



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ARTHUR SILVA SOUZA

Trabalho de Conclusão de Curso

Comparação entre Antenas Aplicadas a Detecção de  
Descargas Parciais Acopladas via Janela Dielétrica e Válvula  
de Óleo em Transformadores de Potência

CAMPINA GRANDE - PB  
SETEMBRO DE 2021

ARTHUR SILVA SOUZA

# Comparação entre Antenas Aplicadas a Detecção de Descargas Parciais Acopladas via Janela Dielétrica e Válvula de Óleo em Transformadores de Potência

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica.

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega, D.Sc.

Professor Orientador.

CAMPINA GRANDE - PB

SETEMBRO DE 2021

ARTHUR SILVA SOUZA

# Comparação entre Antenas Aplicadas a Detecção de Descargas Parciais Acopladas via Janela Dielétrica e Válvula de Óleo em Transformadores de Potência

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Aprovado em, 05/10/2021.

---

Raquel Aline Araújo Rodrigues Felix, D.Sc.  
Universidade Federal de Campina Grande.  
Professora Convidada.

---

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega, D.Sc.  
Universidade Federal de Campina Grande.  
Professor Orientador.

CAMPINA GRANDE - PB  
SETEMBRO DE 2021

Dedico este a todos aqueles que me ajudaram de forma direta e indireta.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado várias oportunidades e pelo discernimento durante minha caminhada.

Aos meus pais Agnaldo e Dos Anjos pela educação, ensinamentos, apoio em todas as escolhas, pelo amor e carinho dedicado.

A meus irmãos e avó, Amanda, Aécio e Josefa, pelo grande apoio e carinho que me foi dado, como também todo restante da família.

A minha namorada Raquel por ficar sempre ao meu lado me ajudando, incentivando e entendendo todos os momentos de dificuldade.

A todos os meus amigos que me ajudaram ao longo do curso, seja com palavras de apoio ou com ensinamentos. Em especial a Augusto, Caio Victor, Rodrigo Kalil, Breno, Igor, Antônio, Iago, Lucas, José Lucas, Matheus e entre outros.

Ao professor Luiz Augusto pela disponibilidade e incentivo a realização deste trabalho. Só tenho a agradecer ao professor por ter me orientado e estado junto comigo nessa caminhada.

Ao Laboratório de Alta Tensão por ter me proporcionado muitos conhecimentos na área de eletrotécnica durante o curso e no meu desenvolvimento profissional.

Aos professores, mestrandos e doutorandos do curso de Engenharia Elétrica por terem contribuído, não só na formação acadêmica, como também na minha formação como ser humano.

Aos funcionários da UFCG, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente participam da minha trajetória, construída com ajuda de todos que já passaram por mim. Colho cada experiência com muito carinho.

*“These times of joy, these times of wonder  
Like a lost edge inside our dreams  
It makes me wonder:  
What is life, what does it mean?”*

Andre Matos

## RESUMO

Para se obter o aumento da confiabilidade dos sistemas elétricos é essencial a manutenção contínua dos equipamentos, garantindo assim a longevidade e evitando falhas que podem ocasionar danos irreparáveis ao equipamento. As descargas parciais são fenômenos físicos que ocasionam curtos-circuitos nos equipamentos de potência. Há técnicas que utilizam a detecção de descargas parciais como forma de monitoramento para os equipamentos. Uma dessas técnicas é a detecção de descargas parciais em transformadores de potência por meio de antenas. Desse modo, o estudo e o desenvolvimento de antenas com essa aplicação é de grande valia, pois pode vir a evitar eventuais falhas provenientes desse fenômeno, a qual é o objeto de estudo desse projeto. Dessa forma, foram analisadas diferentes antenas para distintas formas de inserção do sensor no equipamento de alta tensão, seja via janela dielétrica ou válvula de óleo. Para o caso de antenas de microfita foram aplicadas técnicas de otimização de largura de banda nas antenas, visando preencher o máximo da faixa UHF (*Ultra high Frequency*) relevante onde ocorrem as descargas parciais, correspondendo ao intervalo entre 0,3 GHz e 1,5 GHz. Sendo assim, foram realizadas diversas simulações que permitiram fazer o comparativo entre os métodos de inserção e entre as antenas. Foi possível observar quais as melhores técnicas a serem utilizadas, a fim de maximizar a eficiência, sem esquecer de reduzir as dimensões das antenas. Para efeitos comparativos a antena Sonda em L obteve o melhor resultado para a inserção via janela dielétrica, já para o caso do acoplamento via válvula de óleo a antena monopolo obteve o melhor resultado, possibilitando assim a utilização de diferentes modelos de antenas para diferentes formas de aplicação.

**Palavras-Chave:** Descargas parciais, antenas, janela dielétrica, válvula de óleo.

## ABSTRACT

In order to increase the reliability of the electrical systems, continuous equipment maintenance are essential, thus, their longevity, avoiding eventual failures, that can cause irreparable damage to the equipment. Partial discharges are physical phenomena that cause short circuits in power equipment. There are techniques that use the detection of partial discharges as a way of monitoring equipment. One of these techniques is the detection of partial discharges in power transformers through antennas. Thus, the study and development of antennas with this application is of great value, as it can prevent eventual failures arising from this phenomenon, which is the object of study of this project. Thus, different antennas has been analyzed for different ways of inserting the sensor into the high voltage equipment, either via dielectric window or oil valve. Into the case for the microstrip antennas, bandwidth optimization techniques has been applied in the antennas, aiming to fill relevant maximum UHF (Ultra High Frequency) band where partial discharges occur, corresponding to the interval between 0.3 GHz and 1.5 GHz. Therefore, several simulations has been carried out that allowed a comparison between the insertion methods and also the antennas. Being able to conclude which are the best techniques to be used, in order to maximize efficiency, without forget to reduce the dimensions of the antennas. For comparative purposes, antenna Sonda em L has obtained the best result for insertion via dielectric window, while in the case of coupling via oil valve, antenna monopole has obtained the best result, thus enabling the use of different antenna's model for different ways of application.

**Keywords:** Partial discharge, antenna, dielectric window, oil valve.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.1:</b> Fenômenos associados à ocorrência de DP. ....   | 17 |
| <b>Figura 2.1:</b> Modelo representativo para o fenômeno das descargas parciais. ....  | 21 |
| <b>Figura 2.2:</b> Circuito elétrico equivalente para o modelo de descargas parciais. ....   | 22 |
| <b>Figura 2.3:</b> Gráfico representativo com o processo das descargas parciais em um meio dielétrico .....  | 26 |
| <b>Figura 2.4:</b> Arranjo para medição proposto na IEC 60270 (2000).....  | 23 |
| <b>Figura 2.5:</b> Sensor UHF do tipo janela e esquemático de montagem no tanque do transformador de potência. ....  | 25 |
| <b>Figura 2.6:</b> a) Sensor cônico desenvolvido por Roldan, Tang e Gaskin (2008), b) Sonda UHF portátil instalada através da válvula de óleo de um transformador de 380 kV..... | 26 |
| <b>Figura 2.7:</b> Zonas de irradiação no espaço. ....   | 26 |
| <b>Figura 2.8:</b> Diagramas de irradiação em escala linear e logarítmica, respectivamente. ....   | 28 |
| <b>Figura 2.9:</b> Exemplo de um circuito de micro-ondas com duas portas. ....   | 30 |
| <b>Figura 2.10:</b> Estrutura geral de uma antena de microfita circular. ....  | 32 |
| <b>Figura 2.11:</b> Formas do elemento irradiador, a) quadrada, b) retangular, c) triangular, d) dipolar, e) circular. ....  | 32 |
| <b>Figura 2.12:</b> Exemplos de formatos de slots: a) H, b) S, c) E, d) C, e) U.. ....   | 33 |
| <b>Figura 2.13:</b> Esquemático da técnica de sonda em L. ....   | 34 |
| <b>Figura 2.14:</b> Modelo de uma antena monopolar.....  | 34 |
| <b>Figura 2.15:</b> Modelo de uma antena monopolar cônica. ....  | 35 |
| <b>Figura 3.1:</b> Fluxograma para desenvolvimento do projeto.....   | 36 |
| <b>Figura 4.1:</b> Modelo computacional da antena com otimização U-slot.....   | 40 |
| <b>Figura 4.2:</b> Coeficiente de reflexão para antena com otimização em U-slot.....   | 41 |
| <b>Figura 4.3:</b> : a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena com otimização da antena U-slot. ....   | 41 |
| <b>Figura 4.4:</b> Modelo computacional da antena com otimização sonda em L. ....  | 42 |
| <b>Figura 4.5:</b> Coeficiente de reflexão para antena com otimização sonda em L.....  | 42 |
| <b>Figura 4.6:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena com otimização sonda em L. ....   | 43 |
| <b>Figura 4.7:</b> Modelo computacional da antena com U-slot e sonda em L. ....  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.8:</b> Coeficiente de reflexão para antena com otimização <i>U-slot</i> e sonda em L.<br>.....       | 44 |
| <b>Figura 4.9:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena com otimização <i>U-slot</i> e sonda<br>em L..... | 44 |
| <b>Figura 4.10:</b> Modelo computacional da antena elíptica. ....  | 45 |
| <b>Figura 4.11:</b> Coeficiente de reflexão para antena elíptica. ....   | 45 |
| <b>Figura 4.12:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena elíptica.....                                    | 46 |
| <b>Figura 4.13:</b> Modelo computacional da antena planar espiral log.....                                       | 47 |
| <b>Figura 4.14:</b> Coeficiente de reflexão para antena planar espiral log. ....                                 | 47 |
| <b>Figura 4.15:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena planar espiral log.....                          | 48 |
| <b>Figura 4.16:</b> Modelo computacional da antena monopolo. ....  | 50 |
| <b>Figura 4.17:</b> Coeficiente de reflexão para antena monopolo. ....   | 50 |
| <b>Figura 4.18:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena monopolo. ....                                   | 51 |
| <b>Figura 4.19:</b> Modelo computacional da antena cônica. ....  | 51 |
| <b>Figura 4.20:</b> Coeficiente de reflexão para antena cônica. ....   | 52 |
| <b>Figura 4.21:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena cônica. ....                                     | 52 |
| <b>Figura 4.22:</b> Modelo computacional da antena discônica. ....   | 53 |
| <b>Figura 4.23:</b> Coeficiente de reflexão para antena discônica. ....  | 53 |
| <b>Figura 4.24:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena discônica. ....                                  | 54 |
| <b>Figura 4.25:</b> Modelo computacional da antena cônica log.....   | 54 |
| <b>Figura 4.26:</b> Coeficiente de reflexão para antena cônica log .....   | 55 |
| <b>Figura 4.27:</b> a) Padrão de irradiação, b) Ganho da antena cônica log.....                                  | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 2.1:</b> Classificação das antenas baseada na largura de banda.....                                   | 30 |
| <b>Tabela 4.1:</b> Tabela comparativa entre as antenas simuladas destinadas a via janela dielétrica. ....       | 48 |
| <b>Tabela 4.2:</b> Tabela comparativa entre as antenas simuladas destinadas a inserção via válvula de óleo..... | 56 |
| <b>Tabela 4.3:</b> Tabela comparativa entre as antenas simuladas. ....  | 57 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DP – Descargas Parciais.

FR4 – Fibra de vidro.

LAT – Laboratório de Alta Tensão.

GDP – Grupo de Descargas Parciais.

IEC – *International Electrotechnical Commission*.

UHF – *Ultra High Frequency*.

HFSS – *High Frequency Structure Simulator*.

HFCT – *High Frequency Current Transformer*.

GIS – Subestação Isolada a Gás (do inglês, *Gas Insulated Substation*).

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta U$  = Queda de tensão;

$\epsilon_r$  = Constante dielétrica;

$\lambda$  = Comprimento de onda;

$\alpha$  = Coeficiente de atenuação;

$a_1$  e  $a_2$  = Ondas incidentes nas portas 1 e 2;

$a_e$  = Raio efetivo da antena;

$b_1$  e  $b_2$  = Ondas refletidas nas portas 1 e 2;

$BW$  = Largura de banda;

$C_1$  = Capacitância da cavidade;

$C_2$  = Capacitância da parte do material que está em série com a cavidade;

$C_3$  = Capacitância restante;

$C_a$  = Capacitância de acoplamento;

$C_p$  = Capacitância do material isolante do respectivo equipamento;

$CX$  = Cabo coaxial;

$d$  = Maior dimensão da antena;

$D$  = Diretividade;

$\mathcal{E}$  = Campo elétrico instantâneo;

$f_0$  = Frequência de ressonância

$f_1$  = Frequência inferior;

$f_2$  = Frequência superior;

$G_e$  = Ganho da antena emissora;

$G_r$  = Ganho da antena receptora;

$\mathcal{H}$  = Campo magnético instantâneo;

$IM$  = instrumento para medição;

$L$  = Largura da antena;

$\eta_p$  = Rendimento de polarização;

$P_e$  = Potência enviada pela antena emissora;

$P_r$  = Potência recebida pela antena receptora;

$P_{rad}$  = Potência irradiada;

$Q$  = Carga injetada;

$Q_m$  = Carga liberada;

$r$  = Raio;

$R$  = Distância da antena;

$S_{ii}$  = Coeficientes de reflexão;

$S_{ij}$  = Coeficientes de transmissão;

$\mathcal{W}$  = Vetor de Poynting instantâneo;

$Z$  = Impedância;

$Z_m$  = Impedância para medição do sinal das descargas parciais;

$\mathcal{W}$  = Vetor de Poynting instantâneo;

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                     | 17 |
| 1.1. Motivação do trabalho.....                         | 19 |
| 1.2. Objetivos do trabalho .....                        | 20 |
| 1.2.1. Geral.....                                       | 20 |
| 1.2.2. Específicos .....                                | 20 |
| 1.3. Estrutura do trabalho .....                        | 20 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                          | 21 |
| 2.1. Descargas parciais.....                            | 21 |
| 2.1.1. Método Definido na IEC 60270 .....               | 23 |
| 2.1.2. Método UHF .....                                 | 24 |
| 2.1.2.1. Acoplamento via Janelas dielétricas.....       | 24 |
| 2.1.2.2. Acoplamento via Válvula de Óleo .....          | 25 |
| 2.2. Parâmetros Analisados no Estudo de Antenas .....   | 26 |
| 2.2.1. Zonas de irradiação .....                        | 26 |
| 2.2.2. Diagrama de Irradiação .....                     | 27 |
| 2.2.3. Densidade de Potência .....                      | 28 |
| 2.2.4. Diretividade.....                                | 29 |
| 2.2.5. Parâmetros de Espalhamento (S).....              | 29 |
| 2.2.6. Largura de Banda .....                           | 30 |
| 2.2.7. Equação de Friis.....                            | 31 |
| 2.2.8. Antena Microfita .....                           | 31 |
| 2.2.9. Técnicas de Otimização de Largura de Banda ..... | 33 |
| 2.2.10. Antena Monopolar .....                          | 34 |
| 2.2.11. Antena Cônica.....                              | 35 |
| 3. METODOLOGIA .....                                    | 36 |
| 3.1. Estudo e revisões bibliográficas .....             | 37 |
| 3.2. Escolhas das antenas .....                         | 37 |
| 3.3. Procedimentos computacionais .....                 | 38 |
| 3.4. Análise e comparação dos resultados .....          | 39 |
| 4. RESULTADOS E ANÁLISES .....                          | 40 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1.   | Antenas com Acoplamento Via Janela Dielétrica .....                 | 40 |
| 4.1.1. | Antena de microfita com otimização em <i>U-slot</i> .....           | 40 |
| 4.1.2. | Antena de microfita com otimização sonda em L .....                 | 42 |
| 4.1.3. | Antena de microfita com otimização <i>U-slot</i> e sonda em L ..... | 43 |
| 4.1.4. | Antena planar elíptica.....   | 45 |
| 4.1.5. | Antena planar espiral log.....                                      | 46 |
| 4.1.6. | Comparativo entre as antenas.....                                   | 48 |
| 4.2.   | Antenas com acoplamento via válvula de óleo .....                   | 49 |
| 4.2.1. | Antena monopolo .....   | 49 |
| 4.2.2. | Antena cônica.....  | 51 |
| 4.2.3. | Antena discônica .....  | 53 |
| 4.2.4. | Antena cônica log.....  | 54 |
| 4.2.5. | Comparativo entre as antenas com inserção via válvula de óleo.....  | 56 |
| 4.3.   | Comparativo entre as antenas.....                                   | 57 |
| 5.     | CONCLUSÃO .....   | 59 |
| 6.     | REFERÊNCIAS.....  | 60 |



# 1. INTRODUÇÃO

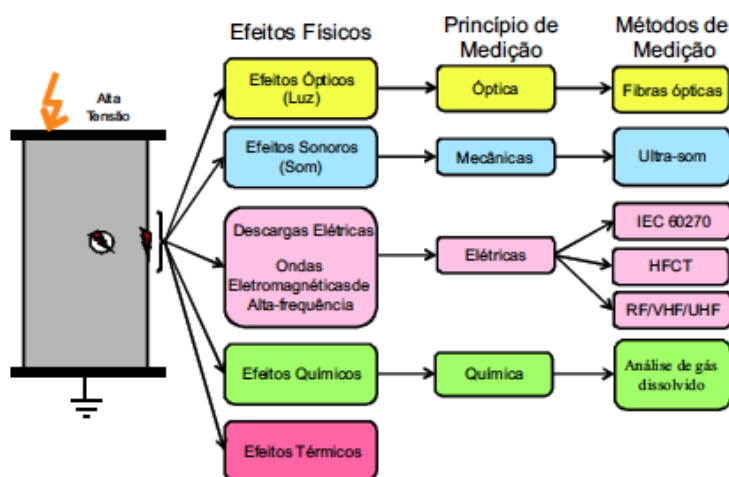
Descargas parciais (DP) são fenômenos físicos que geram descargas elétricas de baixa intensidade, gerando assim, curtos-circuitos de forma parcial, em regiões específicas do material isolante que estão submetidas a intensos campos elétricos (NATRASS, 1988).

O contínuo processo das descargas parciais pode vir a ocasionar degradação e deterioração do material isolante, o que a médio e longo prazo gera a ruptura parcial ou completa do dielétrico. Dessa forma, a falha do equipamento de alta tensão. Em geral, os equipamentos de alta tensão têm um alto valor de mercado e possuem um papel essencial no bom funcionamento do sistema elétrico, principalmente os transformadores de potência, que têm por função elevação e diminuição de tensão, suprimento de carga, entre outros. Sendo assim, os transformadores interferem de maneira direta na confiabilidade do sistema.

A confiabilidade de um sistema elétrico tem influências diretas em aspectos sociais e econômicos de uma região ou país. Sendo assim, a aplicação de métodos ou metodologias para monitoramento contínuo das descargas parciais em equipamentos de alta tensão vem sendo utilizado como medida de prevenção para eventuais perdas no sistema, com o objetivo de aumentar a sua confiabilidade.

O fenômeno das descargas parciais provoca consequentes efeitos químicos, físicos e elétricos, conforme pode ser observado no esquemático da Figura 1.1.

Figura 1.1: Fenômenos associados à ocorrência de DP.



Fonte: Macêdo (2014).

Comparando-se os métodos de medição apresentados na Figura 1.1, é importante ressaltar que o método mais comum é o definido pela norma IEC 60270 (2000), que faz a

utilização de capacitores de acoplamento em paralelo ao equipamento a ser controlado. Dependendo do nível de tensão do equipamento monitorado o capacitor pode assumir grandes dimensões físicas. Dessa forma, se torna possível a medição dos pulsos de corrente emitidos durante as ocorrências das descargas parciais. Em contrapartida, a inclusão dos capacitores no sistema é considerada um método invasivo, por haver conexão elétrica entre os capacitores e o equipamento, sendo mais utilizado em experimentos laboratoriais.

Com base no exposto, diversos pesquisadores vêm estudando inúmeros métodos e metodologias que possam ser aplicadas a detecção de descargas parciais, buscando a forma mais eficiência e menos invasiva. Um dos métodos se baseia na verificação de ondas eletromagnéticas que são emitidas pelos pulsos de corrente na ocorrência da descarga parcial. A faixa de frequência que esse fenômeno pode ser observado é de 300 MHz a 3 GHz, conhecida na literatura como Ultra Alta frequência, ou ainda UHF (do inglês, *Ultra High Frequency*), (HAMPTON; MEATS, 1988).

Para o caso das descargas parciais o espectro de frequência de 300 MHz a 1,5 GHz é a mais relevante a ser analisado, pois é nessa faixa que são relatadas as maiores concentrações de energia para pulsos de descargas parciais em diversos materiais dielétricos (RUTGERS; FU, 1997; JUDD et al, 1999).

Comparando os dois métodos apresentados (IEC 60270 e UHF), têm-se que a eliminação da conexão elétrica com o equipamento a ser monitorado é uma das principais vantagens do Método UHF. Além disso, como o método UHF se baseia em um sistema que trabalha em uma faixa de alta frequência, o sistema de detecção é teoricamente imune à interferências comuns em subestações, como: chaveamento de equipamentos de eletrônica de potência e descarga corona, que tem componentes de sinais significativos de energia até a faixa de 200 MHz e 300 MHz (TENBOHLEN et al., 2008).

Para ser possível a aplicação do método UHF se faz necessário a utilização de um dispositivo para detecção de descargas parciais, no caso, uma antena. A antena aplicada vai depender da forma que o sensor será distribuído no equipamento. Os sensores UHF podem ser distribuídos no ambiente de medição de diferentes formas, são eles: acoplados aos tanques dos equipamentos por meio de janelas dielétricas ou acoplados via válvulas de óleo, no caso de transformadores de potência.

Dentre os diversos tipos de antenas, destacam-se as de microfita para o acoplamento por meio da janela dielétrica, já que possuem baixo custo, atrativos padrões de irradiação, facilidade de instalação e confecção. Outro aspecto importante é que as antenas de microfita podem ser dimensionadas para serem compactas. Logo, se produz sensores que são minimamente

invasivos, causando mínimos impactos na estrutura do equipamento de alta tensão. Já para o caso dos sensores acoplados via válvulas de óleo, destacam-se as antenas monopulares e as antenas cônicas, em razão das restrições das dimensões impostas.

Este trabalho visa realizar um estudo comparativo entre as antenas aplicadas a detecção de descargas parciais em transformadores de potência, distribuídas no ambiente por meio de janelas dielétricas ou acopladas via válvula de óleo. Para tanto, foram realizadas simulações em ambiente computacional com o objetivo de validar qual antena tem melhor resultado na detecção de descargas parciais.

As simulações foram realizadas em um ambiente de simulação proporcionado pelo *software* HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), no qual é possível construir os modelos das antenas e, posteriormente, colher os dados para serem analisados.

## **1.1. Motivação do trabalho**

A utilização de antenas para aplicação de DP pelo método UHF podem apresentar diferentes estruturas construtivas, como microfita, monopolar, cônicas, dentre outras. Para cada forma de inserção será indicado um modelo de antena, como as monopulares para serem acopladas via válvula de óleo. Já para as janelas dielétricas pode ser observado que na literatura são utilizadas diversas antenas de microfita com diferentes métodos de otimização. Os tipos de antenas citados se destacam das demais por algumas razões dentre essas o baixo custo e praticidade construtiva.

O Laboratório de Alta Tensão (LAT), mais especificamente o Grupo de Descargas Parciais (GDP), se destacam por grandes contribuições com trabalhos desenvolvidos nessa área. Como, Xavier (2018), Xavier et al (2019a) e Nobrega et al (2019). No primeiro foram desenvolvidas e comparadas antenas de microfita para a detecção de descargas parciais. Os modelos desenvolvidos por Xavier (2018) se mostraram capazes de detectar as DP. Já em Xavier et al (2019a) foram aplicados métodos de otimização com o intuito de se aumentar a largura de banda das antenas de microfita. Sendo possível observar que as antenas desenvolvidas tiveram significativo aumento de largura de banda. Em Nobrega et al (2019) foi desenvolvido um sensor bio-inspirado aplica a inserção via janela dielétrica em transformadores de potência.

Observando-se que havia espaço para trabalhos envolvendo a comparação das antenas acopladas às janelas dielétricas ou às válvulas de óleo, este trabalho de conclusão de curso foi motivado pelo objetivo de acrescentar contribuições a trabalhos desenvolvidos pelo GDP, sob

a ótica de quais antenas têm melhores resultados para os respectivos métodos de acoplamentos, bem como, um comparativo entre essas antenas.

## **1.2. Objetivos do trabalho**

Os objetivos desse trabalho podem ser divididos em geral e específicos, como pode ser observado a seguir.

### **1.2.1. Geral**

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é comparar e desenvolver antenas aptas a serem utilizadas como sensor UHF aplicáveis ao monitoramento contínuo de Descargas parciais em Transformadores de Potência, sendo elas acopladas via janela dielétrica ou válvula de óleo.

### **1.2.2. Específicos**

Os objetivos específicos são:

- Estudar os principais parâmetros de análise de antenas;
- Simular e otimizar antenas em ambiente computacional;
- Avaliar as condições de desempenho da antena, tais como: ganho, diretividade, e padrão de irradiação da antena projetada;
- Propor sugestões de melhoria para futuros trabalhos.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos e a forma que o trabalho está dividido. O Capítulo 2 apresenta fundamentação teórica sobre as descargas parciais, os principais parâmetros de antenas e dos métodos do acoplamento via janela dielétrica e válvula de óleo. O Capítulo 3 aborda a técnica utilizada para a aplicação do método escolhido. A partir da metodologia, foram obtidos os resultados para uma análise posterior. Esses resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e os trabalhos futuros propostos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

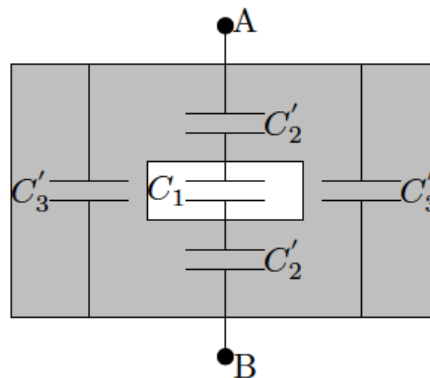
### 2.1. Descargas parciais

As descargas parciais, de acordo com a definição instituída pelo IEC 60270 (2000), são descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente determinados pontos da região do material isolante. Este fenômeno se dá em decorrência da presença de intensos campos elétricos em regiões gasosas que possuam disponibilidade mínima momentânea de elétrons para que dessa forma possa se dar início ao processo de avalanche eletrônica.

Já que existe a necessidade de elétrons livres e disponíveis, para que ocorra o fenômeno das descargas, ele pode ser caracterizado como um evento probabilístico, pois a disponibilidade dos elétrons vai variar de acordo com o tempo, dessa forma, se faz necessário medições de forma contínua (NOBREGA, 2016). Há ainda outros fatores que influenciam na origem das descargas parciais, tais como, as condições de pressão, umidade e temperatura do local.

Na Figura 2.1 pode ser observado um modelo para o fenômeno das descargas parciais, que pode ser compreendido por meio de um material dielétrico no qual existe uma cavidade preenchida por um gás, na maioria das vezes o ar.

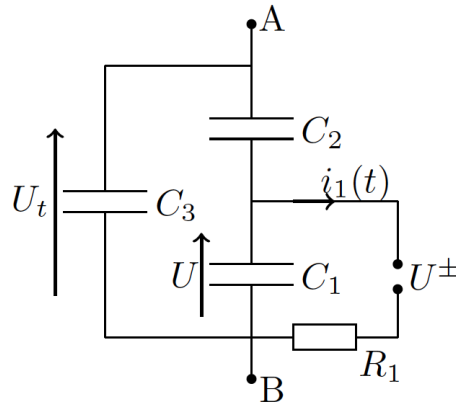
**Figura 2.1:** Modelo representativo para o fenômeno das descargas parciais.



Fonte: George (2021).

Fazendo a consideração que é aplicado uma tensão alternada  $U_i(t)$  nos terminais A e B, no modelo da figura 2.1, a representação do fenômeno das descargas parciais pode ser representada pelo circuito equivalente apresentado na Figura 2.2.

**Figura 2.2:** Circuito elétrico equivalente para o modelo de descargas parciais.

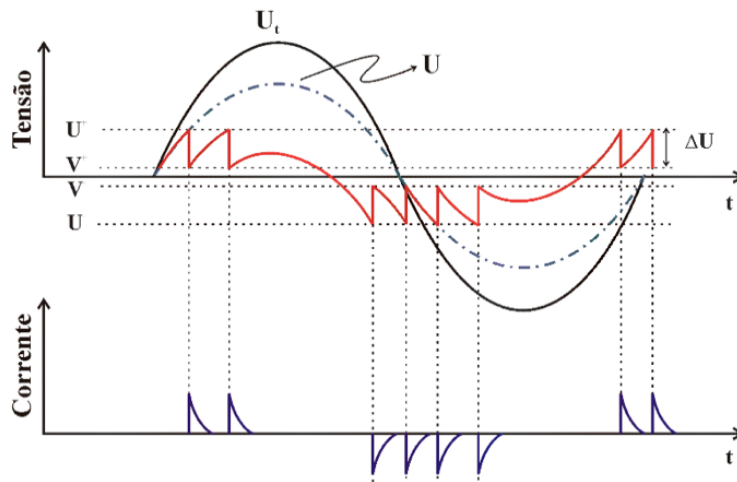


Fonte: George (2021) adaptado de Costa e Neves (1996).

A partir da análise da Figura 2.2,  $C_1$  representa a capacitância da cavidade,  $C_2$  representa a parte do material que está em série com a cavidade,  $C_3$  representa a capacitância restante. Já  $R_1$  representa a resistência do arco elétrico da descarga.

O meio dielétrico perde a capacidade de isolamento em razão da existência de uma cavidade gasosa com menor rigidez dielétrica quando a tensão  $U$  na cavidade atingir  $U^+$ , dando início ao processo de uma descarga. O gráfico representativo com o processo das descargas parciais em um meio dielétrico pode ser observado na Figura 2.3.

**Figura 2.3:** Gráfico representativo com o processo das descargas parciais em um meio dielétrico.



Fonte: Ferreira (2007).

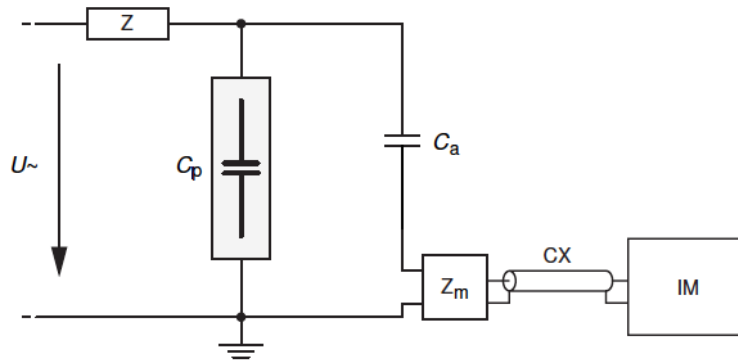
Há diferentes métodos para se fazer a detecção dos pulsos de corrente de origem proveniente das descargas parciais, como sensores HFCT (*High Frequency Current Transformer*) (NOREGA, 2016), sensores óticos (METWALLY, 2004), IEC60270 (2000) e

antenas UHF (HAMPTON; MEATS, 1988). A seguir são apresentados o método elétrico convencional e o método UHF.

### 2.1.1. Método Definido na IEC 60270

O método apresentado pela IEC 60270 (2000) utiliza um capacitor de acoplamento e uma impedância externa para a medição das descargas parciais. Há ainda um indutor para o bloqueio de interferências provenientes da fonte de tensão que pode ser utilizado. O esquemático do arranjo de medição proposto pela norma pode ser observado na Figura 2.4.

**Figura 2.4:** Arranjo para medição proposto na IEC 60270 (2000).



Fonte: Nobrega (2016) adaptado de IEC 60270 (2000).

Na Figura 2.4  $U$  representa a tensão alternada na entrada,  $C_p$  a capacitância do material isolante do respectivo equipamento a ser analisado,  $Z$  é uma impedância para filtragem de ruídos provenientes da fonte de tensão,  $C_a$  representa um capacitor de acoplamento,  $Z_m$  é uma impedância para medição do sinal das descargas parciais,  $CX$  representa um cabo coaxial e  $IM$  o instrumento para medição.

Para o momento que ocorre as descargas parciais,  $C_p$  pode ser substituída pelo circuito apresentado na Figura 2.2. Dessa forma, o pulso de corrente  $i_I(t)$  é proveniente pela carga injetada resultante da soma das capacitâncias de acoplamento e a interna do material isolante, como pode ser observado em (1).

$$Q = (C_p + C_a)\Delta U, \quad (1)$$

no qual  $\Delta U$  representa a queda de tensão que é provocada a partir da ocorrência das descargas parciais.

A carga liberada pelo capacitor de acoplamento, que será realmente medida é dada por:

$$Q_m = Ca\Delta U. \quad (2)$$

A partir das equações 1 e 2, podem ser obtidas a relação entre carga medida e carga gerada pela descarga parcial. Portanto,

$$\frac{Q_m}{Q} = \frac{Ca}{(Cp + Ca)}. \quad (3)$$

Tem-se como conclusão a partir de (3) que, para se obter medidas de cargas mais próximas ao valor real, devem ser utilizadas capacitâncias de acoplamentos com valores superiores à do equipamento que será monitorado.

### **2.1.2. Método UHF**

O método UHF consiste no uso de sensores, ou antenas, que detectam as ondas eletromagnéticas emitidas pelos pulsos de corrente provenientes das descargas parciais (HAMPTON; MEATS, 1988). As ondas eletromagnéticas base do estudo estão presente na faixa entre 300 MHz a 3 GHz. A faixa de 300 MHz a 1,5 GHz a mais relevante para a análise das descargas parciais (RUTGERS; FU, 1997; JUDD et al, 1999). A principal vantagem do método é a eliminação de uma conexão elétrica de forma direta com o objeto a ser analisado. Dessa forma, o método UHF é caracterizado como com técnica de medição não invasiva.

O método UHF foi utilizado pela primeira vez para a detecção de descargas parciais nos estudos desenvolvidos por Hampton e Meats (1988). No trabalho mencionado foram detectadas e localizadas descargas parciais por meio de sensores capacitivos em uma GIS (do inglês, *Gas Insulated Substation*) de 420 kV. Os resultados apresentados para a detecção tiveram maior sensibilidade na faixa de frequência entre 600 e 900 MHz.

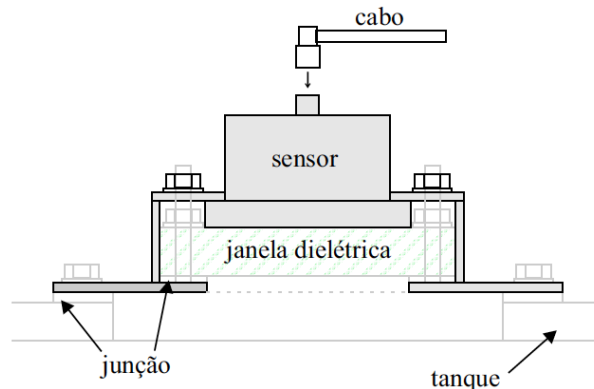
Costumeiramente, o acoplamento das antenas UHF em transformadores de potência se dá de dois modos, a partir de uma janela dielétrica ou via válvula de óleo. A seguir serão apresentados os dois modos.

#### **2.1.2.1. Acoplamento via Janelas dielétricas**

Os sensores externos do tipo janela são acoplados em aberturas feitas no tanque do equipamento, por meio de janelas dielétricas construídas com este objetivo. Na Figura 2.5 pode ser observado o esquemático, no qual, é apresentado como o sensor UHF é inserido em uma abertura no tanque do equipamento.



**Figura 2.5:** Sensor UHF do tipo janela e esquemático de montagem no tanque do transformador de potência.



Fonte: Nobrega (2019).

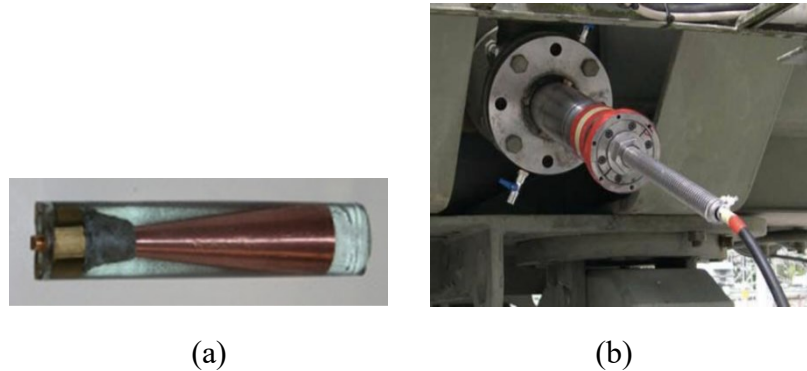
Pela análise da Figura 2.5 é possível observar que é necessário a inserção de um meio dielétrico entre o sensor e a parte interna do transformador, com o objetivo de permitir que a irradiação eletromagnética encontre um meio para se propagar para o ambiente externo.

As antenas aplicadas às janelas dielétricas podem ser de microfita, monopolar, dipolo e outras (NOBREGA et al, 2019; XAVIER, 2019a; XAVIER, 2019b). Dentre esses modelos as que tem maior destaque são as de microfita, em razão do baixo custo e da facilidade da implementação. Em contrapartida, as antenas de microfita possuem largura de banda estreita, o que se faz necessário a aplicação de algum método de otimização para que possa ser aplicada em banda larga.

### **2.1.2.2. Acoplamento via Válvula de Óleo**

Os sensores tipo sonda acoplados via válvula de óleo aos transformadores são indicados para os casos em que é inviável a modificação da estrutura do transformador, como exemplo, transformadores com algum tempo de uso. Dessa forma, o método é mais indicado pois nenhuma estrutura extra é solicitada e a instalação pode ser feita sem que seja necessário a interrupção do serviço. Na Figura 2.6 pode ser observado um modelo desse tipo de sensor.

**Figura 2.6:** a) Sensor cônico desenvolvido por Roldan, Tang e Gaskin (2008), b) Sonda UHF portátil instalada através da válvula de óleo de um transformador de 380 kV.



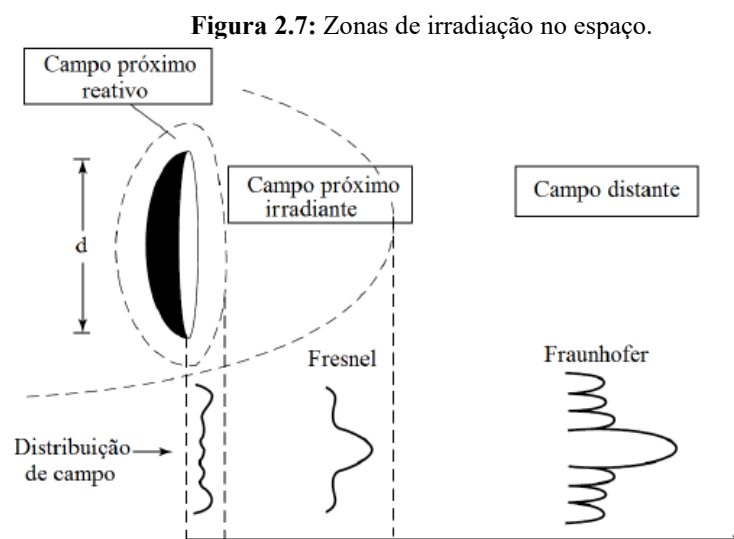
Fonte: Roldan, Tang e Gaskin (2008) e Tenbohlen et al. (2006).

## 2.2. Parâmetros Analisados no Estudo de Antenas

Conforme a definição apresentada por IEEE STANDARDS ASSOCIATION et al (2013), uma antena é “a parte de um sistema de transmissão ou de recepção que é projetada para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas”. Dessa forma, serão expostos a seguir os principais parâmetros analisados quando se faz o estudo de antenas.

### 2.2.1. Zonas de irradiação

Há três diferentes zonas de irradiação no espaço, com diferentes características de campos, como pode ser observado na Figura 2.7.



Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

A primeira zona é conhecida como zona de campo próximo reativo ou ainda zona de Rayleigh, tem por característica um campo predominantemente reativo, com densidade de potência praticamente constante. Essa região é limitada pela superfície da antena e por uma distância de:

$$R < 0,62 \sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}, \quad (4)$$

no qual,  $d$  é a maior dimensão da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A segunda zona é conhecida como zona de campo próximo irradiante ou ainda zona de Fresnel, tem por característica um campo predominantemente irradiante cuja distribuição angular depende da distância da antena (BALANIS, 2005). Essa região está localizada a uma distância  $R$ , com:

$$0,62 \sqrt{\frac{d^3}{\lambda}} < R < \frac{2d^2}{\lambda}. \quad (5)$$

A terceira zona é chamada como zona de campo distante ou ainda zona de Fraunhofer, tem por característica uma densidade de potência inversamente proporcional ao quadrado da distância da antena (BALANIS, 2005). Essa região está localizada a uma distância  $R$ , com:

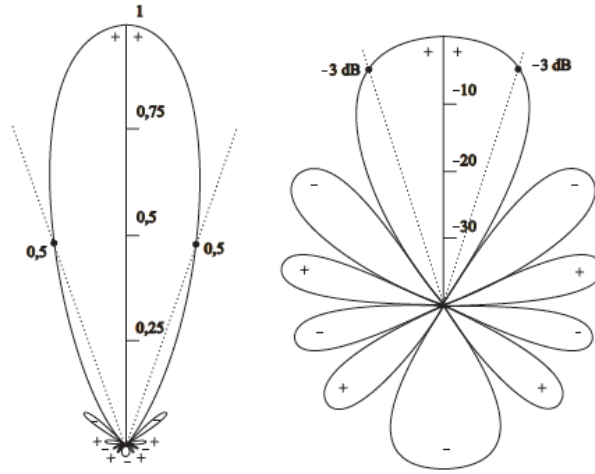
$$R > \frac{2d^2}{\lambda}. \quad (6)$$

### 2.2.2. Diagrama de Irradiação

Diagrama de irradiação de uma antena é definido como a distribuição espacial da potência ou campo elétrico emitidos por uma antena IEEE STANDARDS ASSOCIATION et al (2013). O diagrama de irradiação é determinado na região de campo distante. Esses podem ser diretivos, quando a antena recebe/irradia de maneira mais efetiva em uma direção, ou omnidirecional, quando, não há uma direção privilegiada para a potência recebida/irradiada.

Na Figura 2.8 pode ser observado um diagrama de irradiação, em escala linear e em escala logarítmica.

**Figura 2.8:** Diagramas de irradiação em escala linear e logarítmica, respectivamente.



Fonte: George (2021) adaptado de Balanis (2005).

Para o caso de sistemas de detecção de descargas parciais, as antenas diretivas são as mais indicadas para serem utilizadas, visto que, o objetivo é observar um determinado equipamento.

### 2.2.3. Densidade de Potência

O vetor de Poynting instantâneo é utilizado para descrever a potência associada a uma onda eletromagnética, como definido:

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H}, \quad (7)$$

no qual,  $\mathcal{W}$  é o vetor de Poynting instantâneo,  $\mathcal{E}$  é o campo elétrico instantâneo e  $\mathcal{H}$  é o campo magnético instantâneo (BALANIS, 2005). Dessa forma, o valor médio da potência irradiada  $P_{rad}$  pode ser obtido por meio da integração do vetor de Poynting ao longo da superfície, como pode ser observado na equação 8.

$$P_{rad} = \oiint W_{rad} \cdot ds. \quad (8)$$

A equação 8 é modelada se considerando o caso isotrópico, ou seja, o modelo ideal. Dessa forma, pode-se desenvolver a equação 8 conforme apresentado na equação 9.

$$P_{rad} = \oint\oint W_0 \cdot ds = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [W_p(r)] \cdot [r^2 \sin \theta d\theta d\phi] = 4\pi r^2 W_0. \quad (9)$$

Dessa forma, a densidade de potência sobre a superfície de uma esfera de raio  $r$  pode ser compreendido por:

$$W_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi r^2}. \quad (10)$$

#### 2.2.4. Diretividade

A diretividade  $D$  de uma antena em dada direção é definida como a relação entre a densidade de potência irradiada por ela e a potência irradiada por uma antena isotrópica IEEE STANDARDS ASSOCIATION et al (2013). Pode ser compreendido como a relação da irradiação em uma determinada direção pela média da intensidade em todas as direções.

Matematicamente, a diretividade pode ser representada como:

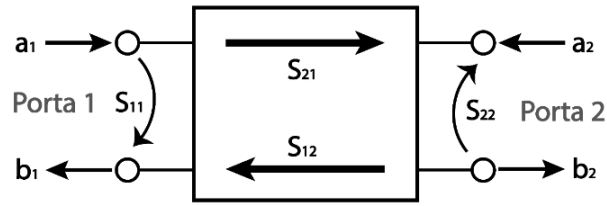
$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi I(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}. \quad (11)$$

#### 2.2.5. Parâmetros de Espalhamento (S)

Os parâmetros de espalhamento, costumeiramente chamados de parâmetros S (do inglês, *scattering*), tem por função representar relações de dispersão, difração e reflexão entre sinais de entrada e saída de dado circuito visto como uma caixa-preta (POZAR,2012). Esses parâmetros têm por objetivo mensurar a magnitude das reflexões ou espalhamentos, bem como desvios em fase.

Na Figura 2.9 pode ser observado um exemplo de circuito de micro-ondas de duas portas (conhecido como quadrípolo). No estudo das antenas, os parâmetros S são obtidos a partir de uma matriz de espalhamento retirada desse circuito.

**Figura 2.9:** Exemplo de um circuito de micro-ondas com duas portas.



Fonte: Oliveira (2016).

No qual,  $a_1$  e  $a_2$  representam as ondas incidentes nas portas 1 e 2, respectivamente;  $b_1$  e  $B_2$  representam as ondas refletidas nas portas 1 e 2, respectivamente; os parâmetros  $S_{ii}$  e  $S_{ij}$  são conhecidos como os coeficientes de reflexão e de transmissão (POZAR,2012).

### 2.2.6. Largura de Banda

Segundo Balanis (2005), a largura de banda pode ser definida como a faixa de frequência na qual o desempenho é considerado satisfatório. A faixa de frequência para a qual o coeficiente de reflexão  $S_{11}$  é inferior a -10 dB irá compreender o intervalo de frequências em que as perdas de retorno possuem valores aceitáveis. Dessa forma, quando a se trabalha com antenas de largura de banda estreita, costumeiramente se utiliza a seguinte expressão para o cálculo da largura de banda:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100\%, \quad (12)$$

no qual,

$f_2$  é a superior;

$f_1$  é a inferior;

$f_0$  é a central que representa a frequência de ressonância.

De acordo com a teoria da antena, as antenas podem ser classificadas em três tipos considerando a largura de banda de medição conforme mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Classificação das antenas baseado na largura de banda.

| Tipo da Antena    | Largura de Banda       |
|-------------------|------------------------|
| Banda estreita    | $BW < 0,1$             |
| Banda larga       | $0,1 \leq BW \leq 0,6$ |
| Banda ultra larga | $BW > 0,6$             |

Fonte: Próprio autor.

### 2.2.7. Equação de Friis

A equação de Friis faz a relação entre as potências transmitida e recebida entre duas antenas que estão separadas por uma distância  $R$  para a condição de campo distante da zona de irradiação, como pode ser observado a seguir (BALANIS,2005):

$$P_r = P_e G_e G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \eta_p \frac{1}{\alpha}, \quad (13)$$

no qual,

$P_r$  é a potência recebida pela antena receptora;

$P_e$  é a potência que é enviada pela antena emissora;

$G_e$  é o ganho da antena emissora;

$G_r$  é o ganho da antena receptora;

$\lambda$  é o comprimento de onda;

$R$  é a distância entre as duas antenas;

$\eta_p$  é o rendimento de polarização;

$\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2}$  é a atenuação no espaço livre;

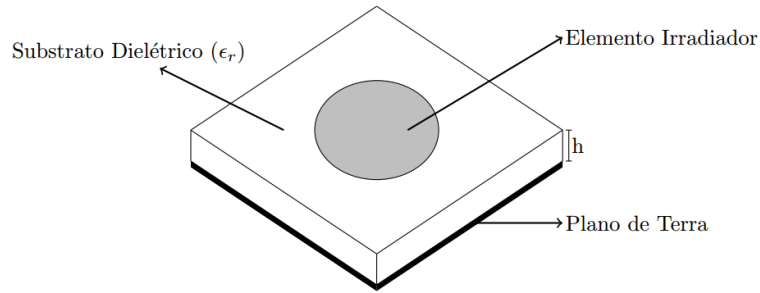
$\alpha$  é o coeficiente de atenuação relacionado à presença de partículas no canal de transmissão.

### 2.2.8. Antena Microfita

A antena de microfita é composta essencialmente por um plano de terra, uma camada de material condutor, conhecida como elemento irradiador, camada essa que cobre parcialmente um substrato dielétrico.

O substrato dielétrico possui espessura  $h$  e constante dielétrica  $\epsilon_r$  posicionado entre o elemento irradiador e o plano de terra como ilustrado na Figura 2.10.

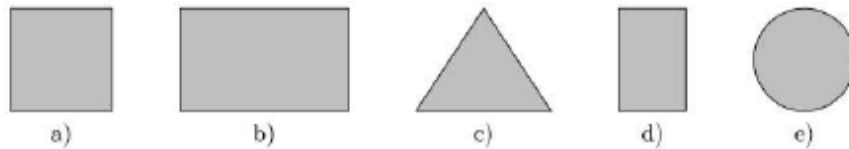
**Figura 2.10:** Estrutura geral de uma antena de microfita circular.



Fonte: Xavier (2018).

O elemento irradiador pode assumir diversas formas, como por exemplo: circulares, retangulares, triangulares, que são formas mais simples, podem ser bio-inspiradas em plantas, ou ainda fractais (XAVIER, 2018; NOBREGA et al, 2019; DE OLIVEIRA, 2010). Na Figura 2.11 pode ser observado algumas formas comuns para o elemento irradiador.

**Figura 2.11:** Formas do elemento irradiador, a) quadrada, b) retangular, c) triangular, d) dipolar, e) circular.



Fonte: Xavier (2018).

A partir das revisões bibliográficas feitas, foi possível chegar à conclusão que uma das formas mais utilizadas é a circular (XAVIER, 2019a; XAVIER, 2019b; DERNERYD, 1979). Para o projeto de uma antena de microfita circular, se faz necessário três parâmetros iniciais, que são eles: a frequência de ressonância, a constante dielétrica e a espessura do substrato. Dessa maneira, em 1979 foi sugerido um método de cálculo do raio do elemento irradiador (denominado de  $a$ ). As equações propostas são (DERNERYD, 1979):

$$a = \frac{a_e}{\left(1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a_e}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right)^{1/2}} \quad (14)$$

no qual,  $a_e$  corresponde ao raio efetivo da antena, e pode ser calculado por:



$$a_e = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (15)$$

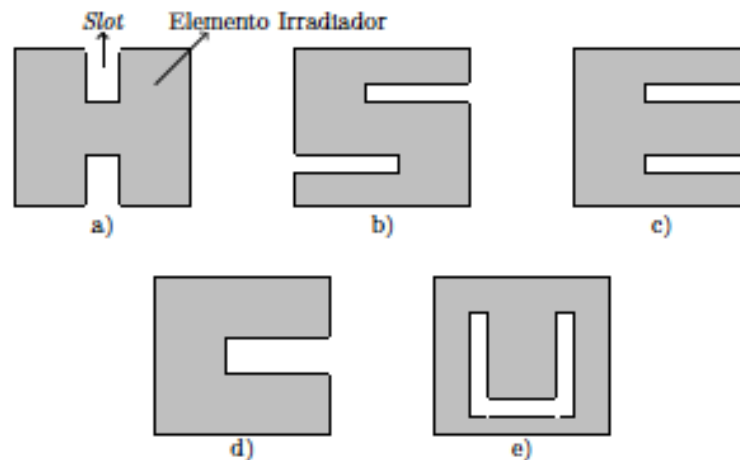
### 2.2.9. Técnicas de Otimização de Largura de Banda

Um dos problemas em se trabalhar com antena de microfita é que esse tipo de antena tem uma largura de banda estreita. Como um dos objetivos do projeto é tentar conseguir preencher a maior faixa entre 0,3 e 1,5 GHz faz-se necessário a utilização de técnicas que aumentem a largura de banda.

Os dois métodos mais utilizados para otimização da largura de banda em antenas de microfita com alimentação via sonda coaxial são: método dos slots e método da sonda em L.

O método dos slots consiste no recorte de alguns slots do elemento irradiador, criando assim capacitâncias que vão reduzir o efeito indutivo da sonda, possibilitando a utilização de substratos mais espessos, e por consequência aumentando a largura de banda da antena (HUYNH; LEE, 1995). Na Figura 2.12 são apresentados alguns dos formatos dos possíveis slots.

**Figura 2.12:** Exemplos de formatos de slots: a) H, b) S, c) E, d) C, e) U.

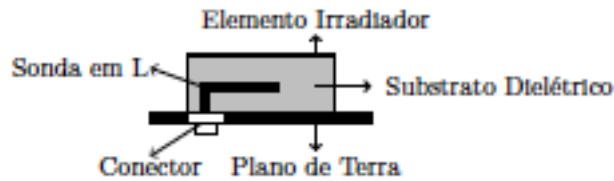


Fonte: Próprio autor.

O formato mais eficaz, segundo Bhardwaj (2012), é o recorte em “U” como um dos mais eficientes na otimização de banda, atingindo larguras de banda maiores que 22%

O método da sonda em L consiste na dobra da sonda coaxial, produzindo uma capacitância que reduz o efeito indutivo da sonda, possibilitando assim a utilização de substratos mais espessos (LUK et al, 1998). O esquemático da sonda em L pode ser observado na figura 2.13.

**Figura 2.13:** Esquemático da técnica de sonda em L.



Fonte: Próprio autor.

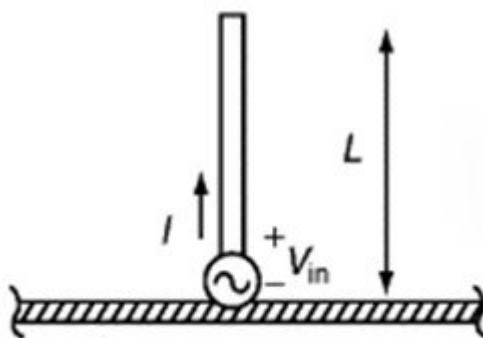
### 2.2.10. Antena Monopolo

Uma antena monopolo é um tipo de antena dipolo formada pela substituição de uma metade da antena dipolo com o plano de terra em um ângulo reto com a outra metade. Se o plano de terra for grande o suficiente, o monopolo se comportará exatamente como um dipolo porque sua reflexão no plano do solo forma a metade ausente do dipolo. O exemplo mais comum de uma antena monopolo é uma antena chicote, que é basicamente um fio rígido, mas flexível, geralmente montado verticalmente.

A meia estrutura de uma antena dipolo regular é chamada de antena monopolo, em referência à presença de apenas um lado físico. Uma meia estrutura semelhante para uma antena dipolo dobrada é chamada de antena monopolo dobrada. A presença do plano de terra permite que a antena monopolo opere eletricamente como equivalente a uma antena dipolo. O plano de base substitui equivalentemente a metade inferior por um princípio de geração de imagens, semelhante à criação de uma imagem óptica através de um espelho.

Na Figura 2.14 é possível ser observado o modelo de uma antena monopolar.

**Figura 2.14:** Modelo de uma antena monopolar.



Fonte: Adaptado de Chen (2004).

Dessa forma, tem-se que o comprimento  $L$  é dada por:

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (16)$$

no qual  $\lambda$  é o comprimento de onda.

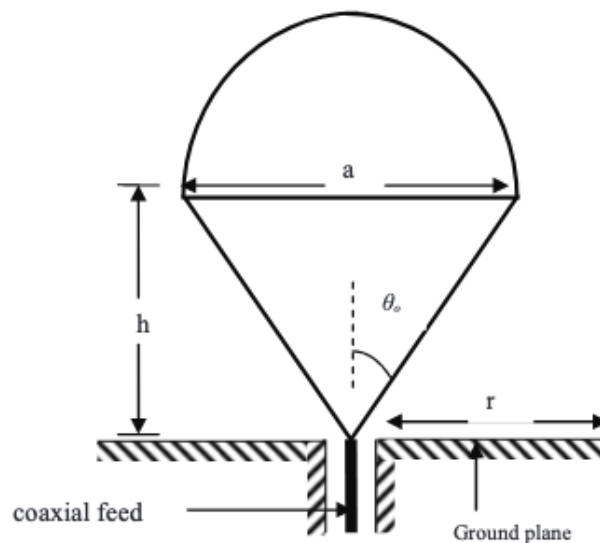
### 2.2.11. Antena Cônica

Outra antena utilizada para obter as características de banda larga da antena do tipo monopolo é a cônica, tendo sua geometria e configuração variada a partir da aplicação, sendo também conhecida como antena monopolar cônica.

Os benefícios de usar o formato cônico como design são: a largura de banda mais ampla, maior ganho e maior VSWR (BALANIS, 2005). Como uma antena monopolo, a cônica também é quase omnidirecional.

Na Figura 2.15 é apresentado o modelo de uma antena monopolar cônica.

**Figura 2.15:** Modelo de uma antena monopolar cônica.



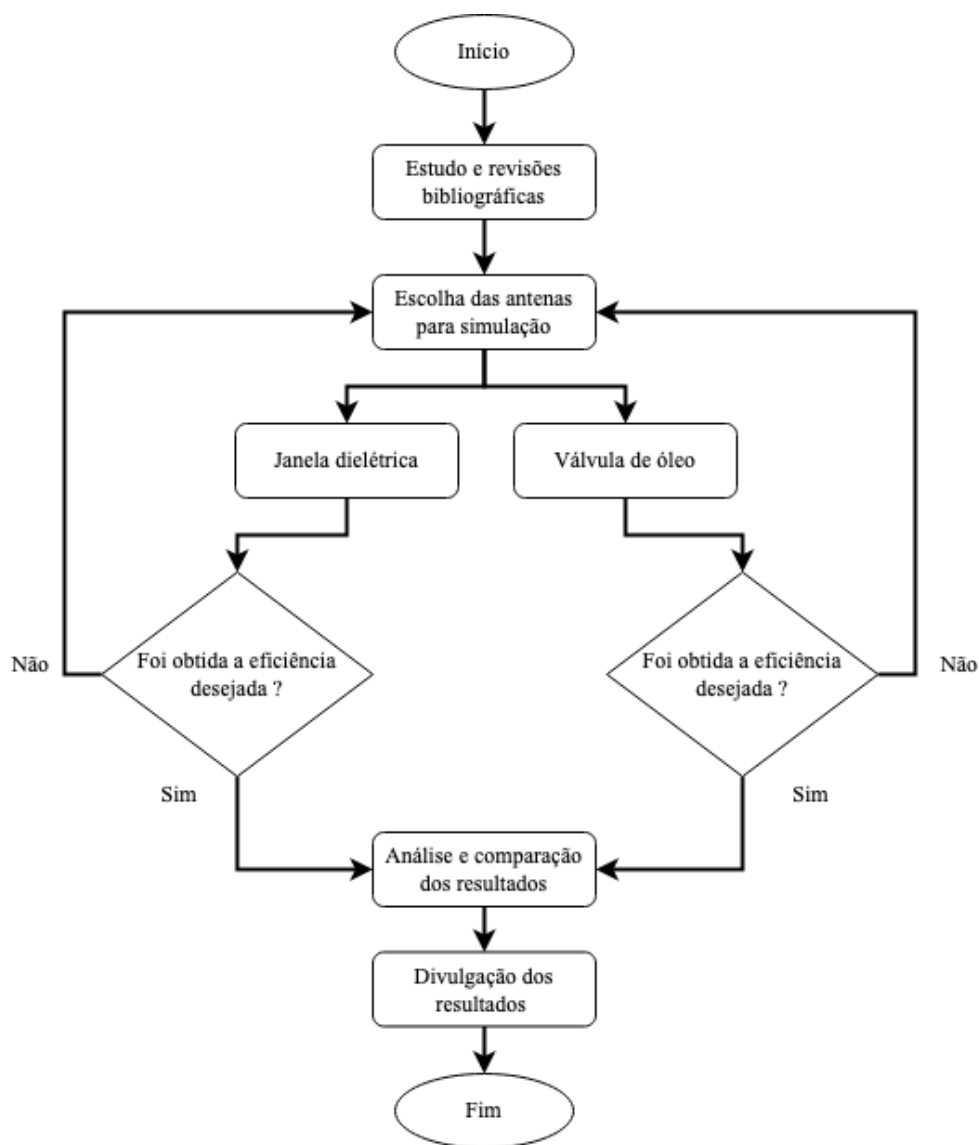
Fonte: Mulenga & Flit (2009).

### 3. METODOLOGIA

Esse capítulo é destinado a apresentação da metodologia implementada no projeto. Este trabalho de conclusão de curso foi produzido no Laboratório de Alta Tensão Científicas (LAT) sob a orientação do professor Dr. Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega. A cada etapa do projeto foram realizadas pesquisas bibliográficas, utilizando-se livros, artigos e textos relacionados.

Na Figura 3.1 é possível observar um fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 3.1: Fluxograma para desenvolvimento do projeto.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1. Estudo e revisões bibliográficas

A primeira etapa foi dedicada a revisão do estado da arte e a aquisição de conhecimentos inerentes ao projeto, como por exemplo, descargas parciais, método UHF e estudos de conhecimentos básicos de uma antena de microfita, bem como de seus parâmetros (coeficiente de reflexão, ganho, diretividade, dentre outros).

Em seguida, foram estudadas as técnicas de otimização de largura de banda (*U-slot* e sonda em L), dessa forma, possibilitando a construção de uma antena otimizada. Para o cálculo da largura de banda das antenas baseando-se nas revisões feitas foi considerado valores inferiores a -10 dB para o  $S_{11}$  para esse trabalho.

### 3.2. Escolhas das antenas

Para a escolha das antenas que seriam simuladas foram analisadas as formas das antenas mais apropriadas para o tipo de acoplamento (via janela dielétrica ou válvula do transformador) e as técnicas para otimização de banda, sendo assim possível selecionar qual teria maior eficiência para a aplicação.

A partir das revisões feitas foi possível chegar ao resultado que para o caso do acoplamento via janela dielétrica a maioria dos trabalhos utilizam antenas planares com diferentes formatos e otimizações. Dessa forma, as antenas U-slot, sonda em L e U-slot com sonda em L, se basearam no trabalho de (XAVIER, 2019a), modificando-se as dimensões das otimizações, os materiais utilizados (agora sendo utilizado o alumínio como elemento irradiador e plano de terra) obtendo-se resultados mais próximos ao real.

O desenvolvimento da antena planar elíptica foi feita por meio da ferramenta chamada Ansoft HFSS Antenna Design Kit, presente no software utilizado. A antena planar log espiral foi baseada nas equações contidas em (MORBIDEL et al, 2017) e seu dimensionamento foi possível por meio da mesma apresentada na antena anterior.

Para o caso da inserção via válvula de óleo as antenas simuladas foram antenas monopolares e cônicas, considerando uma válvula do tipo DN80, com restrições de tamanho de 80mm de diâmetro. As antenas monopolar e cônica foram baseadas nos modelos contidos em (SINAGA, 2012). Já a antena discônica e cônica log foram dimensionadas com o auxílio da ferramenta Ansoft HFSS antena Design Kit.

A partir da escolha das antenas foi possível passar para a etapa das simulações, a seguir será descrito os procedimentos computacionais.

### 3.3. Procedimentos computacionais

As simulações das antenas foram feitas utilizando o High Frequency Structure Simulator (HFSS), o que permitiu otimizar as estruturas das antenas e escolher as que tiveram melhor rendimento. A utilização do HFSS é justificada pela ampla utilização na literatura, sendo aplicado em vários trabalhos, tais como Xavier (2018) e Nobrega et al (2019).

Para a construção do ambiente de simulação foram seguidas as etapas:

**Dimensionamento de parâmetros estruturais do modelo:** Nessa etapa são definidas as dimensões físicas da estrutura (para o caso as antenas), tais como, largura, espessura, comprimento, posicionamento dos elementos.

**Especificação dos materiais:** Nessa etapa será atribuído as características de cada material utilizado nos elementos construídos na etapa anterior. Os materiais utilizados podem vir do próprio software, como o cobre ou epóxi, por exemplo, ou ainda podem ser criados pelo usuário, sendo feita a inserção de dados como a constante dielétrica, tangente de perdas e outros. Para o trabalho foi considerado como elemento irradiador e plano de terra materiais como cobre e o alumínio, já como substrato dielétrico foi utilizado o ar, para os casos das antenas U-slot, sonda em L e U-slot e sonda em L, para os demais casos foi utilizado a fibra de vidro (FR4).

**Condições de Contorno:** Nesse momento é definida a caixa de irradiação, o qual corresponde aos limites do espaço simulado para os quais a irradiação incidente sobre a antena seja absorvida e não gere reflexões de retorno. Dessa forma, as dimensões da caixa de irradiação devem ser de  $\lambda/4$  da frequência central da antena e a caixa foi preenchida por ar.

**Excitação da estrutura:** Nessa etapa é escolhida uma fonte de excitação, para o trabalho foi utilizada a *waveport* (que é definido como uma solução de campo modal). Para que o resultado obtido seja preciso é necessário definir de maneira adequada tanto valores de impedância quanto valores dimensionais. Dessa forma, para o projeto foi considerado o valor de impedância de  $50 \Omega$  é a dimensão equivalente ao diâmetro externo do cabo coaxial simulado (5 mm).

**Configurações de análise:** Nesse momento foi determinado a frequência para a solução do problema, bem como o número de passos executados para a resolução das matrizes implementadas pelo método dos elementos finitos. Para o trabalho será considerado 20 passos de execução e o valor 900 MHz como frequência central.

Para as antenas que foram construídas utilizando a ferramenta Ansoft HFSS Design Kit, foi introduzido dados de entrada como a frequência central, algumas dimensões, característica de materiais e a partir daí a ferramenta construí o modelo da antena no HFSS.

### **3.4. Análise e comparação dos resultados**

Após as simulações os resultados foram comparados considerando alguns aspectos, são eles, a largura de banda, padrão de irradiação, dimensões físicas e ganho.

A largura de banda é o dado que vai permitir mensurar o percentual da faixa de frequência que a antena consegue preencher. O padrão de irradiação vai ser importante pois dependendo da forma de acoplamento da antena seria mais indicado um determinado padrão de irradiação. As dimensões físicas vão restringir a utilização de algumas antenas, pois para o caso das antenas inseridas via válvula de óleo tem-se a limitação do tamanho da válvula, para o caso das antenas via janela dielétrica, quanto menores as dimensões físicas melhor, pois menos danos serão ocasionados ao transformador.

Para a análise comparativa adotou-se a largura de banda como principal critério de desempate. Há ainda a limitação das dimensões físicas para o caso da inserção das antenas via válvula de óleo.

A partir dos dados foram construídas as tabelas comparativas e os resultados podem ser observados no próximo capítulo.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. A primeira seção é referente aos resultados relacionados a antena acopladas via janela dielétrica, sendo apresentadas análises a respeito das simulações e comparativos. Para a segunda seção, tem-se os resultados relacionados a antena acopladas via válvula de óleo, sendo vista as mesmas análises da seção anterior. Por fim, a terceira seção é feito o comparativo geral entre as duas anteriores.

### 4.1. Antenas com Acoplamento Via Janela Dielétrica

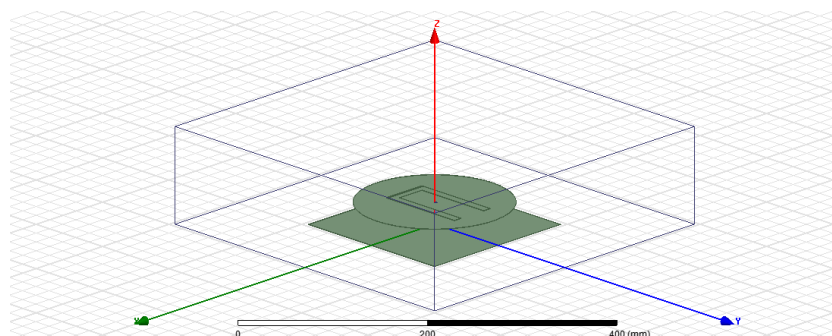
A análise dos resultados desta etapa está dividida em cinco subseções, cada uma delas dedica a apresentação dos resultados das simulações das respectivas antenas:

- Antena de microfita com otimização em *U-slot*;
- Antena de microfita com otimização sonda em L;
- Antena de microfita com otimização em *U-slot* e sonda em L;
- Antena planar elíptica;
- Antena planar espiral log.

#### 4.1.1. Antena de microfita com otimização em *U-slot*

Após a simulação da antena de microfita circular, foi observado que a largura de banda era estreita, para aumentar a largura de banda da antena o primeiro método de otimização foi utilizado sendo ele o *slot* em forma de U. Na Figura 4.1 é apresentado o modelo computacional desenvolvido no HFSS da antena de microfita com *U-slot*.

**Figura 4.1:** Modelo computacional da antena com otimização *U-slot*.



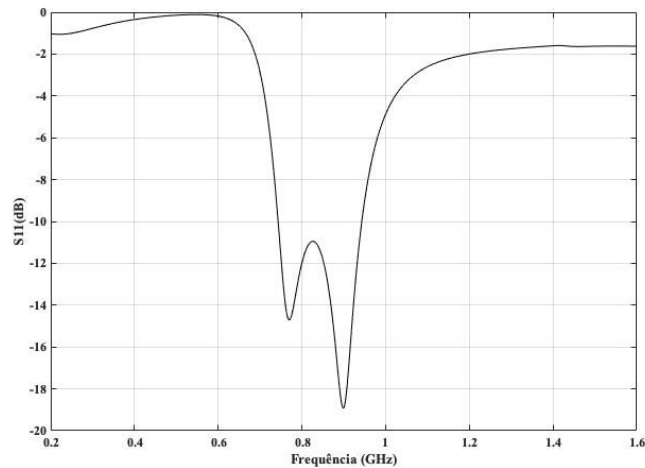
Fonte: Próprio autor.



O modelo apresentado na Figura 4.1 possui como dielétrico o ar e como elemento irradiador e plano de terra o alumínio, já em termos de dimensões físicas a antena possui um raio de 87 mm e espessura de 25 mm.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.2, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) obtido por meio da técnica de otimização em *U-slot*.

**Figura 4.2:** Coeficiente de reflexão para antena com otimização em *U-slot*.

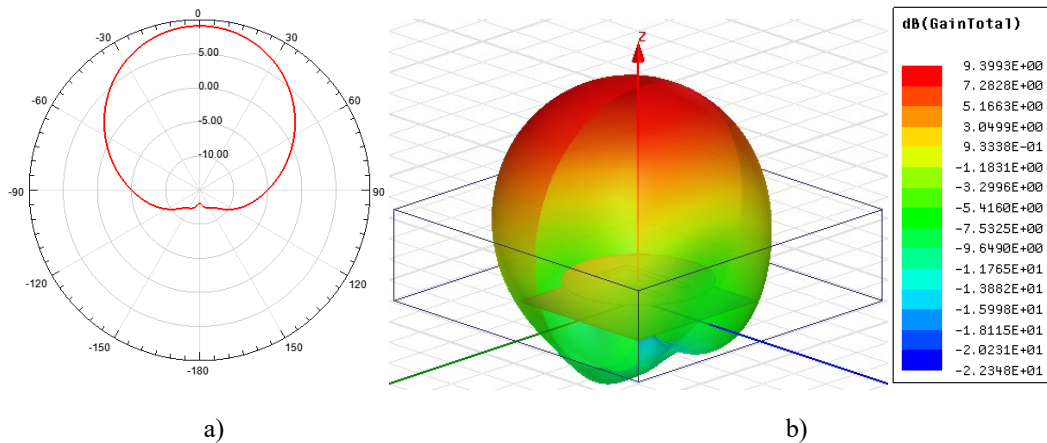


Fonte: Próprio autor.

A análise da Figura 4.2 permite a obtenção da largura de banda da antena que vai de 0,74 GHz até 0,94 GHz, aproximadamente, representando 22,22%, com pico de perda de retorno de -19,23 dB na frequência de 0,91 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.3.

**Figura 4.3:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena com otimização *U-slot*.



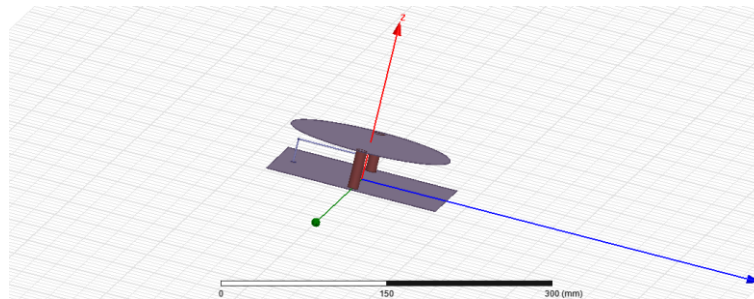
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.3 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente 9,33 dB e uma característica direcional.

#### 4.1.2. Antena de microfita com otimização sonda em L

O segundo método de otimização utilizado foi ele o sonda em L. Na Figura 4.4 é apresentado o modelo computacional desenvolvido no HFSS da antena de microfita com sonda em L.

**Figura 4.4:** Modelo computacional da antena com otimização sonda em L.

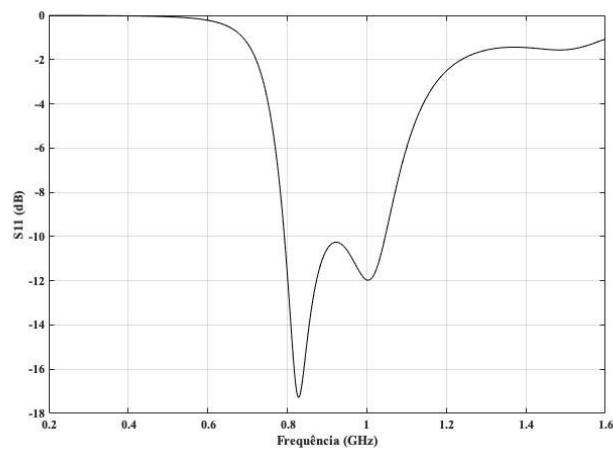


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.4 possui como dielétrico o ar e como elemento irradiador e plano de terra o alumínio, já em termos de dimensões físicas a antena possui um raio de 75 mm e espessura de 35 mm.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.5, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) obtido por meio da técnica de otimização sonda em L.

**Figura 4.5:** Coeficiente de reflexão para antena com otimização sonda em L.

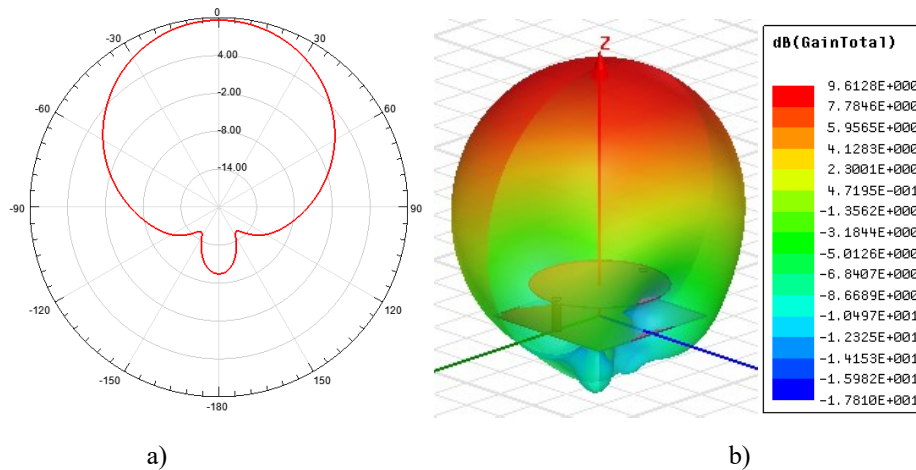


Fonte: Próprio autor.

A análise da Figura 4.5 permite a obtenção da largura de banda da antena que vai de 0,79 GHz até 1,05 GHz, aproximadamente, representando 28,89 %, com pico de perda de retorno de -17,30 dB na frequência de 0,83 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.6.

**Figura 4.6:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena com otimização sonda em L.



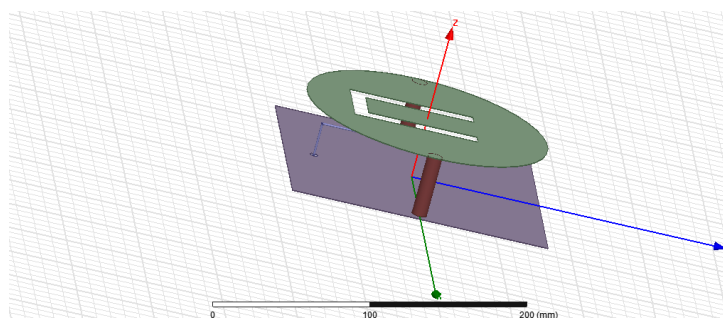
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.6 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente 9,61 dB e uma característica direcional.

### 4.1.3. Antena de microfita com otimização U-slot e sonda em L

Em seguida, foram utilizados os dois métodos anteriores (U-slot e sonda em L) para se obter um novo modelo de antena. O projeto da antena simulada pode ser observado na Figura 4.7.

**Figura 4.7:** Modelo computacional da antena com U-slot e sonda em L.

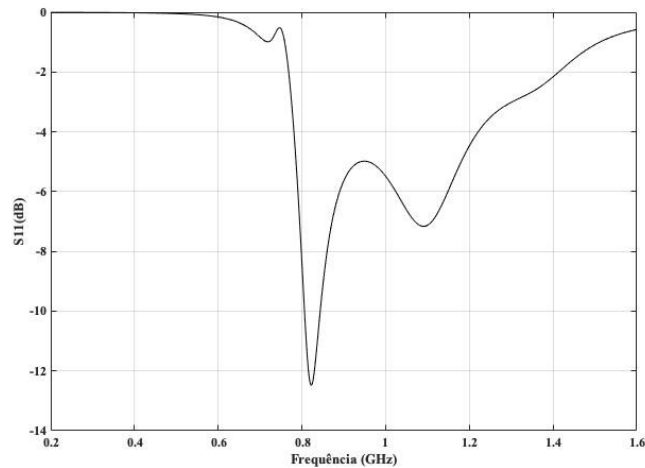


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.7 possui como o dielétrico o ar e como elemento irradiador e plano de terra o alumínio, já em termos de dimensões físicas a antena possui um raio de 80 mm e espessura de 40 mm.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.8, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) obtido por meio da utilização das técnicas de otimização U-slot e sonda em L.

**Figura 4.8:** Coeficiente de reflexão para antena com otimização U-slot e sonda em L.

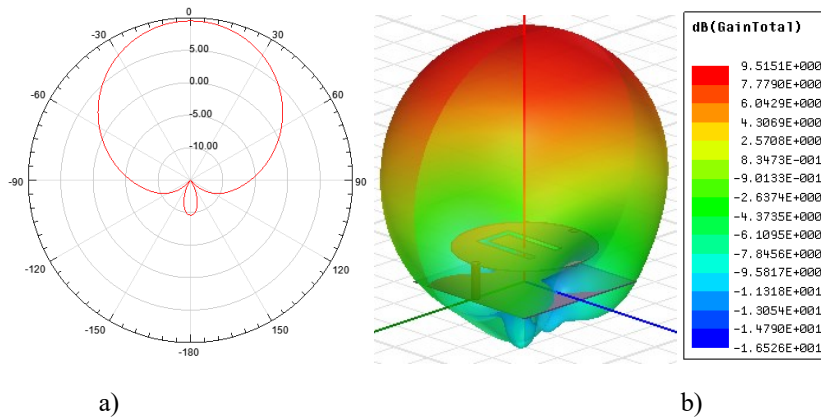


Fonte: Próprio autor.

A análise da Figura 4.2 permite a obtenção da largura de banda da antena que vai de 0,80 GHz até 0,85 GHz, aproximadamente, representando 5,56%, com pico de perda de retorno de -12,14 dB na frequência de 0,81 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.9.

**Figura 4.9:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena com otimização U-slot e sonda em L.



Fonte: Próprio autor.

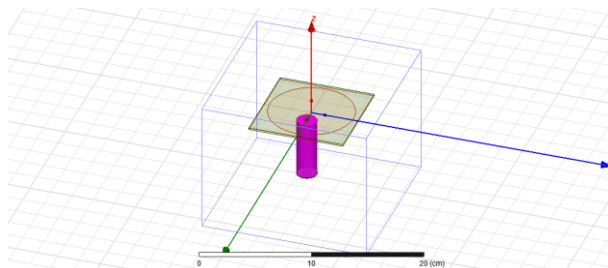
A partir da análise da Figura 4.9 é possível observar que a antenna tem um ganho de aproximadamente 9,51 dB e tem uma característica direcional.

#### 4.1.4. Antena planar elíptica

A antena elíptica se difere das anteriores na questão do formato, que nesse momento terá um caráter elíptico e não mais circular com as anteriores. Em nível de simulação, distinguem-se na utilização de diferentes substratos, anteriormente sendo utilizado o ar e nesse momento o FR4.

O modelo da antena elíptica construído no HFSS pode ser observado na Figura 4.10.

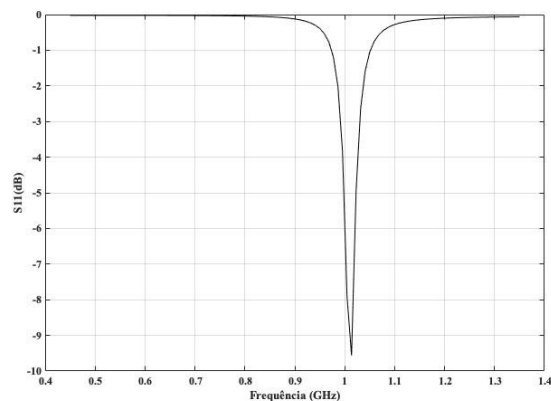
**Figura 4.10:** Modelo computacional da antena elíptica.



Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.10 possui as seguintes dimensões físicas a diâmetro do eixo maior de 77,3 mm e diâmetro de eixo menor de 76,4 mm. O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.11, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.11:** Coeficiente de reflexão para antena elíptica.

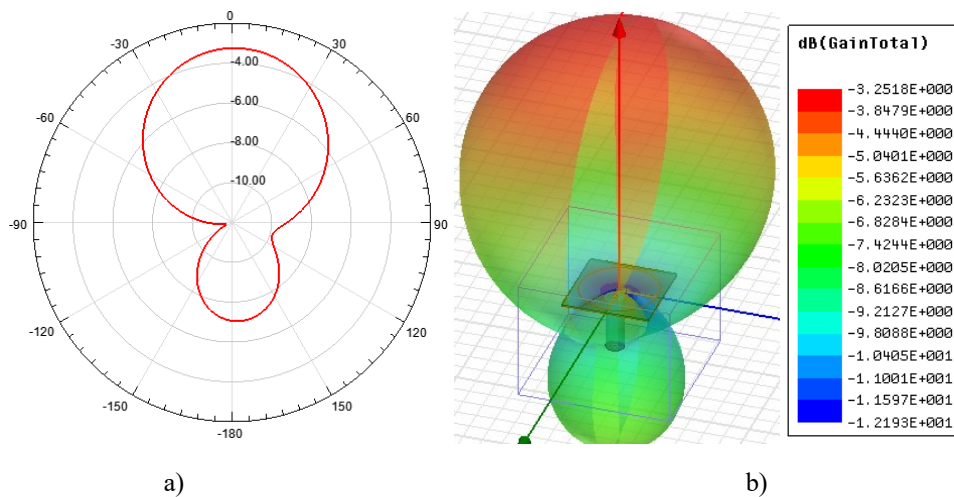


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.11 pode-se tirar a conclusão que a antena ressona em aproximadamente 1 GHz. Contudo diferente das anteriores esse modelo apresenta uma largura de banda estreita, com o valor de pico de retorno inferior a -10 dB (mais precisamente -9,41 dB) aspecto que não é muito interessante para a aplicação na detecção de descargas parciais. Contudo, há trabalhos na literatura que utilizam antenas com um coeficiente  $S_{11}$  de até -5 dB. Sendo assim, o coeficiente de retorno inferior a -10 dB não invalidaria a antena.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.12.

**Figura 4.12:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena elíptica.



Fonte: Próprio autor.

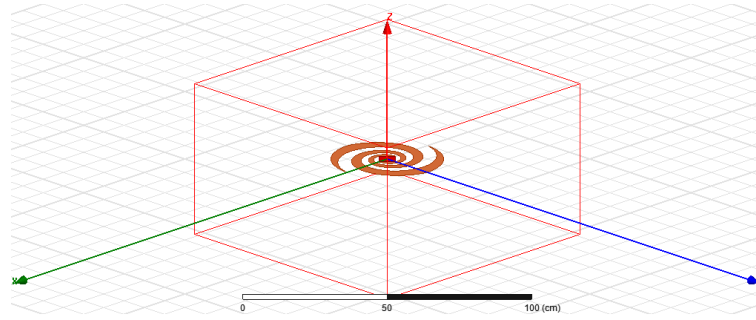
A partir da análise da Figura 4.12 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente -3,25 dB e tem uma característica direcional.

#### 4.1.5. Antena planar espiral log

A antena planar espiral log tem sua construção baseada das equações observadas em (MORBIDEL et al, 2017) e se utilizando uma ferramenta chamada Ansoft HFSS Antenna Design Kit, presente no software utilizado, por meio dela foi possível dimensionar a antena a partir de determinados parâmetros de entrada, o elemento irradiador e o plano de terra para esse modelo são de cobre, sendo utilizado o ar como dielétrico.

O modelo da antena plana espiral log construído no HFSS pode ser observado na Figura 4.13.

**Figura 4.13:** Modelo computacional da antena planar espiral log.

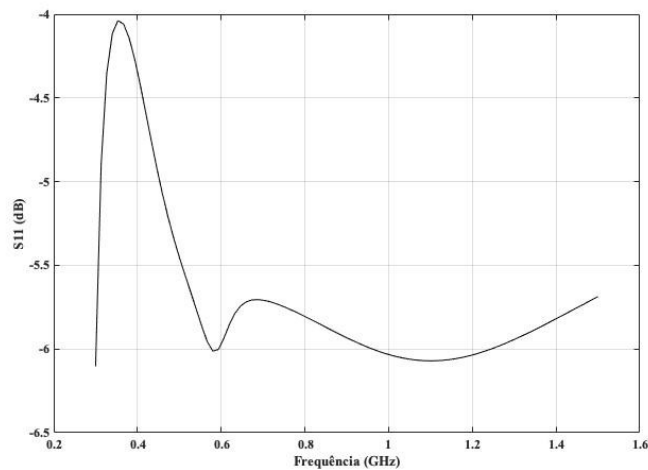


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.13 possui um raio de 100 mm, aproximadamente, aspecto esse que prejudica muito sua utilização, pois seria necessária uma janela dielétrica maior no tanque do transformador, em comparação com as anteriores.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.14, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.14:** Coeficiente de reflexão para antena planar espiral log.

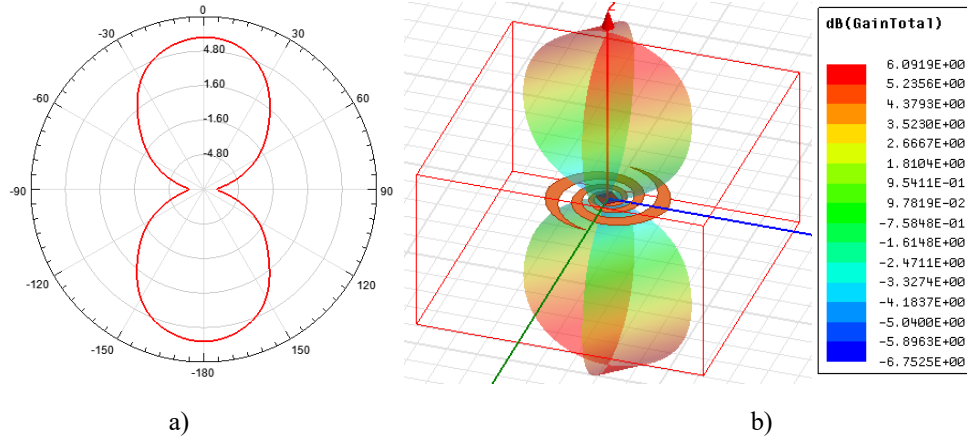


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.14 é possível concluir que a antena tem um resultado inferior as anteriores, já que o valor de pico do  $S_{11}$  está em torno dos -6 dB. Vale observar que a largura de banda não foi calculada, uma vez que foram adotados valores de -10 dB para o cálculo da largura de banda. Contudo, o valor de pico de retorno foi de aproximadamente -6,1 dB, na frequência de 1,1 GHz. Para essa antena foi feita a mesma consideração da antena anterior, ou seja, a antena não foi invalidada por possui um  $S_{11}$  inferior a -10 dB.

O diagrama de irradiação e o ganho da antenna para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.15.

**Figura 4.15:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antenna planar espiral log.



Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.15 é possível observar que a antenna tem um ganho de aproximadamente 6,09 dB e uma característica bidirecional.

#### 4.1.6. Comparativo entre as antenas

Após as simulações com os resultados obtidos foi possível construir a Tabela 4.1, na qual, serão comparadas as antenas destinadas a inserção via janela dielétrica nos transformadores de potência.

**Tabela 4.1:** Tabela comparativa entre as antenas simuladas destinadas a acoplamento via janela dielétrica.

| Modelo da Antena    | Largura de Banda       | Padrão de Irradiação | Dimensões Físicas (Raio em mm) | Ganho (dB) |
|---------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|------------|
| U-slot              | Banda larga (22,22%)   | Direcional           | 87                             | 9,33       |
| Sonda em L          | Banda larga (28,89%)   | Direcional           | 75                             | 9,61       |
| U-slot e sonda em L | Banda estreita (5,56%) | Direcional           | 80                             | 9,51       |
| Planar elíptica     | Banda estreita (<10%)  | Direcional           | 77,3                           | -3,25      |
| Planar espiral log  | Banda estreita (<10%)  | Bidirecional         | 100                            | 6,09       |

Fonte: Próprio autor.



A análise da Tabela 4.1 nos permite observar alguns aspectos interessantes. A antena que possui a maior largura de banda no comparativo é a Sonda em L, com o resultado de 28,89%, importante nas aplicações de detecção de descargas parciais. Os ganhos das três primeiras antenas têm resultados próximos, em torno de 9 dB. Contudo a antena que obteve melhor resultado de ganho foi novamente a antena com sonda em L, com 9,61 dB.

Observando-se as dimensões físicas a antena que causaria menor impacto na sua inserção via janela dielétrica seria o modelo da antena com sonda em L, pois é a antena que possui o menor raio.

Dessa forma, para a aplicação de via janela dielétrica a antena mais indicada seria a antena com sonda em L, pois no comparativo foi a que obteve os melhores resultados, de largura de banda, de ganho e nas dimensões físicas.

## **4.2. Antenas com acoplamento via válvula de óleo**

A análise dos resultados desta etapa está dividida em quatro subseções, cada uma delas dedica a apresentação dos resultados das simulações das respectivas antenas:

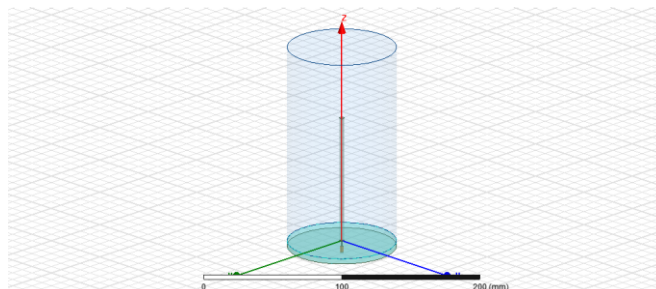
- Antena monopolo;
- Antena cônica;
- Antena discônica;
- Antena cônica log.

### **4.2.1. Antena monopolo**

O primeiro modelo de antena simulado foi a antena monopolo, dessa forma, baseado na equação 16, foi construído o modelo no HFSS. Vale lembrar que inicialmente foi desenvolvido um modelo teórico e em seguida foram feitas adaptações para que a antena pudesse ser inserida via válvula de óleo.

O modelo da antena desenvolvido no HFSS pode ser observado na Figura 4.16.

**Figura 4.16:** Modelo computacional da antena monopolo.

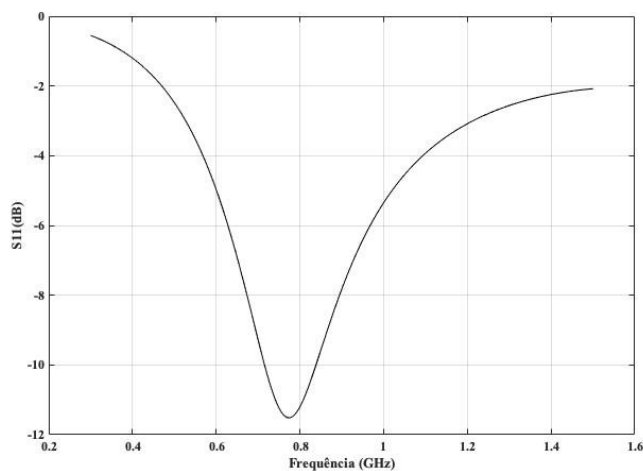


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.16 possui de base um raio de 38 mm e de altura  $L$  são 98 mm. As dimensões são restritas por conta das restrições impostas pelo tamanho da válvula de óleo do transformador.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.17, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.17:** Coeficiente de reflexão para antena monopolo.

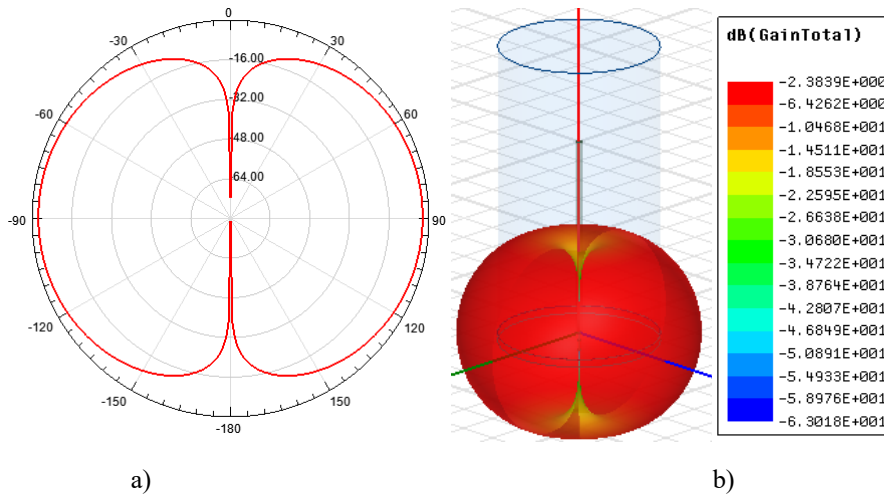


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.17 é possível concluir que a antena monopolo possui uma largura de banda que vai de 0,7 até 0,81 aproximadamente, representando 12,22%, com pico de perda de retorno de -11,16 dB na frequência de 0,78 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.18.

**Figura 4.18:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena monopolo.



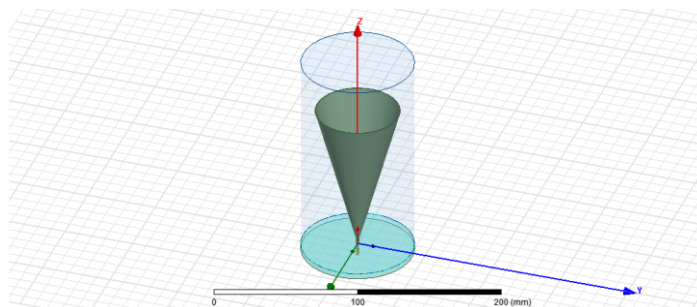
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.18 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente -2,39 dB e uma característica omnidirecional.

### 4.2.2. Antena cônica

Em seguida, foi construído o modelo da antena cônica que se encaixasse nas limitações físicas impostas pela válvula de óleo. Dessa forma, o modelo da modelo desenvolvido no HFSS pode ser observado na Figura 4.19.

**Figura 4.19:** Modelo computacional da antena cônica.

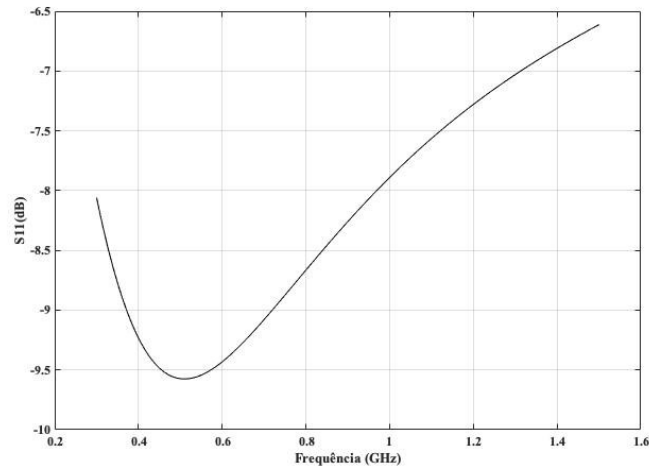


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.19 possui um raio de cone de 30 mm e de altura  $L$  são 100 mm.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.20, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.20:** Coeficiente de reflexão para antena cônica.

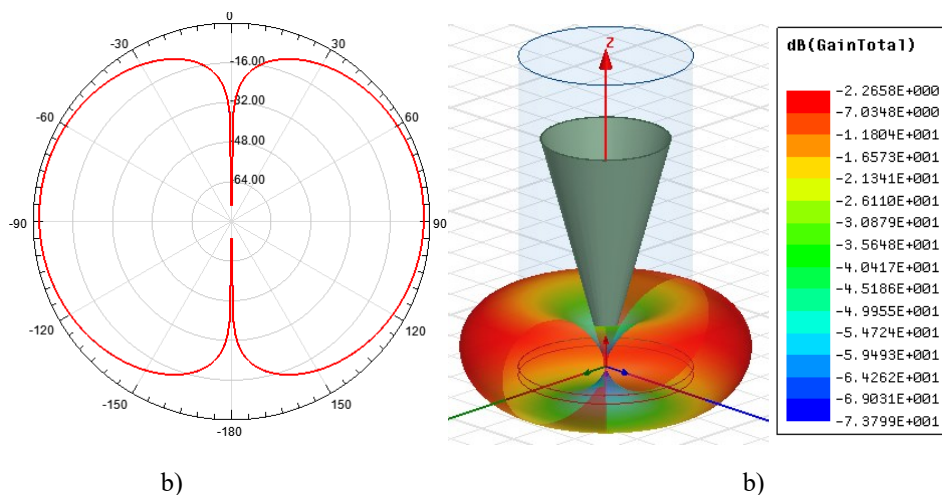


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.20 é possível concluir que a antena após as adaptações construtivas para a adequação necessária apresentou uma largura de banda estreita, com pico de perda de retorno de -9,58 dB na frequência de 0,52 GHz. O valor do coeficiente de retorno foi inferior a -10 dB. Contudo, esse aspecto não invalidaria a antena, pois a trabalhos na literatura que conseguem fazer a detecção com antenas com coeficientes  $S_{11}$  de até -5 dB.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.21.

**Figura 4.21:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena cônica.



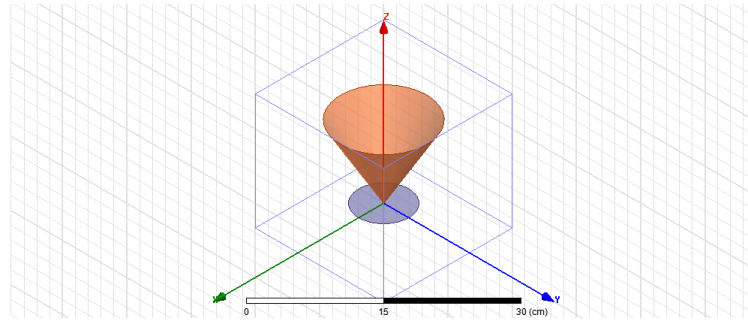
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.21 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente -2,27 dB e uma característica omnidirecional.

### 4.2.3. Antena discônica

Após os dois modelos anteriores foi observado qual seria o comportamento de uma antena discônica para a aplicação. Desse modo, foi simulado no HFSS com auxílio da ferramenta Antena Design Kit o modelo da antena, que pode ser observado na Figura 4.22.

**Figura 4.22:** Modelo computacional da antena discônica.

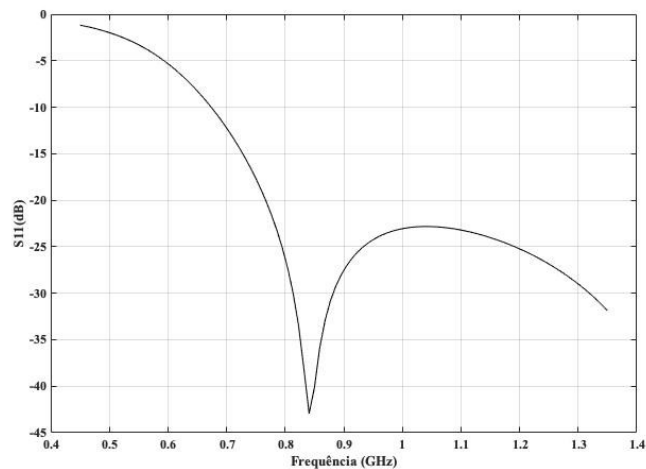


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.22 possui um raio de cone de 66,7 mm e de altura  $L$  são 120 mm. Foi utilizado o cobre como condutor, envolto em uma caixa de ar. Dessa forma, para ser possível a inserção via válvula de óleo seria necessária algumas adaptações construtivas.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.23, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.23:** Coeficiente de reflexão para antena discônica.

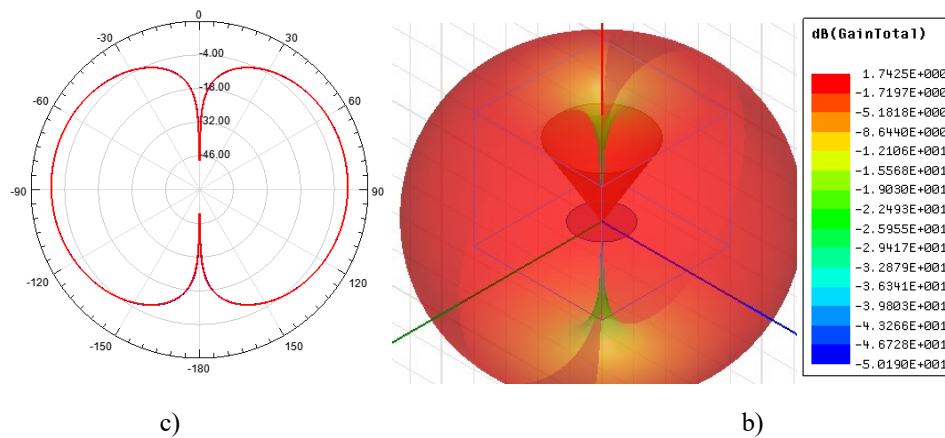


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.23 é possível concluir que a antena após as adaptações construtivas para a adequação necessária a antena o modelo apresentou uma largura de banda ultra larga (ou seja,  $BW > 60\%$ ), com pico de perda de retorno de -43,36 dB na frequência de 0,84 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.24.

**Figura 4.24:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena discônica.



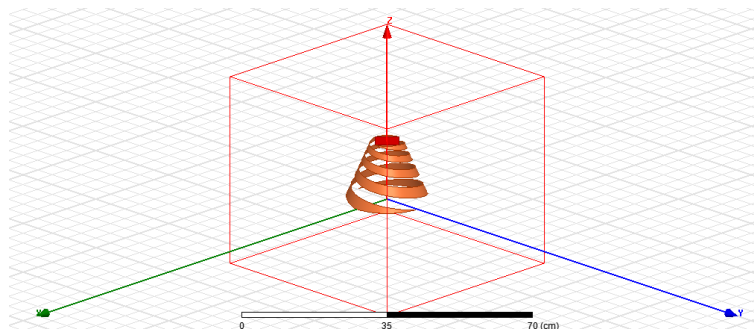
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.24 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente 1,74 dB e uma característica omnidirecional.

#### 4.2.4. Antena cônica log

Por fim, o último modelo de antena simulado foi o cônica log, que tem sua arquitetura baseado em uma antena cônica com linhas logarítmicas. Para a construção do modelo foi utilizado a ferramenta Antena Design Kit disponível no HFSS que pode ser observado na Figura 4.25.

**Figura 4.25:** Modelo computacional da antena cônica log.

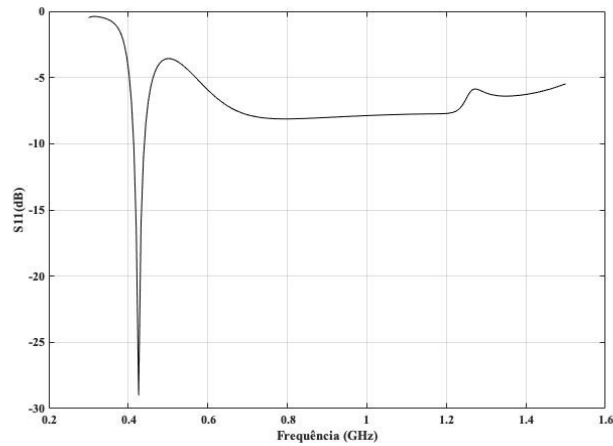


Fonte: Próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4.25 possui um raio de cone de 104,2 mm e de altura L são 150 mm. Dessa forma, para ser possível a inserção via válvula de óleo seria necessária algumas adaptações construtivas.

O resultado da simulação para esse modelo pode ser observado na Figura 4.26, no qual tem-se o gráfico de coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ).

**Figura 4.26:** Coeficiente de reflexão para antena cônica log.

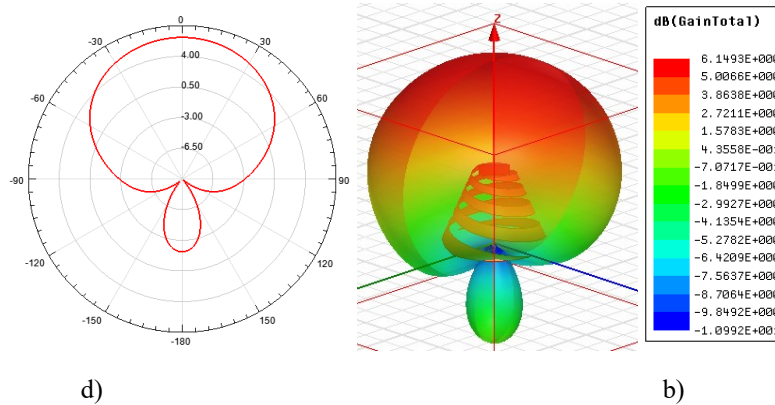


Fonte: Próprio autor.

Observando-se a Figura 4.26 é possível concluir que a antena após as adaptações construtivas para a adequação necessária a antena, o modelo apresentou uma largura de banda que vai de 0,42 até 0,44 GHz, representando 2,22%, com pico de perda de retorno de -28,23 dB na frequência de 0,42 GHz.

O diagrama de irradiação e o ganho da antena para 900 MHz pode ser observado na Figura 4.27.

**Figura 4.27:** a) Diagrama de irradiação, b) Ganho da antena cônica log.



Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Figura 4.27 é possível observar que a antena tem um ganho de aproximadamente 6,15 dB e uma característica direcional.

#### 4.2.5. Comparativo entre as antenas com inserção via válvula de óleo

Após as simulações com os resultados obtidos foi possível construir a Tabela 4.2, na qual será comparada as antenas destinadas a inserção via válvula de óleo nos transformadores de potência.

**Tabela 4.2:** Tabela comparativa entre as antenas simuladas destinadas a inserção via válvula de óleo.

| Modelo da Antena | Largura de Banda         | Padrão de Irradiação | Dimensões Físicas (Raio x Altura em mm) | Ganho (dB) |
|------------------|--------------------------|----------------------|---|------------|
| Monopolo         | Banda larga (12,22%)     | Omnidirecional       | 38 x 98                                 | -2,39      |
| Cônica           | Banda estreita (<10%)    | Omnidirecional       | 30 x 100                                | -2,27      |
| Discônica        | Banda ultra larga (>60%) | Omnidirecional       | 66,7 x 120                              | 1,74       |
| Cônica log       | Banda estreita (2,22%)   | Unidirecional        | 104,2 x 150                             | 6,15       |

Fonte: Próprio autor.

A análise da Tabela 4.2 nos permite observar alguns aspectos interessantes. A antena que possui a maior largura de banda no comparativo é a discônica, com resultado superior a 60%, característica de uma antena com banda ultra larga, ponto importante quando aplicadas a detecção de descargas parciais.

A antena que obteve melhor resultado de ganho foi a antena cônica log, com um valor de 6,15 dB.

Há antenas que possuem dimensões maiores que a entrada da válvula de óleo (modelo DN80), fato esse que gera uma impossibilidade de utilização, são elas, a antena discônica e a cônica log.

A antena monopolo possui uma largura de banda de cerca de 12,22%, sendo caracterizada como uma antena de banda larga, suas dimensões seriam ideias para a aplicação, em razão de seu diâmetro ser inferior a 80 mm.

A antena cônica obteve resultados abaixo do esperado, se considerando que a largura de banda foi estreita. Contudo, em questão de dimensão física a antena estaria apta a inserção via válvula de óleo.



Por fim, conclui-se que a antena melhor indica para a aplicação que se adequaria a entrada da válvula de óleo é a antena monopolo.

### 4.3. Comparativo entre as antenas

Nessa seção serão comparadas as antenas dos dois casos anteriores, para tal foi construída a Tabela 4.3 com os respectivos dados.

**Tabela 4.3:** Tabela comparativa entre as antenas simuladas.

| <b>Modelo da Antena</b>    | <b>Largura de Banda</b>  | <b>Padrão de Irradiação</b> | <b>Dimensões Físicas (Raio x Altura em mm)</b> | <b>Ganho (dB)</b> |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|-------------------|
| <i>U-slot</i>              | Banda larga (22,22%)     | Unidirecional               | 87 x 25  | 9,33              |
| Sonda em L                 | Banda larga (28,89%)     | Unidirecional               | 75 x 35  | 9,61              |
| <i>U-slot</i> e sonda em L | Banda estreita (5,56%)   | Unidirecional               | 80 x 40  | 9,51              |
| Planar elíptica            | Banda estreita (<10%)    | Unidirecional               | 77,3 x 4                                       | -3,25             |
| Planar espiral log         | Banda estreita (<10%)    | Bidirecional                | 100 x 4  | 6,09              |
| Monopolo                   | Banda larga (12,22%)     | Omnidirecional              | 38 x 98  | -2,39             |
| Cônica                     | Banda estreita (<10%)    | Omnidirecional              | 30 x 100                                       | -2,27             |
| Discônica                  | Banda ultra larga (>60%) | Omnidirecional              | 66,7 x 120                                     | 1,74              |
| Cônica log                 | Banda estreita (2,22%)   | Unidirecional               | 104,2 x 150                                    | 6,15              |

Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da Tabela 4.3 é possível constatar que a antena que obteve melhor resultado em termos de ganho foi a Sonda em L, com um valor de 9,61 dB. Já quando se observa a largura de banda das antenas, pode-se destacar três modelos que seriam a *U-slot*, Sonda Em L, Discônica, com o melhor resultado da antena Discônica, com um valor superior a 60% de largura de banda.

Os padrões de irradiação vão depender do modelo construtivo aplicado a antena, é possível constatar que para o caso de planares tem-se padrões no geral unidirecionais. Já para o caso de antenas monopulares a característica é omnidirecional.

Ao se observar as dimensões físicas das antenas é importante destacar alguns aspectos, o primeiro deles é que como as antenas são destinadas a diferentes formas de inserção (via janela dielétrica ou válvula de óleo) a relação raio x altura vai variar muito. Por exemplo, para as antenas destinadas a válvula de óleo é possível constatar que a altura é na maioria dos casos bem superior ao raio. Por outro lado, para as antenas acopladas via janela dielétrica a relação é oposta.

Conclui-se assim que a escolha da antena vai depender do método de inserção que será utilizado. Para o caso do acoplamento via janela dielétrica a antena que obteve melhor resultado entre os comparativos foi a sonda em L, já para o caso via válvula de óleo a antena monopolo seria a melhor escolha.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se um estudo paramétrico e análise comparativa entre antenas aplicadas a detecção de descargas parciais acopladas via janela dielétrica ou válvula de óleo em transformadores de potência.

Foram feitas diversas revisões bibliográficas com o intuito de fundamentar o trabalho e observar o estado da arte referente ao respectivo assunto. Por meio desses, foi possível constatar que para acoplamentos via janela dielétrica costumeiramente era feita a utilização de antenas planares, mais precisamente de microfita. Contudo, essas antenas têm como característica largura de banda estreita, fazendo-se necessário a utilização de algum método de otimização de largura de banda. Já para o caso do acoplamento via válvula de óleo é necessário atentar para as dimensões físicas limitadas pela válvula.

Foram simuladas diversas antenas por meio da utilização do *software* HFSS, para que fosse possível ser feito um comparativo entre os modelos propostos e em seguida fosse possível ser feita a escolha de qual antena seria mais indicada para o respectivo método de acoplamento.

Constatou-se que para o acoplamento via janela dielétrica a antena Sonda em L obteve os melhores resultados, visto que, era a mais compacta, possuía uma largura de banda de 28,89% e um ganho de 9,61 dB.

Para o caso do acoplamento via válvula de óleo a antena mais indicada seria a monopolo, em razão das limitações físicas impostas e dos resultados para essa antena serem satisfatórios, vale ainda citar que seria uma das antenas mais simples para implementação e construção o que agrega valor ao comparativo.

Em geral, a escolha da antena vai depender do método de inserção escolhido, pois as características construtivas de cada antena vão se adaptar as limitações físicas impostas pelo transformador de potência.

Diante disso, sugere-se como atividades para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho das antenas em ambiente laboratório, para verificação da detecção de descargas parciais;
- Avaliar o desempenho dos parâmetros das antenas se na prática correspondem próximos aos valores simulados;
- Avaliar o desempenho de outras antenas para agregar ao comparativo.

## 6. REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. *Antenna Theory - Analysis and Design*. New Jersey, United States of America: John Wiley, 2005.
- BHARDWAJ, S.; SAMII, Y. R. A comparative study of c-shaped, e-shaped, and u-slotted patch antennas. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, v. 54, n. 7, p. 1746–1756, 2012.
- COSTA, E. G. da; NEVES, W. L. A. *Apostila do curso de engenharia elétrica – Descargas Parciais*. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1996.
- CHEN, W. K. (2004). *The electrical engineering handbook*. Elsevier.
- DE OLIVEIRA, Elder EC; MARTINS, Ronaldo A.; D’ASSUNÇÃO, Adaildo G. *Antenas de microfita utilizando a curva de fractal de Minkowski*. 2010.
- DERNERYD, Anders. Analysis of the microstrip disk antenna element. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, vol. 27, no 5, p. 660-664.
- FERREIRA, T. V. *Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- HAMPTON, B. F.; MEATS, R. J. Diagnostic measurements at uhf in gas insulated substations. *IEEE Proceedings, IEEE*, v. 135, n. 2, p. 137 - 144, 1988.
- HUYNH, T.; LEE, K. F. Single-layer single-patch wideband microstrip antenna. *Electronics Letters*, v. 31, n. 16, p. 1310–1312, 1995.
- IEC 60270: High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements. International Electrotechnical Commission, 2000.
- IEEE STANDARDS ASSOCIATION et al. 145-2013-IEEE standard for definitions of terms for antennas. IEEE, New York, NY, 2013.
- JUDD, M.; PRYOR, B.; KELLY, S.; HAMPTON, B. Transformer monitoring using the uhf technique. In: *IET. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*. [S.l.], 1999. v. 5, p. 362–365.
- LUK, K. M. et al. Broadband microstrip patch antenna. *Electronics Letters*, v. 34, p. 1442–1443, 1998.
- MACÊDO, E. C. T. *Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

MORBIDEL, L., BULUS ROSSINI, L. A., & COSTANZO CASO, P. A. (2017). Design of high return loss logarithmic spiral antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(10), 2532-2538.

MULENGA, C. B., & FLINT, J. A. (2009, November). Radiation characteristics of a conical monopole antenna with a partially corrugated ground plane. In *2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference* (pp. 517-520). IEEE.

NATRASS, D. A. Partial discharge measurement and interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, n. 4, p. 10–23, 1988.

NOBREGA, L. A. M. M. Parametrização de HFCT para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2016.

NOBREGA, L. A. M. M. Novo Método para Monitoramento e Localização de Fontes de Descargas Parciais em Transformadores de Potência Utilizando Medições e Simulações UHF. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

NOBREGA, L. A. M. M.; XAVIER, G. V. R.; AQUINO, M. V. D.; SERRES, A. J. R.; ALBUQUERQUE, C. C. R.; COSTA, E. G. Design and development of a bio-inspired UHF sensor for partial discharge detection in power transformers. *Sensors*, v. 19, 2019.

POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. New Jersey: John Wiley, 2012.

ROLDAN, J. L.; TANG, T.; GASKIN, M. Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 15, n. 6, p. 1634–1639, 2008.

RUTGERS, W.; FU, Y. Uhf pd-detection in a power transformer. In: *10th International Symposium on High Voltage Engineering*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 219–222.

SINAGA, HERMAN HALOMOAN. Detection, identification and localization of partial discharges in power transformers using UHF techniques. The University of New South Wales Australia. FhD Thesis, 2012.

TENBOHLEN, S. et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (uhf) range. *IEEE Transactions on Dielectrical and Electrical Insulation*, IEEE, v. 15, n. 6, p. 1544 - 1552, 2008.

TENBOHLEN, S.; HOEK, S. M.; DENISSOV, D.; HUBER, R.; RIECHERT, U.; MARKALOUS, S. M.; STREHL, T.; KLEIN, T. Electromagnetic (UHF) PD diagnosis of GIS, cable accessories and oil-paper insulated power transformers for improved PD detection and localization. *Cigre Session 2006*, 2006.

XAVIER, G. V. R. Desenvolvimento de Antenas de Microfita para Detecção de Descargas Parciais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) | Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2018.

XAVIER, George VR, et al. L-Probe and U-Slot Microstrip Circular Antenna for Application in the Detection of Partial Discharges in Power Transformers. In: 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. IEEE, 2019a. p. 251-252.

XAVIER, George VR, et al. Circular Printed Monopole Antenna with Slotted Ground Plane for Application in the Detection of Partial Discharges in Power Transformers. In: 2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). IEEE, 2019b. p. 1-5.