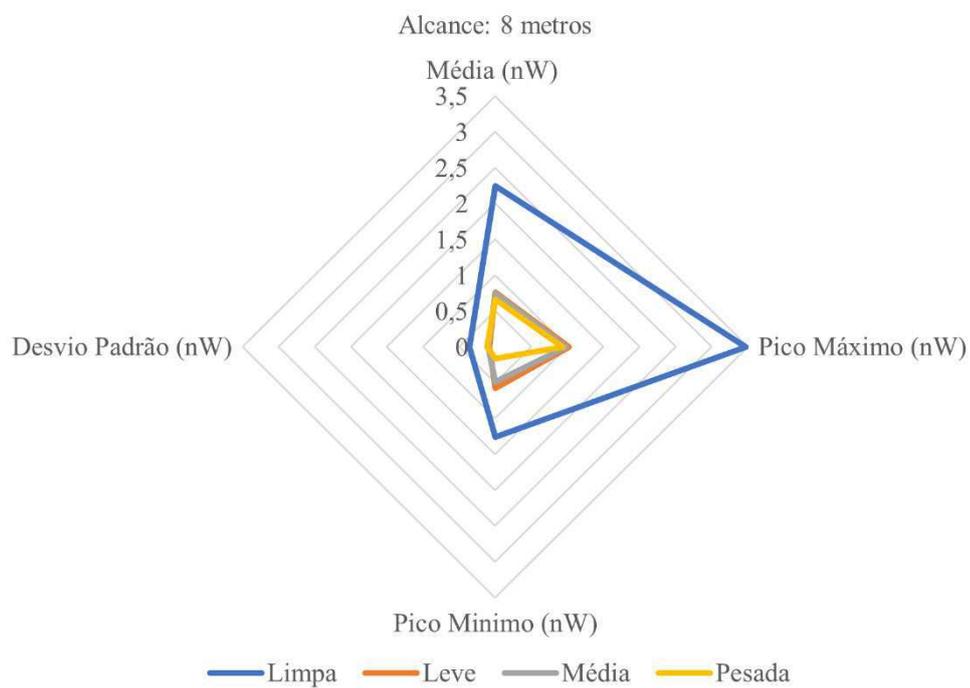
Fonte: Própria autora.

Figura 51 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 4 metros.



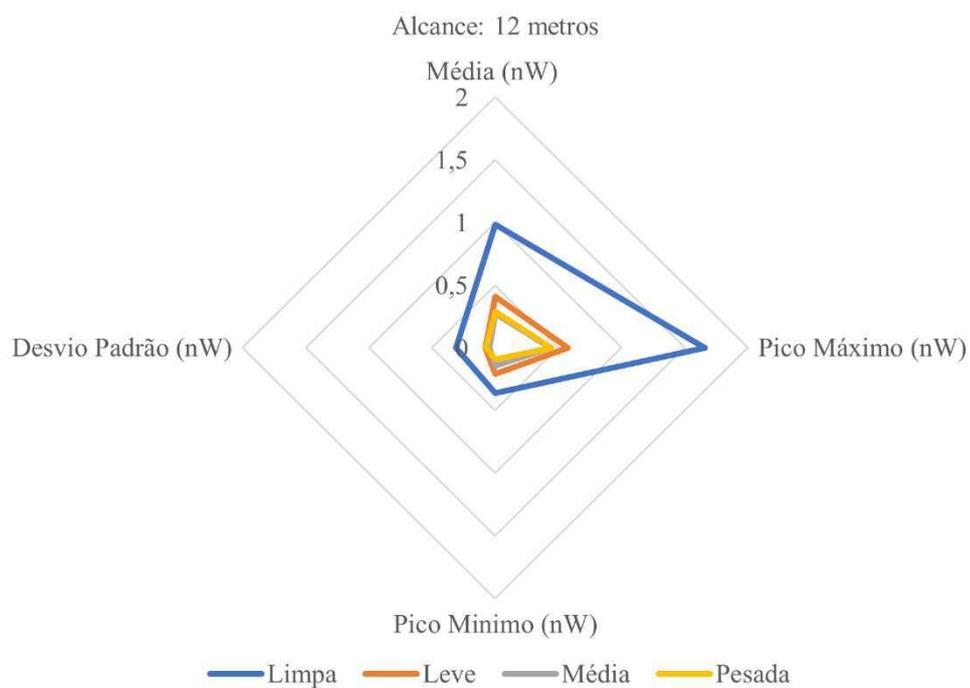
Fonte: Própria autora.

Figura 52 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 8 metros.



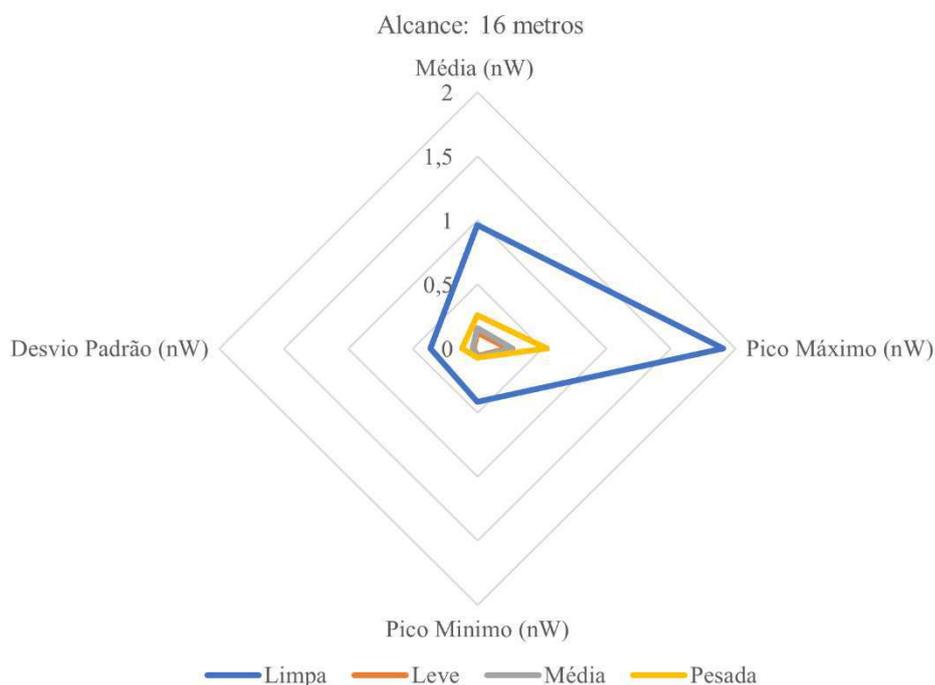
Fonte: Própria autora.

Figura 53 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 12 metros.



Fonte: Própria autora.

Figura 54 - Gráfico radar para os dados RSSI medidos em 16 metros.



Fonte: Própria autora.

A análise por meio da visualização dos gráficos de radar apresentados nas Figuras 50 a 54 mostrou ser uma ferramenta eficaz para investigar a possibilidade de identificação de poluição em torres de alta tensão a partir de parâmetros classificatórios extraídos dos dados RSSI medidos. A partir das análises visuais realizadas com o auxílio dos gráficos de radar, podem ser feitos os seguintes apontamentos:

- Todos os gráficos de radar apresentados nas Figuras 50 a 54 evidenciam um comportamento classificatório entre a etiqueta sem poluição e a etiqueta com poluição pesada.
- As medições realizadas para o alcance de 1 metro, conforme visto na Figura 50, apresentaram uma distinção entre três níveis de poluição. Entretanto, os níveis correspondentes a sem poluição e poluição média apresentaram sobreposição. Logo, não foi possível a distinção classificatória entre a etiqueta sem poluição e a etiqueta com poluição média. Adicionalmente, a distância de 1 metro não corresponde a uma distância segura para o operador, o que permite concluir que essa distância de medição não é indicada para medições em solo.

- Para o alcance de 4 metros, apresentado na Figura 51, observa-se uma sobreposição dos níveis de poluição leve, média e pesada para todos os parâmetros analisados. Portanto, pode ser visualizado um comportamento classificatório da identificação da poluição, entretanto não foi indicado o nível da poluição.
- Figura 53, é possível verificar um comportamento similar para as 2 distâncias de leitura. Nestas distâncias são visualizados três níveis classificatórios de poluição: sem poluição; poluição leve/média; e poluição pesada. Vale ressaltar que a poluição leve está sobreposta da poluição média, indicando um agrupamento das classificações leve e média.
- Com relação ao alcance de 8 metros, apresentado na Figura 52, o parâmetro mínimo valor de pico apresenta um comportamento classificatório entre os níveis: sem poluição; poluição leve/média; e poluição pesada.
- Para o alcance de 12 metros, apresentado na Figura 53, observa-se uma sobreposição para os níveis de poluição média e pesada analisados para os parâmetros média e máximo valor de pico. Entretanto, quando analisado o parâmetro mínimo valor de pico observa-se uma potencial classificação dos níveis de poluição leve, média e pesada. Todavia, são necessários estudos adicionais para uma classificação assertiva dos níveis de poluição.
- Com relação ao alcance de 16 metros, apresentado na Figura 54, observa-se que os parâmetros média e máximo valor de pico apresentam um comportamento classificatório entre os níveis: sem poluição; poluição leve/média; e poluição pesada.

A partir das análises visuais e estatísticas realizadas por meio dos valores paramétricos extraídos dos dados RSSI e dos gráficos de radar, verificou-se uma potencial empregabilidade da etiqueta RFID UHF proposta no monitoramento de poluição em torres de alta tensão. Ao observar os parâmetros extraídos foi constatado um comportamento classificatório para a etiqueta sem poluição e com poluição pesada. Entretanto, para um monitoramento e classificação dos níveis de poluição deve ser

realizada uma análise de dados mais robusta e inclusão de estudos adicionais para a diferenciação e classificação dos sinais.

5.4.1 CONSIDERAÇÕES

O modelo analítico e os experimentos detalhados demonstraram que a etiqueta RFID UHF proposta é uma boa candidata para a identificação de poluição pesada em torres de alta tensão. Além disso, são apresentados os resultados de uma prova de conceito para aplicabilidade de etiquetas RFID UHF para identificação dos níveis de poluição em torres de alta tensão de forma preventiva.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada, simulada e desenvolvida uma etiqueta RFID UHF para identificação de poluição em torres metálicas de alta tensão, o que proporcionou uma nova contribuição ao projeto de etiqueta RFID UHF por meio da prova de conceito apresentada nesta pesquisa.

No desenvolvimento das etiquetas RFID UHF para aplicações sobre estruturas metálicas foi proposta a utilização dos materiais FR-4, como substrato, e cobre, como elemento irradiante, e de técnicas de otimização geométrica disponíveis na literatura. Como material poluente prejudicial aos isoladores elétricos utilizou-se o caulim, determinado conforme a norma IEC 60815. Os materiais e técnicas de otimização geométricas utilizados nesta pesquisa proporcionaram os projetos de duas geometrias de etiquetas RFID UHF, circular e quadricular, desenvolvidas para identificação de poluição em torres de alta tensão.

Ambas as etiquetas projetadas por meio de simulações multifísicas foram avaliadas mediante aos parâmetros de desempenho: coeficiente de reflexão; ganho; alcance; e impedância de entrada. As etiquetas simuladas apresentaram coeficientes de reflexão menores que -30 dB em 915 MHz, alcances superiores a 19 metros, valores de impedância de entrada similares a do chip utilizado e um ganho máximo de 4,68 dB para a etiqueta com geometria quadricular. Sendo assim, os parâmetros de desempenho das etiquetas simuladas são considerados adequados para utilização das etiquetas RFID UHF em torres metálicas objetivando a identificação da poluição. Entretanto, a etiqueta com geometria quadricular apresentou parâmetros de desempenho superiores quando comparada com a etiqueta com geometria circular.

A etiqueta com geometria quadricular foi selecionada para análise de sensibilidade da espessura e distribuição da poluição via simulação. Por meio das análises de sensibilidade ficou constatado que a etiqueta RFID UHF com geometria quadricular apresentou potencial para aplicação como sensor UHF instalado em torres de alta tensão para detecção de poluição, visto os bons parâmetros de desempenho (intensidade de irradiação, ganho e alcance) mesmo considerando poluições espessas.

Quanto aos resultados experimentais realizados em ambiente externo, a etiqueta RFID UHF com geometria quadricular apresentou os seguintes alcances experimentais máximos: 18 metros, para a etiqueta com poluição leve; e 16 metros, para os demais

níveis de poluição. Logo, estes alcances refletem diretamente em uma distância segura para inspeções das torres de alta tensão, bem como em uma inspeção não-invasiva.

O processamento e a análise dos dados RSSI medidos para a etiqueta RFID UHF com geometria quadricular, considerando os níveis de poluição analisados, evidenciou a distinção dos sinais provenientes da etiqueta com poluição pesada quando comparados com os sinais provenientes da etiqueta sem poluição. Contudo, também foi observado uma semelhança entre os sinais de medição da etiqueta com níveis de poluição leve e média, não sendo possível seu diagnóstico na análise realizada nesta pesquisa.

A partir dos gráficos radar constata-se que as variáveis “mínimo valor de pico” e “máximo valor de pico” permitem uma identificação de padrões correspondentes aos níveis de poluição. Assim, estas variáveis podem ser utilizadas como parâmetros para tomada de decisão, vislumbrando, em especial, um futuro diagnóstico dos três níveis de poluição. Desta forma, para um monitoramento e classificação dos quatro níveis de poluição são necessárias uma análise de dados mais robusta e a inclusão de estudos adicionais para a diferenciação dos sinais.

As medições dos dados RSSI, as análises de sensibilidade, as extrações de atributos e os processamentos das informações evidenciaram a utilização da etiqueta RFID UHF para a identificação da poluição pesada em torres metálicas de alta tensão. Destarte, esta identificação possibilita uma manutenção preventiva com tomada de decisão, como a necessidade de algum tipo de intervenção na torre monitorada, que pode ser uma lavagem do isolador ou até mesmo uma substituição.

Conclui-se assim, que a etiqueta RFID UHF apresentada nesta tese possui potencial para ser aplicada nas torres metálicas de alta tensão, proporcionando uma maior assertividade nos diagnósticos de poluição e, conseqüentemente, rotinas de inspeção em cadeias de isoladores mais seguras, eficientes e não-invasivas. Além disso, possibilita a realização da catalogação das torres metálicas de alta tensão por meio das etiquetas RFID. Por fim, com o objetivo de realizar uma classificação dos diversos níveis de poluição, estudos adicionais devem ser realizados, conforme apresentados na subseção a seguir.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Diante à pesquisa apresentada é natural que existam possibilidades de desdobramentos ou mesmo complementação da metodologia proposta e utilizada. Portanto, seguindo a linha de pesquisa desta tese, a seguir são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

- **Validação e testes das etiquetas RFID UHF em torres de alta tensão em campo.** Neste trabalho foi realizado o projeto das etiquetas como aplicação de prova de conceito. Apesar dos resultados experimentais, são necessárias pesquisas voltadas ao potencial elétrico e à degradação ambiental incidentes sobre a etiqueta.
- **Desenvolver um sistema (*off-line* ou *on-line*) de monitoramento de poluição completamente aplicável em campo.** Etapas de pesquisas devem ser contempladas para que a estrutura composta pelas etiquetas RFID componha um sistema de monitoramento contínuo completamente aplicável em campo. Por exemplo: desenvolvimento de uma etiqueta ou revestimento com material resistente à degradação ambiental; sistema embarcado para protótipo de medição em campo; rede de comunicação para sistemas *on-line*; entre outros.
- **Avaliação de novos materiais e revestimentos para melhor desempenho da etiqueta e aplicação em campo.** Conforme apresentado nesta tese, foi utilizado FR-4 e cobre para a fabricação das etiquetas de forma artesanal. Adicionalmente, não foi realizada nenhuma avaliação de degradação e desempenho de longo prazo em campo. Sendo assim, é necessário estudos de degradação e de novas aplicações de materiais promovendo melhor desempenho das etiquetas em campo.
- **Estudo e caracterização dielétrica da poluição natural em locais com incidências de falhas em isoladores elétricos.** A caracterização dielétrica da poluição ambiental deve ser realizada para promover a otimização do modelo da etiqueta RFID UHF proposta neste trabalho. Logo, também

deve ser realizado o estudo de DDSE e DDNS para o mesmo ambiente avaliado.

- **Estimativa de vida útil das etiquetas RFID UHF aplicadas em torres de alta tensão.** Com o monitoramento contínuo do RSSI em laboratório e em campo, em torres de alta tensão energizadas, é possível traçar o comportamento da poluição depositada (para campo) e estimar a vida útil das etiquetas a partir da medição dos sinais.
- **Elaboração de um arranjo laboratorial que permita estabelecer estudos de otimização da etiqueta RFID exposta ao campo elétrico.** A presença do campo elétrico não foi avaliada nesta tese, contudo espera-se algum tipo de interferência na medição do RSSI. Logo, é necessário avaliar o impacto desses fenômenos na prática, de modo que eles possam ser compensados no projeto das etiquetas RFID aplicadas em torres de alta tensão energizadas.
- **Algoritmos computacionais robustos para identificação de variáveis ótimas para classificação dos sinais.** A partir de um banco de dados com diversos RSSI é necessário o desenvolvimento de um algoritmo computacional para análise e identificação de variáveis estatísticas ótimas para a classificação dos sinais medidos.
- **Análise estatística de distância ótima para medições em campo e laboratório.** Modelagem estatística dos dados RSSI objetivando estabelece uma relação de distância ótima de medição para diferentes posições da etiqueta nas torres de alta tensão.
- **Inteligência artificial aplicada aos RSSI para identificação e classificação do RSSI.** Uso de técnicas de inteligência artificial para capacitar a máquina a aprender com os dados medidos e promover uma classificação assertiva e confiável. Com isto, possibilitar uma maior confiabilidade do sistema a ser desenvolvido para fins de monitoramento em campo *off-line* ou *on-line*.

- **Aquisição de um banco de dados robusto.** Para o cumprimento de todos os itens destacados anteriormente, faz-se necessária a aquisição de um banco de dados robusto, fornecendo subsídios suficientes para o desenvolvimento e validação dos trabalhos propostos nesta tese.

REFERÊNCIAS

ABDULHADI, A. E.; DENIDNI, T. A. **Self-Powered Multi-Port UHF RFID Tag-Based-Sensor**. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 1, no. 2, pp. 115–123, 2017.

ABUGABAH, A.; NIZAMUDDIN, N.; ABUQABBEH, A. **A review of challenges and barriers implementing RFID technology in the Healthcare sector**. Procedia Computer Science, v. 170, p. 1003 -1010, 2020, ISSN 1877-0509.

ADAMS, G. E. **The Calculation of the Radio Interference Level of Transmission Lines Caused by Corona Discharges**. Transactions of The American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 75, n. 3, p. 411-419, 1956.

ALBUQUERQUE, E. L. **Análise e tomada de decisão utilizando sistema de monitoramento via satélite para poluição em cadeia de isoladores de alta tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

ALIA, A. and HASEEB, M. **Radio frequency identification (RFID) technology as a strategic tool towards higher performance of supply chain operations in textile and apparel industry of Malaysia**. Uncertain Supply Chain Management, v.7, p. 215–226, 2019.

ALVES, L. N. T.; COSTA, E. G; OLIVEIRA NETO, A. B.; NOBREGA, R. B.; FERREIRA, T. V. **Electrical Insulators Hydrophobicity Classification using Digital Image Processing**. In: 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Buenos Aires. 20th ISH, 2017.

ANEEL. **Avaliação dos Custos Relacionados às Interrupções de Energia Elétrica e suas Implicações na Regulação. Relatório 5**, jun. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/9309513/Produto+5.pdf/>>. Acesso em março de 2022.

ANGELES, R. RFID technologies: supply-chain applications and implementation issues. **Information Systems Management**, v. 22, n. 1, p. 51-65, 2005.

ANIS, H; EL-MORSHEDY, A.; NADA, S. A. An Electromagnetic Detector of Insulator Surface Discharge. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-22, n. 1, p.75-79, 1986.

ANJUM, S.; EL- HAG, A.; JAYARAM, S.; NADERIAN, A. **Classification of Defects in Ceramic Insulators Using Partial Discharge Signatures Extracted from Radio**

Frequency (RF) Signals. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Des Moines, p. 212-215, 2014.

ANJUM, S.; JAYARAM, S.; EL-HAG, A.; NADERIAN, A. **Radio Frequency (RF) Technique for Field Inspection of Porcelain Insulators.** International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Sydney, p. 1019-1022, 2015.

ARAUJO, J. I. L. **Sistema RFID para monitoramento das frequências respiratória e cardíaca.** Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. Paraíba. Brasil, 2019.

AUCKLAND, D. W.; MCGRAIL A. J.; SMITH, C. D.; VARLOW; ZHU, J.; ZHAO, D. **Application of ultrasound to the inspection of insulation.** IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, [s.l.], v. 143, n. 3, p.177-181, 1 maio 1996. Institution of Engineering and Technology (IET).

AZORDEGAN, E.; KORDI, B.; SWATEK, D. R. **Radiated Electromagnetic Field Signature of Faulty and Polluted Porcelain Insulators.** International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, p. 449-452, 2010.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory - Analysis and Design.** New Jersey: John Wiley, 2005.

BARMAN, B.; BHASKAR, S.; SINGH, A. K. **Dual-Band UHF RFID Tag Antenna Using Two Eccentric Circular Rings.** Progress In Electromagnetics Research M, v. 71, p.127-136, 2018.

BOGORÓDITSKI, N. P.; PÁSINKOV, V. V.; TAREEV, B. M. **Materiales electrotécnicos.** Editorial Mir, Moscu, 1979.

BRAINI, S. **Coatings for outdoor high voltage insulators.** Tese de Doutorado. Cardiff University, 2013.

CHAO, C. C.; YANG, J. M.; JEN, W. Y. **Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005.** Technovation, vol. 27. no.5, pp. 268-279, 2007.

CHAPRE, Y.; MOHAPATRA, P.; JHA, S.; SENEVIRATNE, A. **Received Signal Strength Indicator and its Analysis in a Typical WLAN System.** 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Sydney, Austrália: IEEE, 2013. p. 304-307.

CHEN, H. D.; SIM, C. Y. D.; TSAI, C. H.; KUO, C. **Compact Circularly Polarized Meandered-Loop Antenna for UHF Band RFID Tag.** IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, v.15, p.1-1, 2015.

CHU, J. **Applications of RFID technology.** IEEE Microwave Magazine. 2015; 16(6):64-65. doi: 10.1109/MMM.2015.2419891.

CREPALDI, P. C. and PIMENTA, T. C. **Radio Frequency Identification**. InTech, Nov. 29, 2017. doi: 10.5772/intechopen.69602.

DENG, F.; WEN, K.; XIE, Z.; LIU, H.; TONG, J. **External Breaking Vibration Identification Method of Transmission Line Tower Based on Solar-Powered RFID Sensor and CNN**. Electronics, v.9, 519, 2020.

DIAS, B. A. **Gestão Técnica de Isoladores Poliméricos Utilizando Aprendizado de Máquina**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. Paraíba. Brasil, 2021.

DOMDOUZIS, K.; KUMAR, B.; ANUMBA, C. **Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction**. Advanced Engineering Informatics, v.21, p.350-355, 2007.

DUARTE, O. C. M. B.; MONTEIRO, F. V.; PACHECO, G. F. C.; LIMA, L. C. **RFID Radio-Frequency Identification**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/rfid/index.html> Acessado em: 15/10/2023.

EL-AHMAR, L.; AHMED, E.; ZBITOU, J.; BOUZIDA, I.; LAKSSIR, B. **A New Design of UHF RFID Tag Based on Split Ring Resonator for Moroccan Frequency Band**. Third International Conference on Computing and Wireless Communication Systems, ICCWCS 2019.

EL-ARABATY, A.; NOSSEIR, A.; EL-DEBEIKY, S.; NASSER, E.; EL-SHARKAWI, E.; EL-SARKY, A. **Application of infra-red thermography to the study of temperature distribution on energized polluted insulators**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. EI-14, n. 5, p. 278–280, 1979.

EL-DEBEIKY, S.; KHALIFA, M. **Calculating the Corona Pulse Characteristics and its Radio Interference**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-90, n. 1, p. 165-179, 1971.

FEITOSA NETO, S. A.; ALMEIDA, G. F. B.; CASTRO, A. A.; SOUSA, F. G. G.; GUIDO JUNIOR, P.; BARBOSA, R. P.; CUSTÓDIO, S. R. M.; ALMEIDA, T. G.; COSTA, T. R. V. **Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília, 2017.

FERNANDES, E. M. F. **Aplicação de superfície seletiva em frequência para melhoria de desempenho de sistemas de antenas tipo banda dupla**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. Paraíba. Brasil. 2011.

FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; DA COSTA, E. G.; ANGELINI, J. M.G.; NALLIM, F. E.; MENDONÇA, P. **Naturally aged polymeric insulators: Washing and its consequences.** Proceedings - International Symposium: Modern Electric Power Systems, MEPS'10, 2010.

FERRO, V.; LUZ, A.; LUCRECIO, A. **Small long range UHF tag for metal applications.** IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2013.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication.** 3^a. ed. Sussex, Reino Unido: Wiley, 2010.

FONSÊCA, N. S. M. **Integração de funções sensoras em etiquetas RFID UHF passivas: aplicações na medição de umidade do solo e maturação de queijo emental.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Paraíba. Brasil. 2020.

GARCIA, R. W. S.; SANTIAGO, N. H. C.; PORTELA, C. M. **Arc propagation analysis on polluted insulators based on the leakage current measurement.** Second International conference on properties and applications of 1988, China. Proceedings. China: [s.n.]; 1988. p. 33–36.

GEORGE, J. M. **Digital Solution for Transmission Line Risk Management.** INMR World Congress. Tucson, Arizona, USA, 2019.

GEORGE, J. M. **Management of transmission power lines in heavily polluted environments.** XXXII Reunion Internacional de Verano, RVP-AI/2019.

GIUSSANI, R.; COTTON, I.; SLOAN, R. **Detection of Corona with RF Methods and Spectra Analysis.** IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, San Juan, p. 132-136, 2012.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators.** Arizona: Ravi Gorur Inc, 1999.

GUEDES, C. P. G.; COSTA E. G.; RIBEIRO, G. L.; GERMANO, A. D. **Classification of the Degradation Condition of Polymeric Insulators by UV Radiation Levels (Corona) and Fuzzy Logic.** The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic: 2015.

HAGL, A.; ASLANIDIS, K. **RFID: Fundamentals and Applications.** In: Kitsos, P., Zhang, Y. (eds) RFID Security. Springer, 2008, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76481-8_1.

HALL, J. F. **History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications**. IEEE Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 376-385, 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

HEINTZ, W. **Investigations of the High-Frequency Spectrum of Periodic Discharges**. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik, v. 11, n. 2, p. 51-56, 1959.

HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. **RFID: A Guide to Radio Frequency Identification**. 1^a. ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2006

IEC 60507. **Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on ac systems**. 1991.

IEC 60815: **Guide for the selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions- Part 1: Definitions, information and general principles**. 2015.

INMR. **Monitoring NSDD & Pollution Severity**. July 21, 2023. Disponível em: <<https://www.inmr.com/climate-crisis-highlights-need-to-monitor-pollution/>>. Acesso em setembro 2023.

ISAKA, K.; YOKOI, Y.; NAITO, K.; MATSUOKA, R.; ITO S.; SAKANISHI, K.; FUJII, O. **Development of realtime system for simultaneous observation of visual discharges and leakage current on contaminated dc insulators**. IEEE Trans. Elect Insul, v. 25(6), p.1153–60, 1990.

JIANG, Y.; MCMEEKIN, S. G; REID, A. J.; NEKAHI, A.; JUDD, M. D.; WILSON, A. **Monitoring Insulator Contamination Level under Dry Condition with a Microwave Reflectometer**. International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Sydney, p. 959-962, 2015.

JIANG, Y.; MCMEEKIN, S. G.; REID, A. J.; NEKAHI, A.; JUDD, M. D.; WILSON, A. **Monitoring contamination level on insulator materials under dry condition with a microwave reflectometer**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 23, n. 3, p. 1427-1434, 2016.

KHALIFA, M.; EL-MORSHEDEY, A.; GOUDA, O. E.; HABIB, S. E. D. **A new monitor for pollution on power line insulators: Part 2: Simulated field tests**. IEEE Proc Gener, Transm Distrib Cairo; v. 135(1), p. 24 – 30, 1988.

KIM, S. H.; CHERNEY, E. A.; HACKAM, R. **Effects of filler level in RTV silicone rubber coatings used in HV insulators**. Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 27, n. 6, p. 1065-1072, 1992.

KRAUS, J. D. **Antennas**. New York: McGraw-Hill, 1988.

KUO, S. H.; CHEN, H. D.; PAN, S. C.; TSENG, Y. M.; JHENG, J. L. Compact circularly polarized circular microstrip tag antenna mountable on metallic surface. **MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS**, v.55, no.5, 2013.

LANDT, J. **The history of RFID**. IEEE Potentials, 2005, vol. 24(4), pages 8–11. doi:10.1109/mp.2005.1549751.

LIM, S. H.; OH, Y.C.; LIM, H.; MYUNG, N. H. Compact wideband tag antenna for UHF RFID. **MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS**, V. 51, No. 5, 2009.

LIMA, J. M. V. **Secador de minérios não ferrosos à micro-ondas: alternativa para redução de umidade de caulim e bentonita exploradas na Paraíba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – 2018.

LIU Y, DUB X, YANG Z. **Infrared characteristics of surface discharges in dynamic dropping test for hydrophobicity evaluation of polymeric insulator**. International conference on high voltage engineering and Application, Shanghai, China, September 2012.

LUNDGAARD, L. E. Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [s.l.], v. 8, n. 5, p.34-43, set. 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MACKEV, J.; SHAH, M.; Polymer outdoor insulating materials part I: comparison of porcelain and polymer electrical insulation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 13, n. 3, 1997.

MARQUES, J. M. C. **Análise dos fatores que influenciam a eficiência da tecnologia RFID aplicada a sistemas de produção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MATTOS, M. A. F.; BIAGIONI, P. H.; BASSI, W. Electric Field Measurement on Time Domain Generated by Corona on Insulators on Distribution Systems. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Canada, p. 328-330, 1996.

MOORE, P. J.; PORTUGUÉS, I. E.; GLOVER, I. A., **Remote Diagnosis of Overhead Line Insulation Defects**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, 2004.

MORAIS, S. M. A. **Desenvolvimento de Sistema RFID Flexível para Detecção do Movimento Humano**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. Paraíba. Brasil, 2019.

MOTA, R. P. B. **RFID - Radio Frequency identification**. São Paulo: Instituto de Matemática e Estatística da USP. Computação Móvel do Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, 2012.

NBR 10621. **Isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada - Ensaios de poluição artificial**. ABNT, 2005.

NOBREGA, R. B. **Influência da Cera de Carnaúba no Desempenho de Revestimentos de Silicone Aplicados no Isolamento Externo**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. Paraíba. Brasil, 2019.

OCCHIUZZI, C.; CIPPITELLI, S.; MARROCCO, G. **Modeling, Design and Experimentation of Wearable RFID Sensor Tag**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 8, pp. 2490–2498, 2010.

OLESKOVICS, M. Qualidade de Energia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Elétrica, USP, 2007.

OLIVEIRA, S. C. **Sistema de Detecção Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão de Alta Tensão**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ORELLANA, L.; ARDILA-REY, J.; AVARIA, G.; DAVIS, S. **Danger assessment of the partial discharges temporal evolution on a polluted insulator using UHF measurement and deep learning**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol 124, 2023, 106573, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106573>.

OU, W.; LI, M.; LIU, B.; LIU, H. **Research of Strain Sensor for Transmission Line Tower based on RFID**. Journal of Physics: Conference Series, v.2014, 2021.

PAREDES, F. ZAMORA G.; NGUYEN, T. M.; MARTÍN, F.; BONACHE, J. **A Novel Design Strategy for Small On-Metal UHF-RFID Tags with Long Read Range based on Complementary Split-Ring Resonator (CSRR)**. In: 2018 48th European Microwave Conference (EuMC). Madri, Espanha: IEEE, 2018. p. 985–989.

PEI, C. M.; SHU, N. Q.; LI, L.; LI, Z. P.; PENG, H. **On-line monitoring of insulator contamination-causing flashover based on acoustic emission**. 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008, n. April, p. 1667–1671, 2008.

PETRARIU, A.; POPA, V.; CHIRAP, A. **Metal Mountable Microstrip Patch UHF RFID Tag Antenna**. International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). Iasi, Romênia: IEEE, 2015. p. 1–4.

PORTUGUÉS, I. E.; MOORE, P. J.; GLOVER, I. A. **Partial Discharge Localization for Efficient Radio Spectrum Management**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Mexico, p. 466-469, 2002.

RAJA, K.; DEVAUX, F.; LELAIDIER, S. Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 5, p. 8-14, 2002.

RAMOS, A.; LAZARO, A.; GIRBAU, D. Semi-Passive Time-Domain UWB RFID System. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 61, n. 4, p. 1700–1708, abr. 2013.

RAO, K. V. S.; NIKITIN, P. V.; LAM, S. F. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 53(12), p. 3870–3876, 2005.

RIAZ, M.; RYMAR, G.; GHAVAMI, M.; DUDLEY, S. **A novel design of UHF RFID passive tag antenna targeting smart cards limited area**. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2018, Las Vegas.

RIBEIRO, G. L. **Aprimoramento da Classificação de Isoladores Poliméricos por Medições Termográficas e Radiação UV usando Processamento de Imagens e RNA**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. Paraíba. Brasil, 2017.

RIVIERE, D. *et al.* **Radio Interference: Insulators**. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Cigré, Paris, 1976.

ROBERTI, M. **The History of RFID Technology**. RFID JOURNAL, 2005. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/the-history-of-rfid-technology>> Acessado em: 15/10/2023.

ROCHA, P. H. V. Estimação da poluição de isoladores em linhas de transmissão a partir da irradiação de RF. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. Paraíba. Brasil. 2019.

ROCHA, P. H. V.; COSTA, E. G.; SERRES, A. R.; XAVIER, G. V. R.; PEIXOTO, J. E. B.; LINS, R. L. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 113, p. 355-361, 2019.

SILVA, F.A.N.G.; SILVA, L. S. M.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; TEIXEIRA, F. S. **Caracterização e beneficiamento físico químico do caulim da região Borborema Seridó**. II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, 2010.

SILVA, P. P. J. C. G. P. O. **Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

SLEMON, G. R., Radio Influence from High-Voltage Corona. **Electrical Engineering**, v. 68, n. 2, p. 139-143, 1949.

SHURRAB, I. Y.; EL-HAG, A; ASSALEH, K; GHUNEM, R. **Partial Discharge On-Line Monitoring of Outdoor Insulators**. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, USA, p. 391-394, 2012.

SOPELSA NETO, N. F.; STEFENON, S. F.; MEYER, L. H.; BRUNS, R.; NIED, A.; SEMAN, L. O.; GONZALEZ, G. V.; QUIETINHO, V. R. **A Study of Multilayer Perceptron Networks Applied to Classification of Ceramic Insulators Using Ultrasound**. Applied Sciences, p. 19, 2021.

STEWART, B. G.; HEPBURN, D.M.; KEMP, I.J.; NESBITT, A.; WATSON, J. **Detection and Characterization of Partial Discharge Activity on Outdoor High Voltage Insulating Structures by RF Antenna Measurement Techniques**. International Symposium on High Voltage Engineering, London, p. 151-155, 1999.

TARZWELL, R.; BAHL, K. **High voltage printed circuit design & manufacturing notebook**. Sierra Proto express, 2004.

ULA, M.; PRATAMA, A.; ASBAR, Y.; FUADI, W.; FAJRI, R.; HARDI, R. A New Model of The Student Attendance Monitoring System Using RFID Technology. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1807, 2021.

XAVIER, G. V. R. **Aplicação de Antenas Monopolo Impressas Bio-Inspiradas com Superstratos Metamateriais na Detecção e Localização de Descargas Parciais**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. Paraíba. **Brasil. 2021**.

XIAOBO, M.; HONGWEI, M.; BO, Z.; FANGHUI, Y.; LIMING, W. **Influence of pollution on surface streamer discharge**. Electric Power Systems Research, vol. 212, 2022, 108638, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108638>.

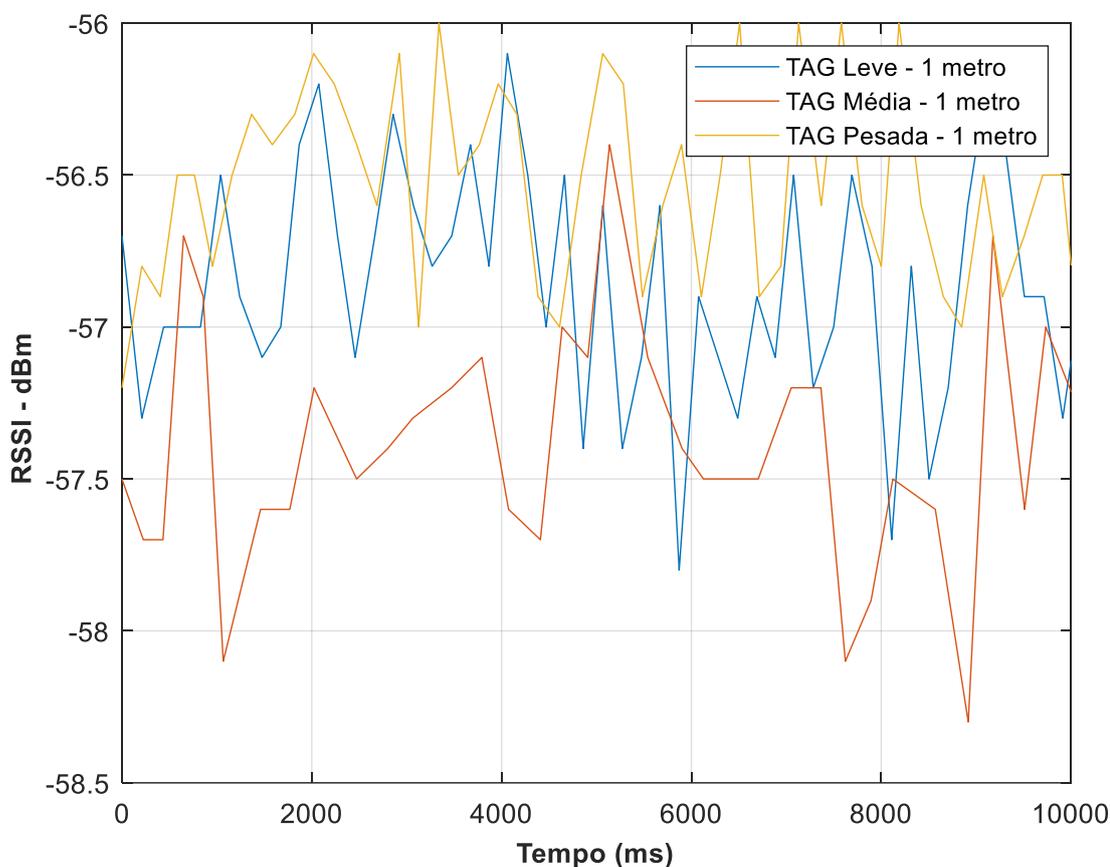
XINGLIANG, J.; XIA, Q. **Influence of contamination on deteriorated insulators detection with infrared imaging method**. International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2010.

ZHANG, G.; LUO, B.; WANG, Q.; DENG, X. **Design of a new anti-metal RFID temperature tag antenna based on short-circuit stub structure**. Procedia Computer Science, Vol. 203, 2022, Pages 367-374, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.07.047>.

APÊNDICE A

Todas as medições realizadas durante esta pesquisa com etiquetas RFID UHF de geometria quadrangular com poluição leve, média e pesada, em ambiente externo, podem ser visualizadas nas Figuras 1 a 16. Os atributos extraídos dos sinais medidos são apresentados nas Tabelas 1 a 16.

Figura 01 – Medição do RSSI para uma distância de 1 m – Poluição leve, média e pesada.



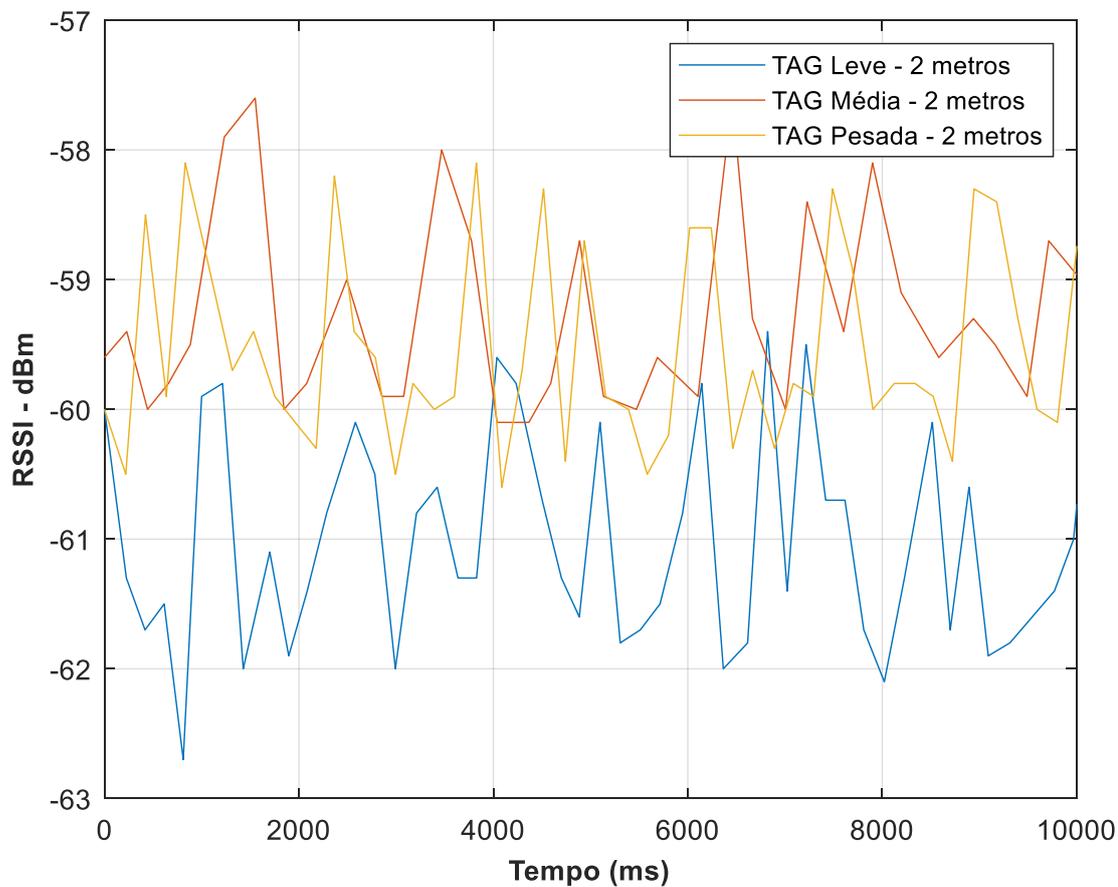
Fonte: Própria autora.

Tabela 1 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 1 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
1 metro	Média	-57,84	-57,46	-56,58
	Máx. Pico	-56	-56,4	-55,8
	Min. Pico	-63,3	-58,8	-57,4
	Desvio P.	0,65	0,36	0,33

Fonte: Própria autora.

Figura 02 – Medição do RSSI para uma distância de 2 m – Poluição leve, média e pesada.



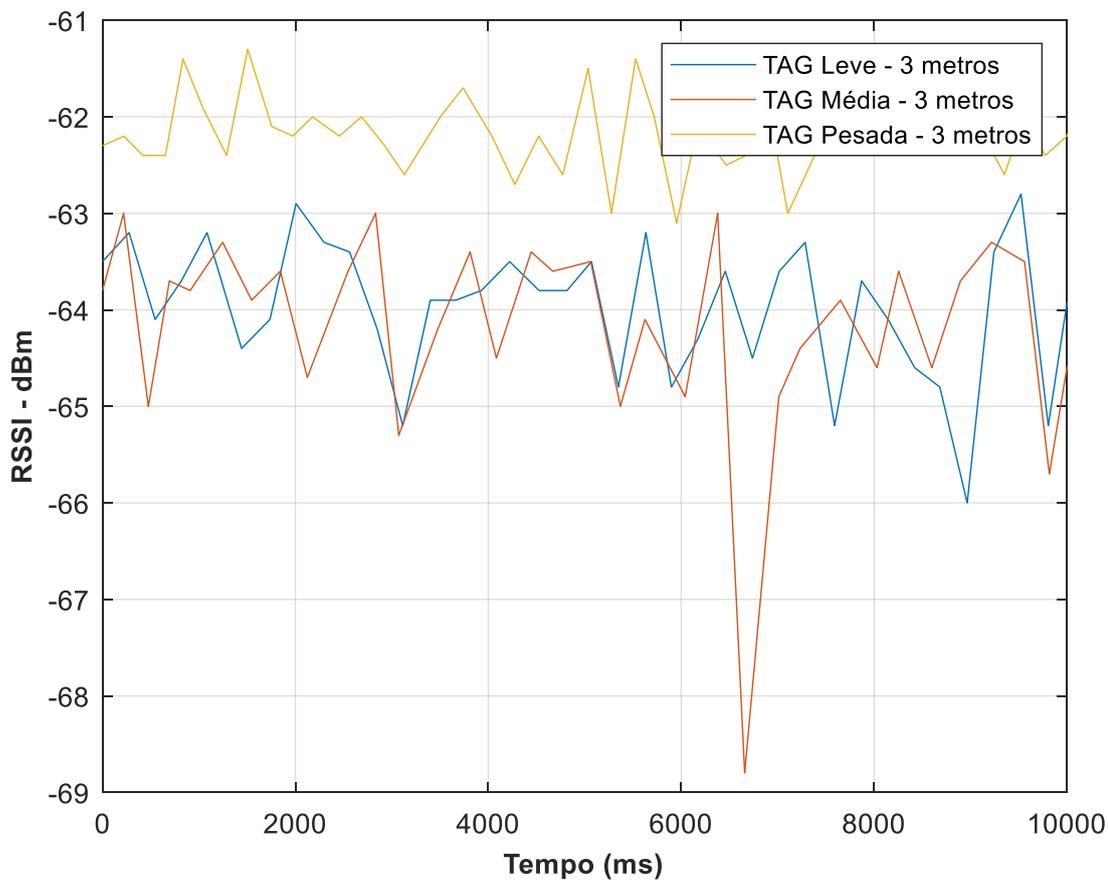
Fonte: Própria autora.

Tabela 2 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 2 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
2 metros	Média	-60,95	-59,26	-59,63
	Máx. Pico	-59	-57,3	-57,6
	Min. Pico	-62,8	-60,8	-60,9
	Desvio P.	0,85	0,84	0,72

Fonte: Própria autora.

Figura 03 – Medição do RSSI para uma distância de 3 m – Poluição leve, média e pesada.



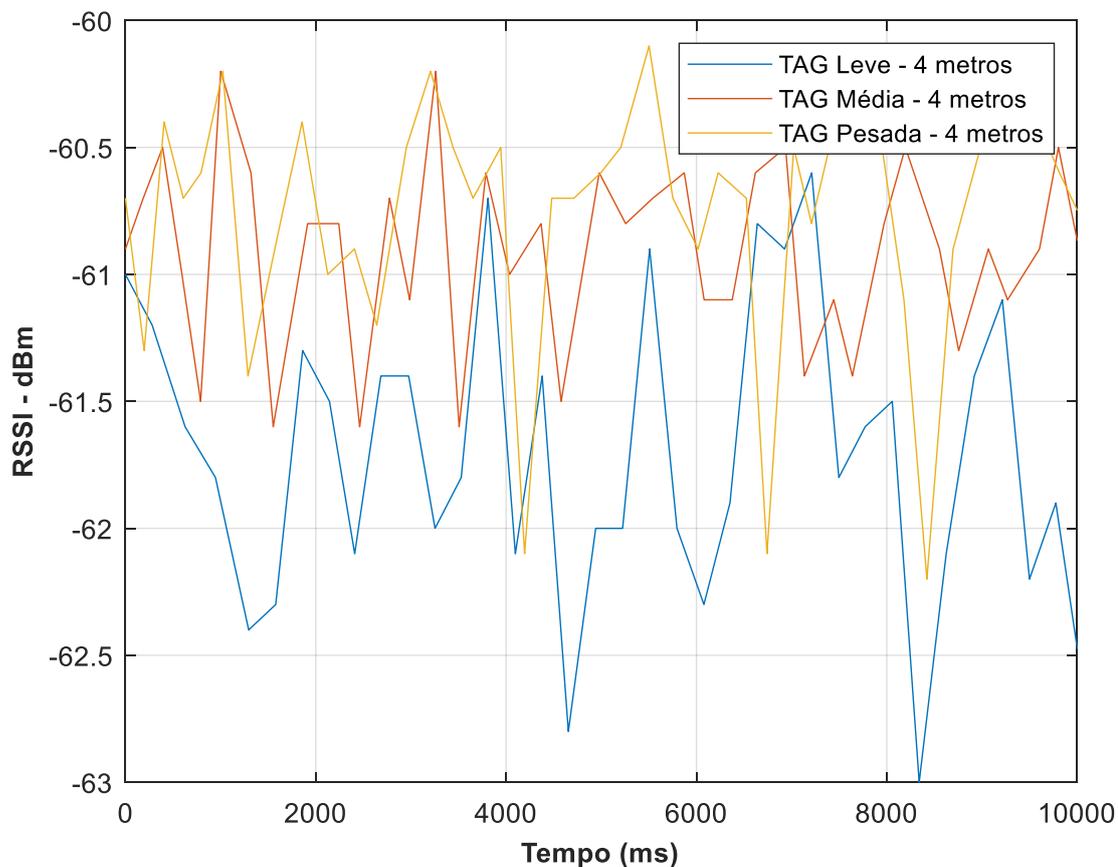
Fonte: Própria autora.

Tabela 3 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 3 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
3 metros	Média	-64,03	-63,92	-63,88
	Máx. Pico	-62,6	-62,5	-60,9
	Min. Pico	-66,4	-68,8	-67,3
	Desvio P.	0,63	0,67	1,39

Fonte: Própria autora.

Figura 04 – Medição do RSSI para uma distância de 4 m – Poluição leve, média e pesada.



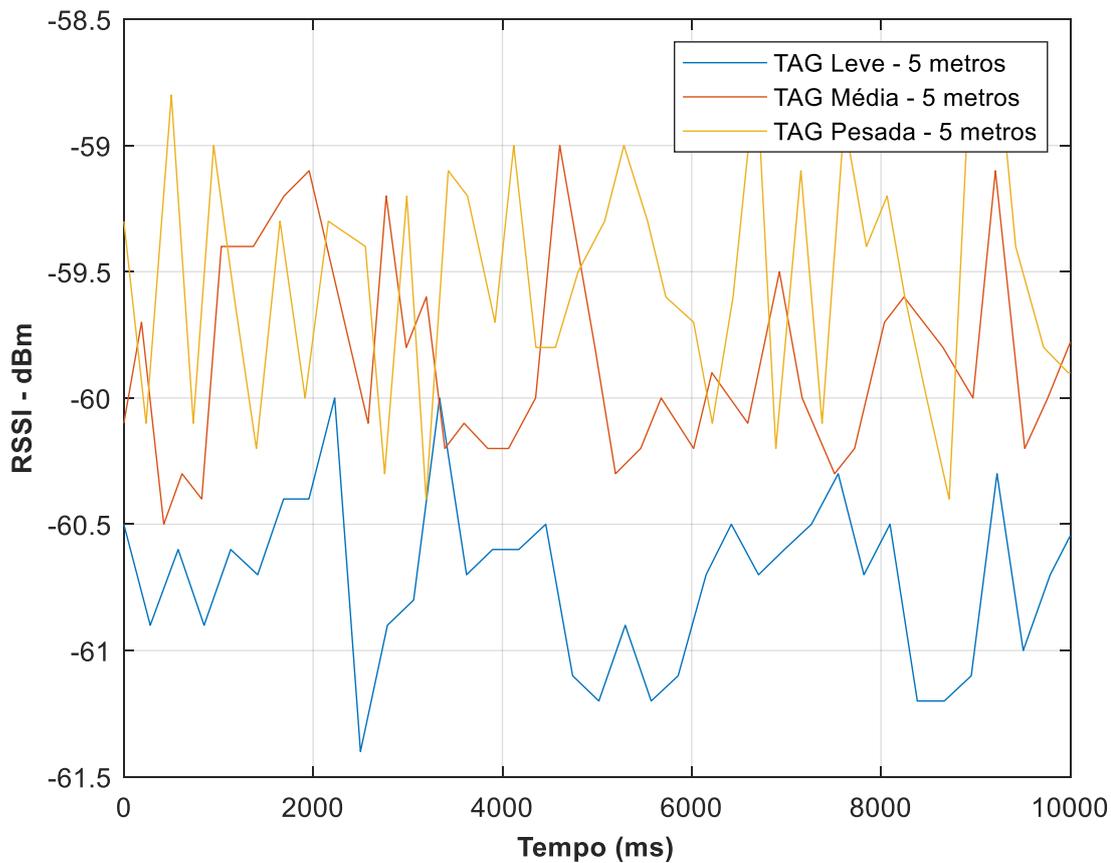
Fonte: Própria autora.

Tabela 4 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 4 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
4 metros	Média	-61,57	-60,91	-60,87
	Máx. Pico	-60,3	-59,7	-59,7
	Min. Pico	-64,5	-63,3	-63
	Desvio P.	0,61	0,43	0,59

Fonte: Própria autora.

Figura 05 – Medição do RSSI para uma distância de 5 m – Poluição leve, média e pesada.



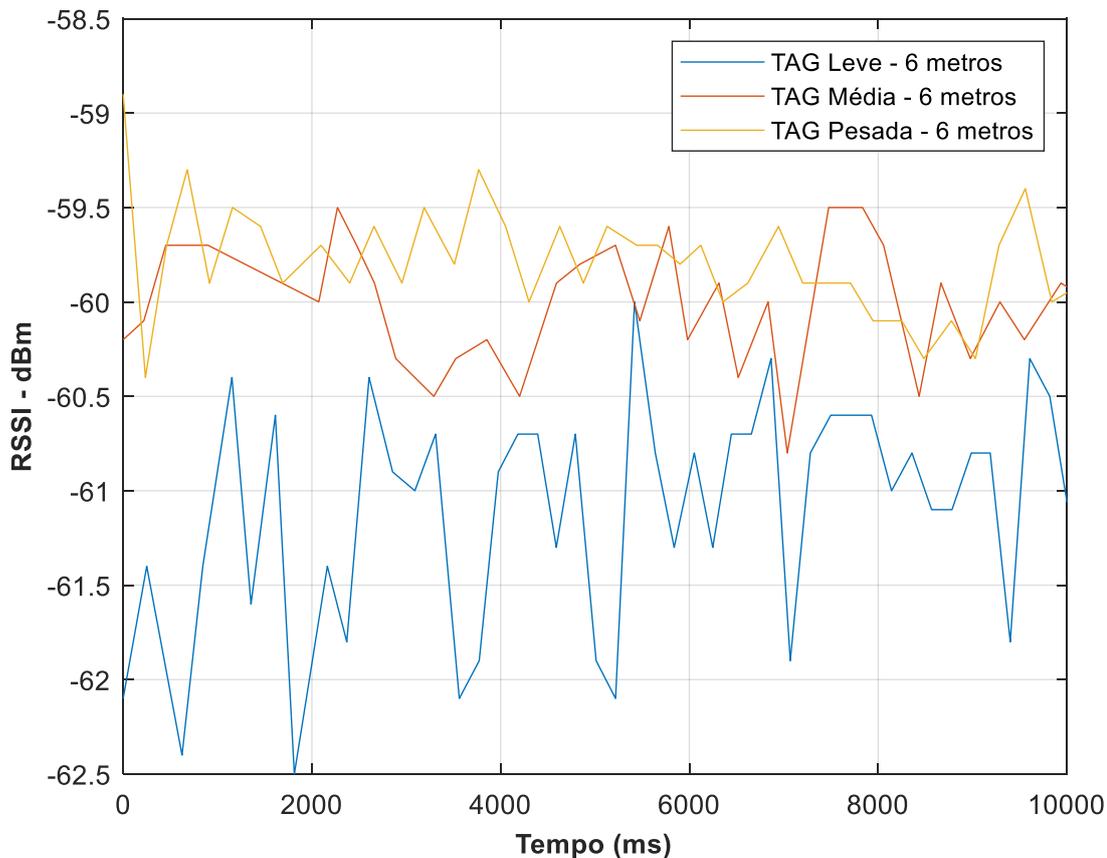
Fonte: Própria autora.

Tabela 5 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 5 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
5 metros	Média	-60,67	-59,90	-59,55
	Máx. Pico	-59,5	-58,6	-58,1
	Min. Pico	-61,9	-61,1	-60,6
	Desvio P.	0,38	0,41	0,46

Fonte: Própria autora.

Figura 06 – Medição do RSSI para uma distância de 6 m – Poluição leve, média e pesada.



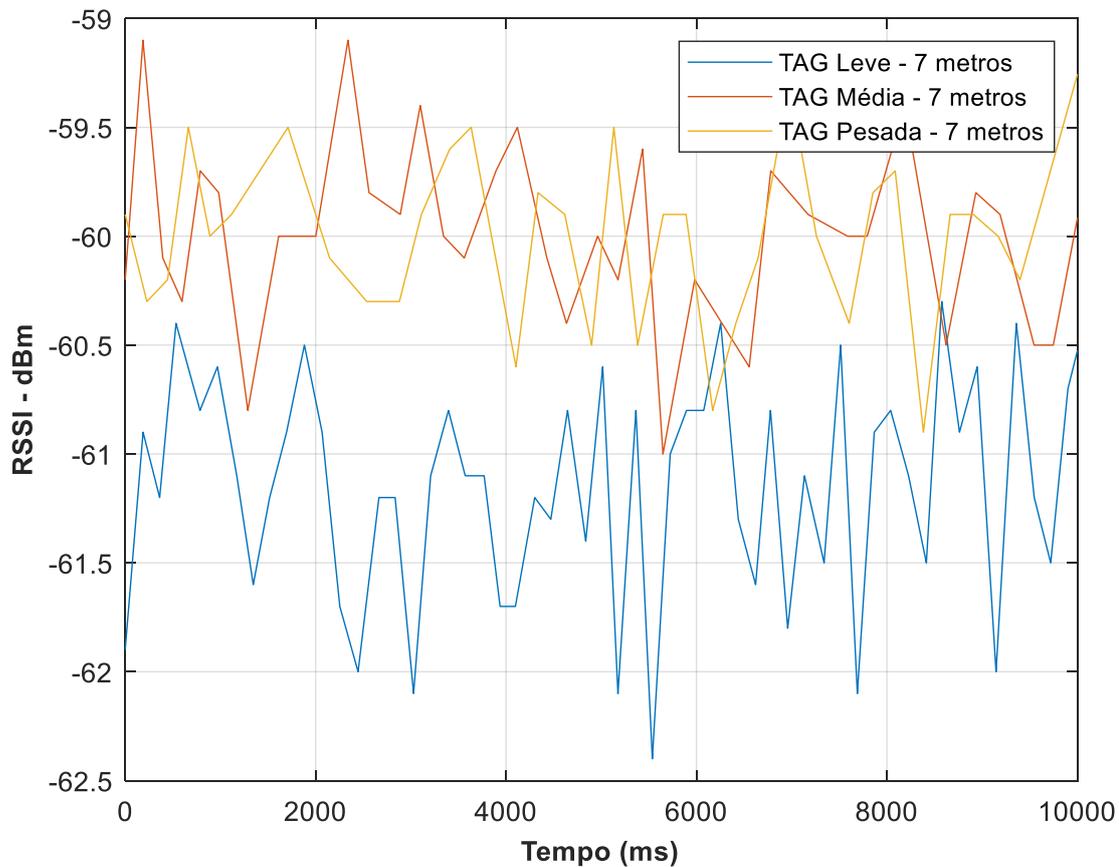
Fonte: Própria autora.

Tabela 6 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 6 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
6 metros	Média	-61,04	-60,02	-59,67
	Máx. Pico	-59,7	-58,9	-58,3
	Min. Pico	-62,9	-62,2	-60,6
	Desvio P.	0,64	0,37	0,35

Fonte: Própria autora.

Figura 07 – Medição do RSSI para uma distância de 7 m – Poluição leve, média e pesada.



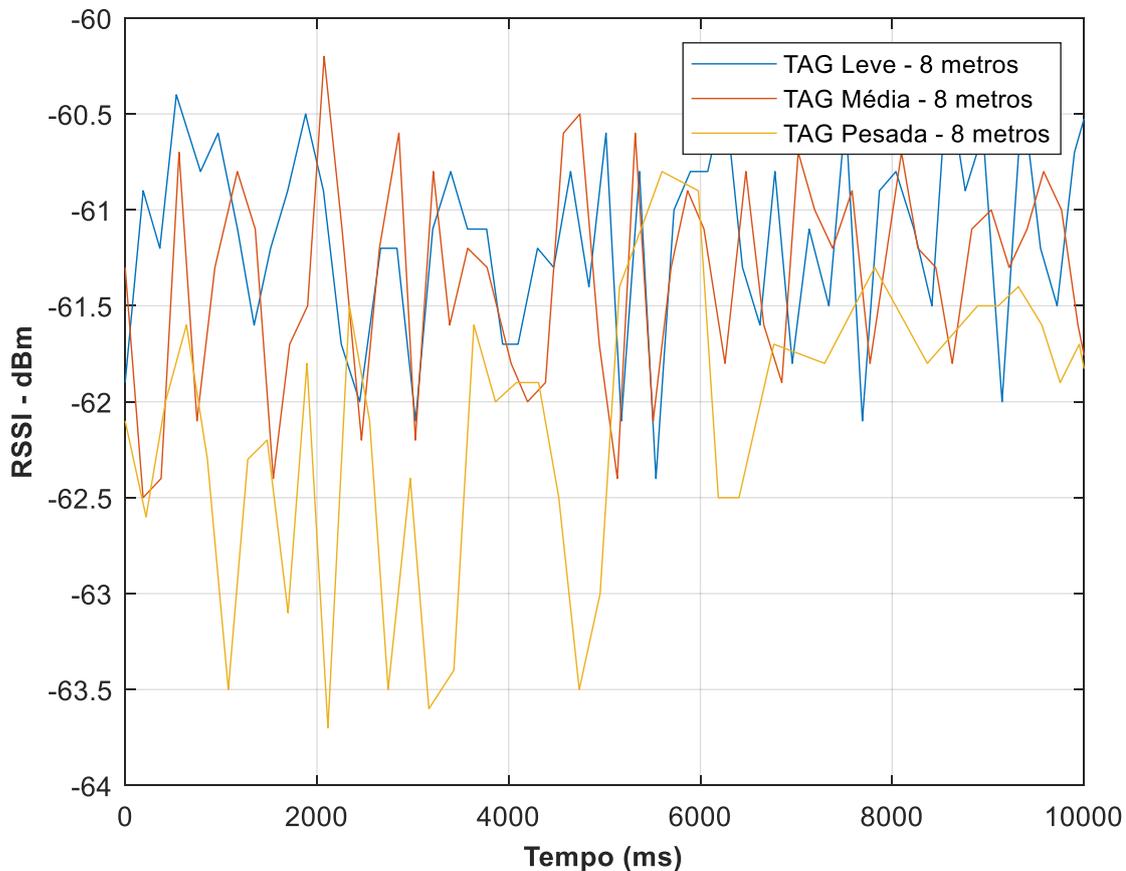
Fonte: Própria autora.

Tabela 7 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 7 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
7 metros	Média	-61,21	-59,98	-59,97
	Máx. Pico	-59,9	-58,7	-58,6
	Min. Pico	-62,7	-62,6	-61,2
	Desvio P.	0,45	0,42	0,41

Fonte: Própria autora.

Figura 08 – Medição do RSSI para uma distância de 8 m – Poluição leve, média e pesada.



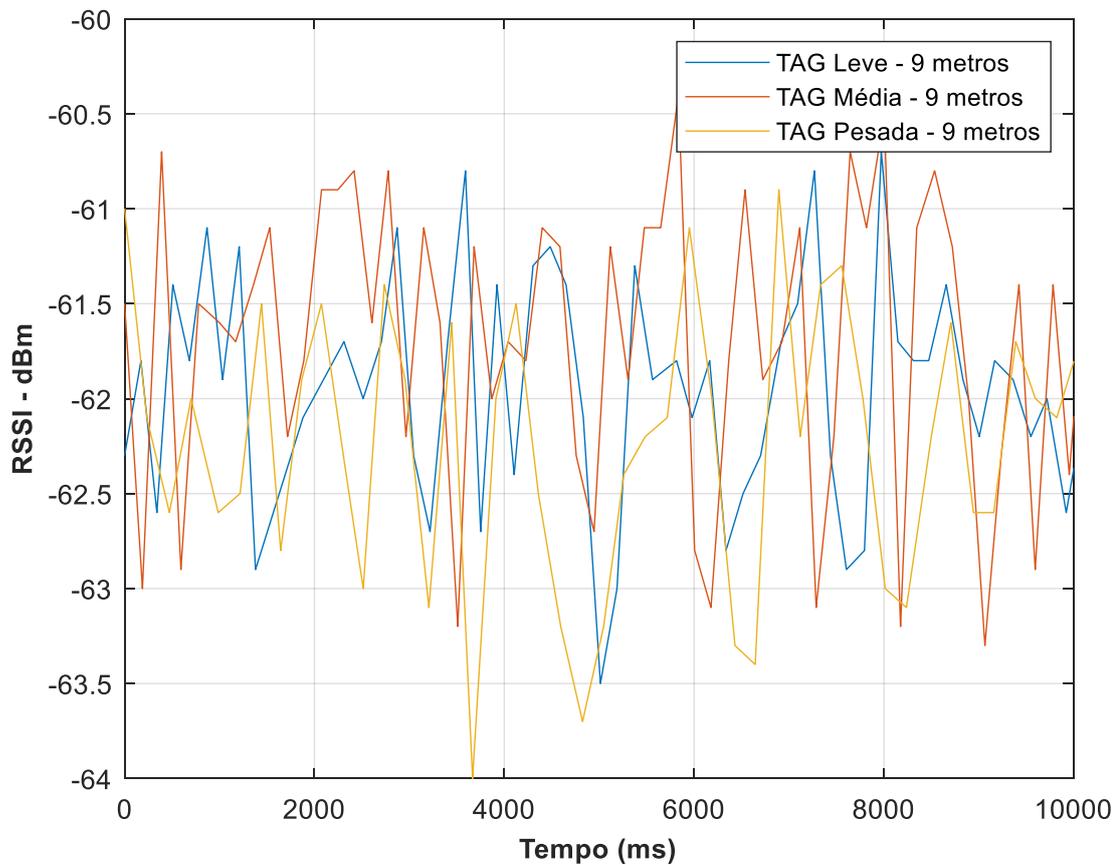
Fonte: Própria autora.

Tabela 8 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 8 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
8 metros	Média	-61,21	-61,34	-61,89
	Máx. Pico	-59,9	-60,1	-60,3
	Min. Pico	-62,4	-63,1	-67,8
	Desvio P.	0,47	0,57	0,87

Fonte: Própria autora.

Figura 09 – Medição do RSSI para uma distância de 9 m – Poluição leve, média e pesada.



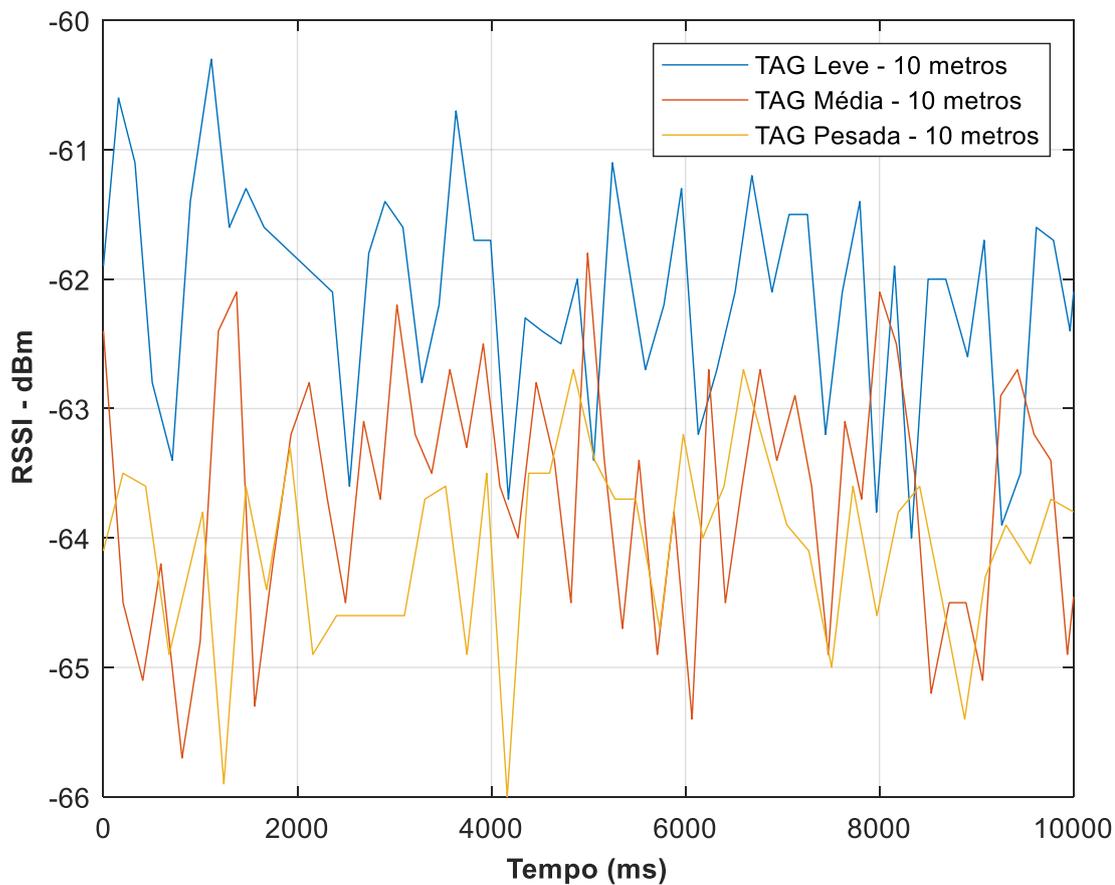
Fonte: Própria autora.

Tabela 9 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 9 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
9 metros	Média	-62,01	-61,71	-62,35
	Máx. Pico	-60,5	-60,3	-60,5
	Min. Pico	-63,7	-63,7	-64,5
	Desvio P.	0,64	0,75	0,71

Fonte: Própria autora.

Figura 10 – Medição do RSSI para uma distância de 10 m – Poluição leve, média e pesada.



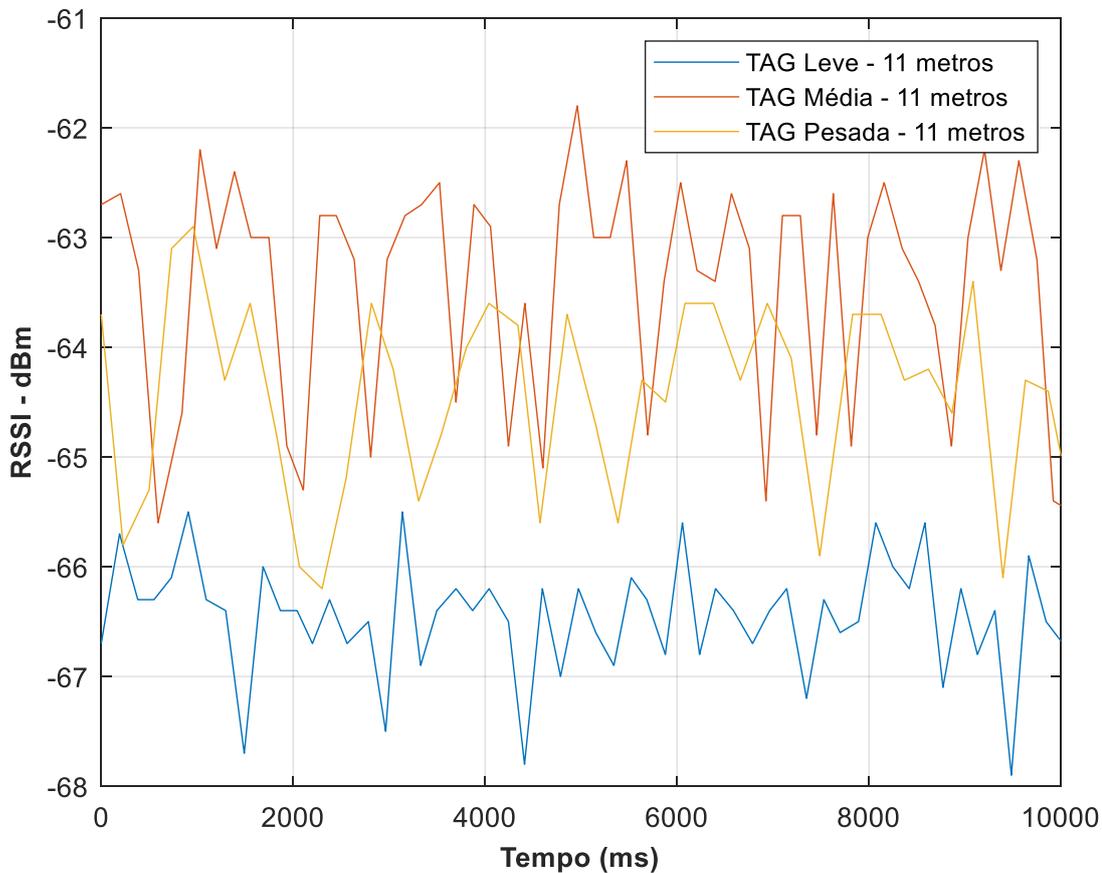
Fonte: Própria autora.

Tabela 10 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 10 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
10 metros	Média	-62,20	-63,57	-63,93
	Máx. Pico	-60,3	-61,6	-62,7
	Min. Pico	-65,2	-66	-66,1
	Desvio P.	0,99	0,93	0,58

Fonte: Própria autora.

Figura 11 – Medição do RSSI para uma distância de 11 m – Poluição leve, média e pesada.



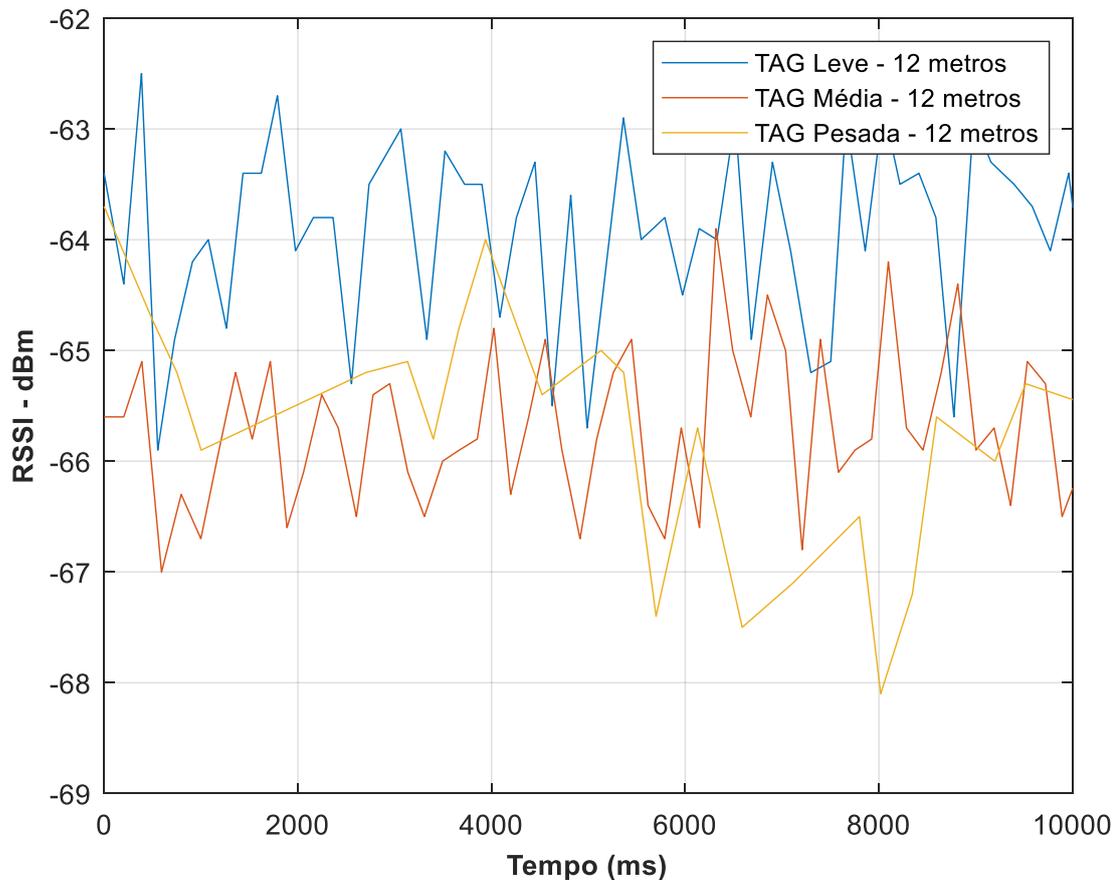
Fonte: Própria autora.

Tabela 11 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 11 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
11 metros	Média	-66,47	-63,30	-64,49
	Máx. Pico	-64,2	-61,6	-62,7
	Min. Pico	-72,1	-66,5	-67
	Desvio P.	0,63	0,94	0,96

Fonte: Própria autora.

Figura 12 – Medição do RSSI para uma distância de 12 m – Poluição leve, média e pesada.



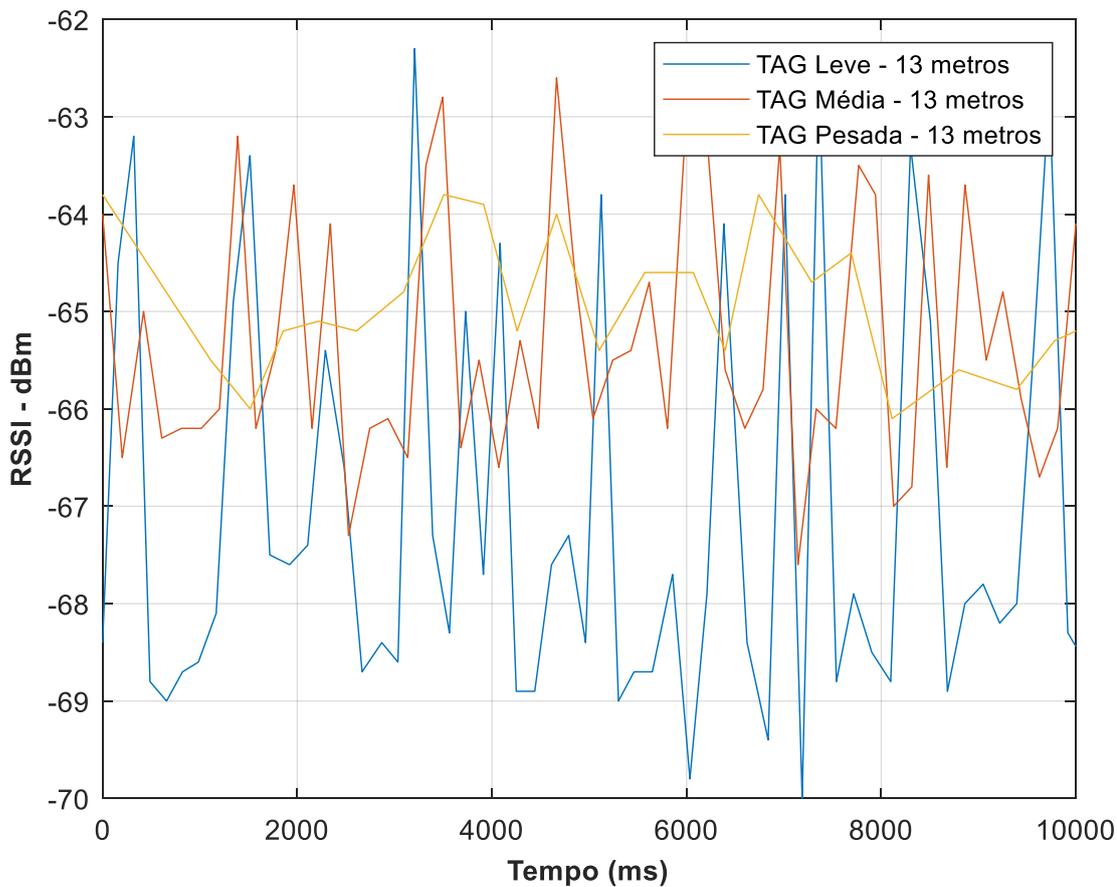
Fonte: Própria autora.

Tabela 12 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 12 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
12 metros	Média	-63,97	-65,68	-65,58
	Máx. Pico	-62,4	-63,6	-63,5
	Min. Pico	-66,8	-68,4	-70,3
	Desvio P.	0,88	0,72	1,19

Fonte: Própria autora.

Figura 13 – Medição do RSSI para uma distância de 13 m – Poluição leve, média e pesada.



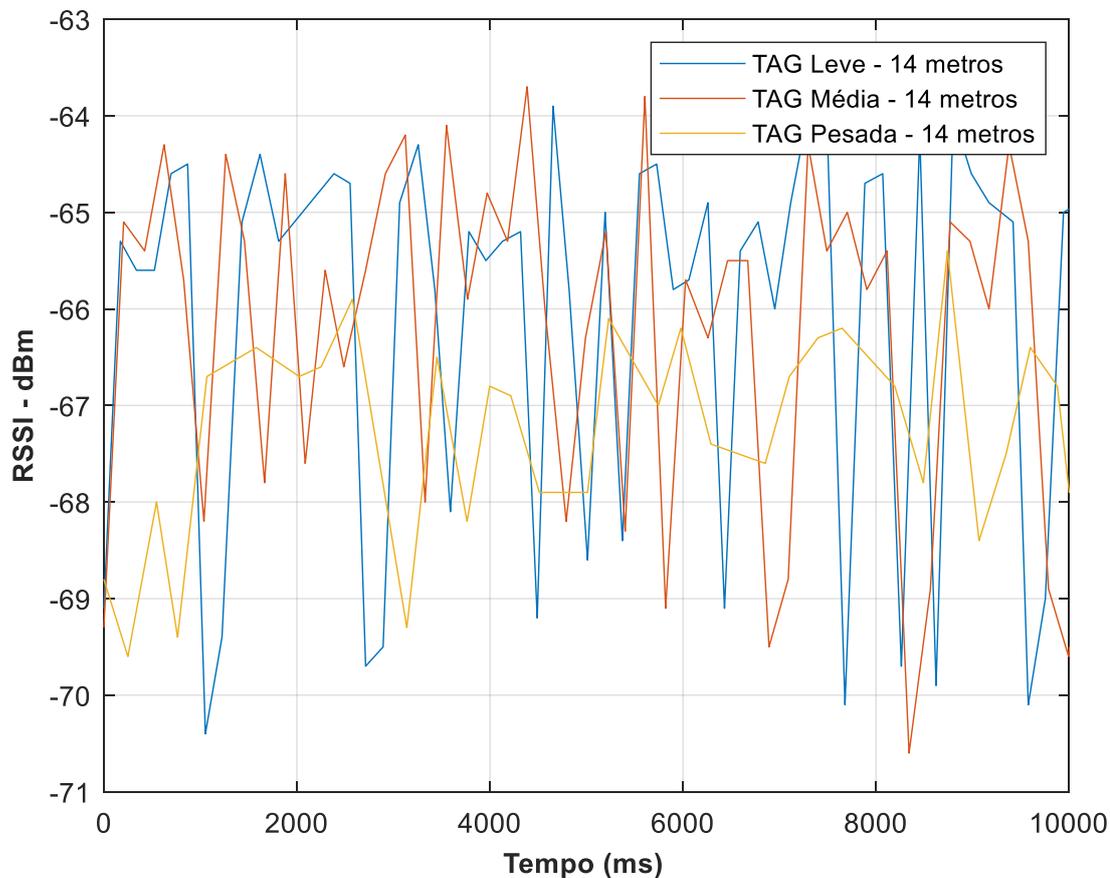
Fonte: Própria autora.

Tabela 13 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 13 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
13 metros	Média	-67,12	-65,32	-65,21
	Máx. Pico	-62,3	-60,8	-63,2
	Min. Pico	-70,9	-68,4	-68,9
	Desvio P.	2,03	1,23	0,86

Fonte: Própria autora.

Figura 14 – Medição do RSSI para uma distância de 14 m – Poluição leve, média e pesada.



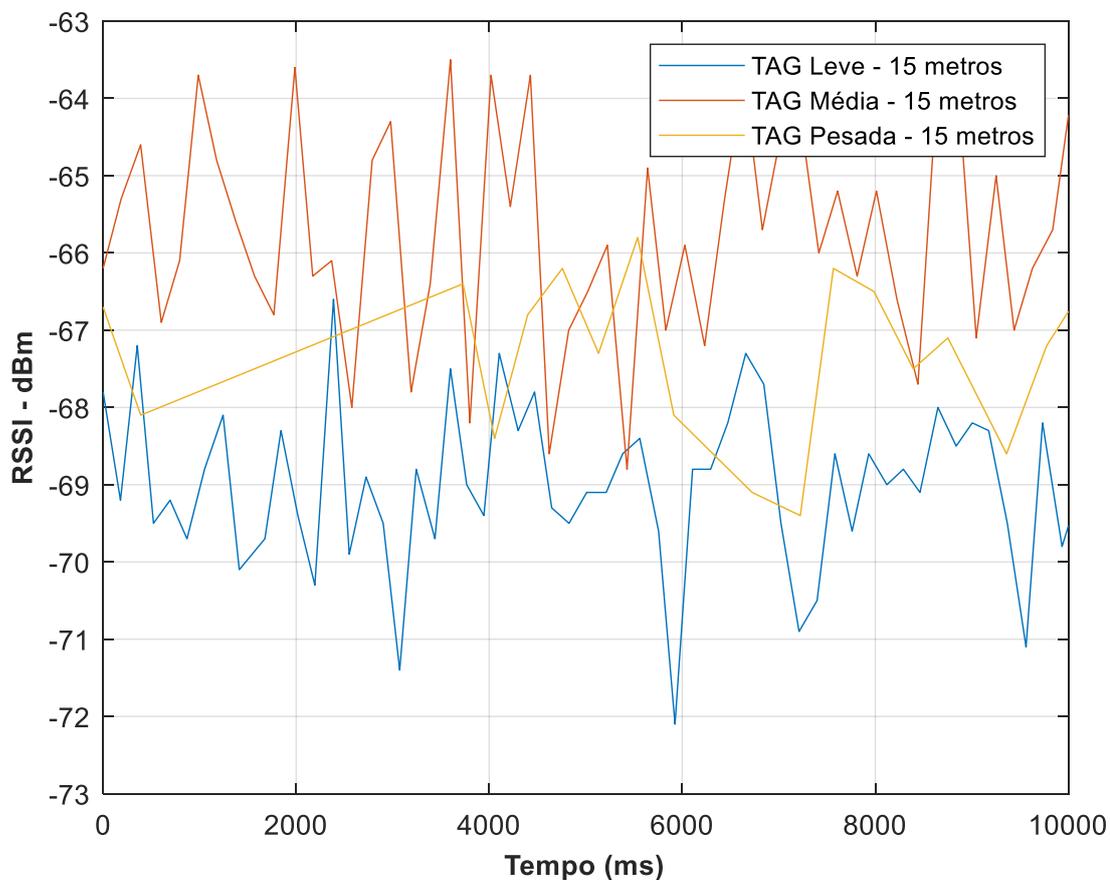
Fonte: Própria autora.

Tabela 14 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 14 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
14 metros	Média	-66,19	-66,58	-66,75
	Máx. Pico	-63,3	-63,3	-64,4
	Min. Pico	-72,5	-70,9	-70,4
	Desvio P.	2,15	1,61	1,17

Fonte: Própria autora.

Figura 15 – Medição do RSSI para uma distância de 15 m – Poluição leve, média e pesada.



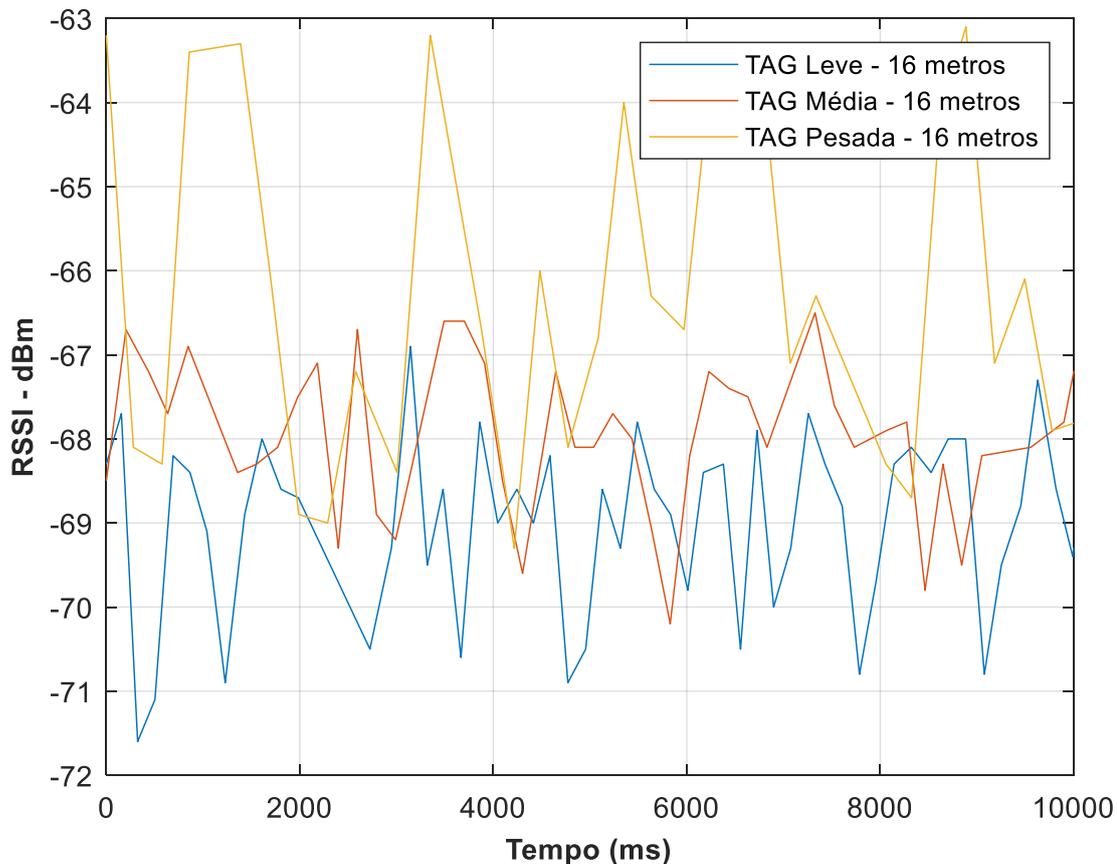
Fonte: Própria autora.

Tabela 15 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 15 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
15 metros	Média	-69,04	-65,75	-67,04
	Máx. Pico	-65,8	-62,7	-64,5
	Min. Pico	-72,6	-69,5	-69,4
	Desvio P.	1,10	1,49	1,03

Fonte: Própria autora.

Figura 16 – Medição do RSSI para uma distância de 16 m – Poluição leve, média e pesada.



Fonte: Própria autora.

Tabela 16 – Atributos extraídos da medição do RSSI para uma distância de leitura de 16 m.

Alcance	Parâmetros (dBm)	Leve	Média	Pesada
16 metros	Média	-69,13	-68,11	-66,25
	Máx. Pico	-66,2	-65,7	-62,7
	Min. Pico	-72,6	-72,2	-71,4
	Desvio P.	1,09	1,09	1,89

Fonte: Própria autora.