

Análise de revestimento dielétrico de um sensor UHF de microfita aplicado na detecção de descargas parciais em transformadores de potência

Marcus Vinícius Dantas de Aquino^[1], Alexandre Jean René Serres^[2], Edson Guedes da Costa^[3], George Victor Rocha Xavier^[4], Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega^[5], Vladimir Cesarino de Souza^[6].

[1] marcus.aquino@ee.ufcg.edu.br. [2] alexandreserres@dee.ufcg.edu.br. [3] edson@dee.ufcg.edu.br. UFCG-Campus Central.

[4] george.xavier@ee.ufcg.edu.br. UFCG/DEE. [5] luizaugusto.nobrega@gmail.com. UFCG-Campus Central.

[6] cesarino@chesf.gov.br. CHESF.

RESUMO

O uso de sensores UHF em equipamentos elétricos de alta tensão para monitoramento de seu sistema de isolamento é largamente empregado. Com o intuito de melhorar a eficácia desses sensores, é apresentada, neste trabalho, uma análise sobre diferentes tipos de materiais dielétricos que podem ser utilizados como revestimento físico protetor e para aprimoramento das características eletromagnéticas de sensores UHF de microfita aplicados à detecção de descargas parciais em transformadores de potência. Os materiais usados como revestimento foram vidro, silicone, FR4, teflon e acrílico. Para tanto, simulações no software HFSS para o desenvolvimento das análises em duas antenas UHF de microfita foram realizadas. A partir das análises feitas, verificou-se o aprimoramento do coeficiente de reflexão e do ganho do sensor UHF, indicando que os materiais avaliados demonstraram ter aplicabilidade prática. Ademais, simulações de uma típica blindagem eletromagnética aplicada em conjunto com o sensor também foram desenvolvidas, demonstrando que a concepção da blindagem ainda nas etapas de projeto é de grande relevância. Para fundamentar os dados obtidos a partir das simulações, modelos reais dos sensores UHF avaliados foram construídos e submetidos a experimentos em laboratório.

Palavras-chave: Antenas de microfita. Descargas parciais. Sensor UHF. Transformadores de potência.

ABSTRACT

The use of UHF sensors in high voltage electrical equipment for monitoring its insulation system is widely used. In order to improve these sensors, we present an analysis of different types of dielectric materials that can be used as physical coating and shield, which can enhance the electromagnetic characteristics of UHF microstrip sensors applied to the detection of partial discharges in performance transformers. The materials used as coating were glass, silicone, FR4, Teflon, and acrylic. In order to do so, HFSS software simulations for the development of analyzes on two UHF microstrip antennas were performed. From the analyzes performed, it was verified the improvement of the reflection coefficient and the gain of the UHF sensor recorded the materials used to demonstrate the practical application. In addition to that, we also had simulations of a typical electromagnetic shield applied in conjunction with the sensor to demonstrate that the shield is still displayed in the design stages and is of great relevance. In order to underpin the data obtained from the simulations, the real models of UHF sensors were applied and tested in the laboratory.

Keywords: Microstrip Antennas. Partial Discharges. UHF Sensor. Power Transformers.

1 Introdução

O sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão é essencial para a garantia do correto funcionamento do sistema elétrico, assegurando-lhe confiabilidade e segurança. Portanto, a aplicação de técnicas de monitoramento das condições operacionais dos materiais isolantes desses equipamentos é uma ferramenta indispensável para as concessionárias de energia. Uma das principais técnicas de monitoramento aplicadas para esse propósito é o acompanhamento da atividade de descargas parciais (DP), cuja eficiência foi demonstrada ao longo de vários anos de estudos e pesquisas (XUE; YANG, 2018).

Devido às inconformidades no meio isolante do equipamento, surgem regiões com campos elétricos intensos, potencializando a ruptura da rigidez dielétrica do meio. Essa condição leva ao surgimento de descargas parciais (DP), que são definidas como descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente o meio isolante. (NATTRASS, 1988).

Os transformadores de potência são um dos componentes mais caros e essenciais do sistema elétrico. Esses equipamentos estão sujeitos a contínuos esforços elétricos, térmicos e mecânicos que resultam no surgimento de DP ao longo de sua operação. A atuação contínua das DP tende a degradar o seu sistema de isolamento constituído, basicamente, por óleo mineral e papel isolante, podendo resultar no rompimento de sua rigidez dielétrica e na conseqüente falha do transformador. Logo, dispondo-se de um monitoramento das DP, é possível acompanhar o estágio de degradação do sistema isolante, diminuindo os gastos provenientes de possíveis falhas, por meio de um método de manutenção preditiva mais assertivo, otimizando o processo de gestão de ativos das concessionárias de energia.

Os procedimentos para a realização de medições de DP em equipamentos elétricos de alta tensão são definidos de acordo com a norma IEC 60270 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2000). No entanto, os procedimentos definidos nessa norma apresentam algumas desvantagens práticas, tais como elevada invasividade e baixa imunidade a ruídos, o que a torna não apropriada para aplicações em campo (em subestações, por exemplo), restringindo seu uso majoritariamente a testes laboratoriais. Devido a esses obstáculos, pesquisadores buscaram o desenvolvimento de técnicas alternativas para a detecção de DP, baseadas em princípios de propagação de ondas acústicas

e eletromagnéticas e também na análise de gases dissolvidos em óleo (METWALLY, 2004; STONE, 2005).

Durante os estudos realizados no trabalho de Judd, Yang e Hunter (2005b), verificou-se que, entre esses métodos, o eletromagnético se mostrou o mais eficiente na detecção, localização e classificação das DP em relação aos demais e ao próprio método convencional IEC 60270 (STONE, 2005).

O método eletromagnético se fundamenta na detecção das ondas eletromagnéticas emitidas durante a ocorrência de DP, cujo espectro de frequência está situado na faixa de Ultra Alta Frequência (do inglês, *Ultra High Frequency*, UHF), correspondente ao intervalo de frequência de 300 a 3000 MHz (RUTGERS; FU, 1997).

A aplicação do método eletromagnético ou UHF em transformadores de potência, comumente, consiste em alocar sensores UHF no tanque do transformador de modo que eles possam captar os sinais eletromagnéticos irradiados pelos pulsos de DP, permitindo detectar, localizar e classificar a ação das DP a partir de técnicas de processamento de sinais (XAVIER *et al.*, 2018; NOBREGA *et al.*, 2019b). Entre as vantagens desse método, estão a baixa invasividade, a eliminação de conexões elétricas, a alta imunidade a ruídos e sensores compactos (JUDD *et al.*, 2001).

Diante da eficiência prática verificada para a aplicação do método UHF, o Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRÉ) recomenda, em uma de suas brochuras técnicas (CIGRÉ, 2008), que os novos lotes de transformadores já apresentem em seus projetos a inserção de janelas dielétricas no tanque do equipamento, ou que estejam presentes válvulas DN50 com dimensões adequadas para a alocação de sensores UHF.

Entre os tipos de sensores UHF que podem ser aplicados no método, os sensores de microfita se destacam devido a características práticas atrativas, tais como baixo custo de confecção, boa adequabilidade ao tanque do transformador, pequena área e volume e fácil confecção (SINAGA, PHUNG, BLACKBURN, 2009; CHAI, PHUNG, ZHANG, 2018). Porém, as antenas de microfita apresentam uma largura de banda estreita e baixo ganho, tornando-se necessário uso de técnicas de otimização do plano de terra para que se possa adquirir uma resposta mais adequada à aplicação na detecção de DP (HARAZ; SEBAK, 2013). Desse modo, diferentes topologias de antenas de microfita foram desenvolvidas ao longo dos anos para a detecção de DP (HWANG *et al.*, 2011; SARKAR *et al.*, 2014; CRUZ *et al.*, 2019).

Conforme citado anteriormente, transformadores são submetidos a contínuos esforços termomecânicos, tornando necessário que os sensores instalados em seus tanques tenham elevada suportabilidade a estes tipos de intempéries. Logo, faz-se necessária a investigação a respeito da aplicação de materiais dielétricos como estruturas protetoras para as antenas de microfita utilizadas como sensores UHF, visto que a pesquisa sobre esse tipo de material aplicado para encapsulamento de antenas de microfita é pouco explorada na literatura. O estudo dessas estruturas e de como elas afetam a resposta do sensor em termos, principalmente, de coeficiente de reflexão (S_{11}) e ganho é útil para compreender como cada parte influencia as características eletromagnéticas do sensor, possibilitando a fabricação de sensores com melhores características e com maior vida útil.

Estudos já foram desenvolvidos utilizando a resina epóxi como revestimento (AQUINO *et al.*, 2019b; NOBREGA *et al.*, 2019a), porém é relevante discutir quais outros tipos de materiais podem ser utilizados. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é analisar o uso de cinco tipos de materiais dielétricos e como eles influenciam no desempenho da antena em termos do S_{11} e de ganho do sensor. Ademais, com o objetivo de melhor adequar a alocação dos sensores em janelas dielétricas, o estudo da modificação do formato geométrico do sensor e o efeito de blindagem eletromagnética também foram estudados. Por último, em caráter de continuidade de um trabalho prévio (AQUINO *et al.*, 2019a), experimentos práticos em laboratório foram realizados com o modelo real da antena desenvolvida, avaliando o efeito do material dielétrico e da blindagem eletromagnética.

O presente artigo está estruturado em cinco seções. Na seção 1, tem-se a introdução relativa ao tema do aqui proposto. Na seção 2, o referencial teórico utilizado é apresentado, incluindo a teoria sobre antenas de microfita, blindagem eletromagnética e materiais dielétricos. Na seção 3, é exposta a metodologia aplicada, incluindo informações sobre o *software* utilizado, detalhes do ambiente computacional e, por último, o procedimento experimental seguido. Na seção 4, são apresentados todos os resultados obtidos com a pesquisa, explorando, inicialmente, os resultados das simulações e, em seguida, os resultados experimentais. Na seção 5, as conclusões que foram obtidas a partir das análises realizadas na seção 4 são apresentadas.

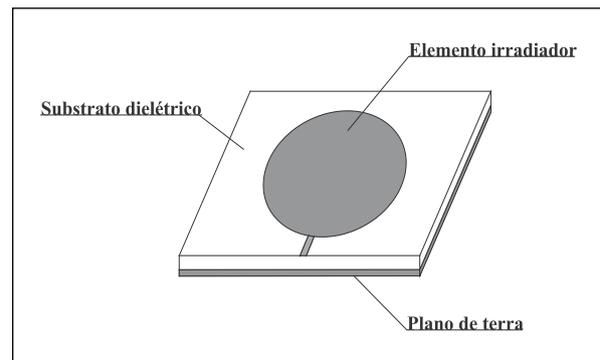
2 Referencial teórico

Nesta seção, é apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho desenvolvido, fornecendo informações a respeito de antenas de microfita, blindagem eletromagnética e materiais dielétricos.

2.1 Antenas de microfita

A estrutura geral de uma antena de microfita consiste no uso de duas placas paralelas, denominadas de elemento irradiador e plano de terra, que são fixadas em torno de um material (substrato) dielétrico, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo de antena de microfita



Fonte: Elaboração própria

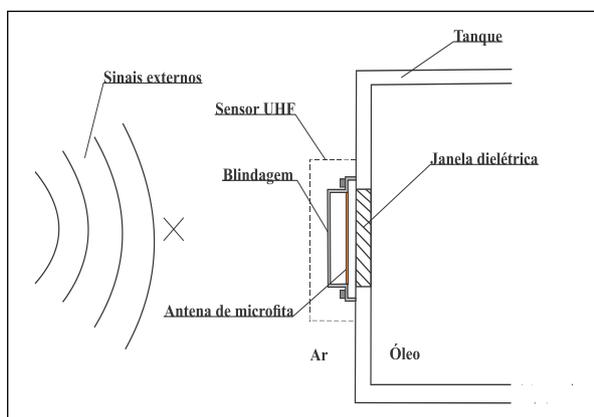
Todas as dimensões físicas como a altura do substrato, constante dielétrica, largura e comprimento, formatos geométricos do elemento irradiador e plano de terra, entre outras, são definidas de acordo com a faixa de frequência de operação da aplicação desejada, por meio do equacionamento matemático apresentado em Balanis (2005) e Xavier *et al.* (2018).

2.2 2.2 Blindagem eletromagnética

Os transformadores fazem parte dos equipamentos que compõem as subestações de energia elétrica, locais em que há intensa atividade de irradiação eletromagnética, proveniente de chaveamento de circuitos de eletrônica de potência, descargas corona, manobras de chaves seccionadoras, disjuntores, entre outros. Diante desse cenário, os sensores UHF instalados no tanque do transformador via janela dielétrica precisam dispor de uma blindagem eletromagnética que impossibilite a captação de sinais externos, permitindo ao sensor UHF captar

somente os sinais de DP internos ao equipamento. Na Figura 2 é ilustrado um desenho esquemático do modo de instalação de sensores UHF no tanque de transformadores.

Figura 2 – Funcionamento da blindagem eletromagnética



Fonte: Elaboração própria

As janelas dielétricas são constituídas de politetrafluoretileno (PTFE) (JUDD; YANG; HUNTER, 2005a) ou de vários tipos de resina epóxi (JUDD, 2011). As dimensões dessas janelas variam a depender do equipamento de alta tensão no qual estão aplicadas, tais como Subestações Isoladas a Gás (do inglês, *Gas Insulated Substations*, GIS) (JUDD *et al.*, 2001) e transformadores de potência (NOBREGA *et al.*, 2019a). No entanto, a brochura técnica do CIGRÉ (CIGRÉ, 2008) define que as janelas dielétricas aplicadas para o monitoramento UHF de DP devem possuir diâmetro mínimo de 12 cm, visto que as ondas eletromagnéticas provenientes das DP se propagam sem distorções significativas a partir de janelas com esse valor de diâmetro. Logo, com o objetivo de preservar as características de propagação das DP e de evitar grandes impactos estruturais nos tanques dos transformadores de potência, busca-se a aplicação de sensores com tamanho reduzido.

Por fim, a blindagem do sensor UHF complementa a blindagem oferecida pelo tanque do transformador, de modo a impedir interferências eletromagnéticas externas.

2.3 Materiais dielétricos

O emprego de dielétricos nos sistemas e equipamentos elétricos em geral é de grande importância. Fundamentalmente, seu uso tem por

objetivo isolar componentes e garantir sustentação mecânica das peças envolvidas, entre outras aplicações.

A utilização desses materiais no desenvolvimento de um sensor UHF se dá pela existência de partes da antena que sofrem desgastes ao longo do tempo, sejam eles por oxidação, vibrações, umidade, choques mecânicos ou calor. Além disso, a ligação entre o conector coaxial e a linha de alimentação da antena representa um dos pontos estruturais mais frágeis, necessitando, assim, de uma proteção termomecânica.

Neste trabalho, os materiais dielétricos analisados foram o acrílico, o vidro, o silicone, o FR4 e o teflon.

3 Método da pesquisa

A metodologia empregada é discutida nesta seção e está dividida em duas subseções. A primeira subseção é referente aos procedimentos computacionais aplicados, na qual são abordados os detalhes das simulações feitas. A segunda subseção trata sobre os procedimentos experimentais efetuados, com a exposição do detalhamento de cada teste experimental realizado.

3.1 Procedimento computacional

Para o estudo realizado neste trabalho, foi utilizado o software *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), da *ANSYS Electronics Desktop*.

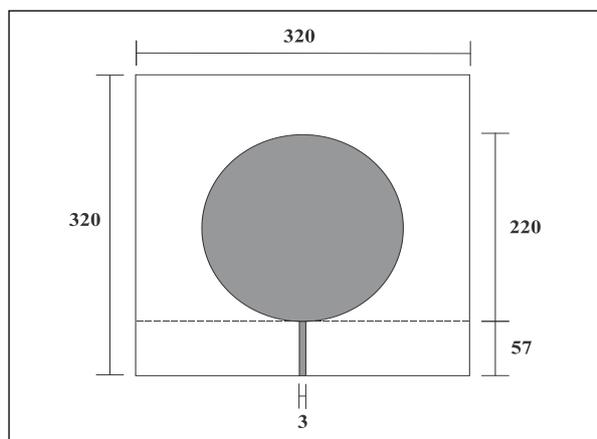
A antena usada foi objeto de estudo com resina epóxi produzido por Aquino *et al.* (2019b), e suas características dimensionais e aplicação de técnicas de otimização de plano de terra foram desenvolvidas em Xavier *et al.* (2018). A antena projetada possui dimensões de 320x320x1,7 mm, com elemento irradiador circular de 220 mm de diâmetro e um plano de terra truncado retangular com dimensões de 320x57 mm. O modelo final é apresentado na Figura 3 (na página seguinte).

As simulações para o revestimento dielétrico foram realizadas com cinco tipos de materiais com constantes dielétricas distintas. A espessura dos materiais foi fixada em 5 mm, mantendo a antena no ponto central do revestimento. Para cada material, foram adquiridos dados de S_{11} e de ganho.

A lista dos materiais dielétricos e suas respectivas constantes dielétricas (ϵ_r) e tangente de perdas (tg (d)) é apresentada na Tabela 1, conforme os valores fornecidos pela biblioteca do HFSS. O modelo desenvolvido sem revestimento dielétrico é ilustrado

na Figura 4a, com o elemento irradiador representado na cor amarela, o substrato em azul e o plano de terra truncado em verde. O material dielétrico, que reveste a antena, é representado pela cor laranja na Figura 4b.

Figura 3 – Vista superior da antena com dimensões em mm



Fonte: Elaboração própria

Tabela 1 – Materiais utilizados com respectivas constantes dielétricas e tangente de perdas

Material	ϵ_r	tg (d)
Teflon	2,1	0,001
Acrílico	3,4	0,001
FR4 epoxi	4,4	0,020
Vidro	5,5	0,000
Silicone	11,9	0,000

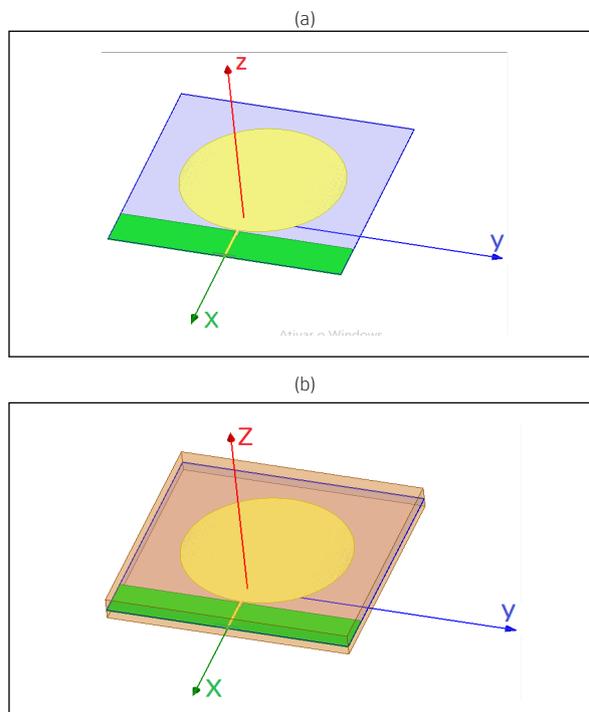
Fonte: Elaboração própria

A existência de janelas dielétricas circulares leva ao interesse da obtenção de antenas ou sensores que se adequem melhor a essa configuração. Para esse estudo do formato geométrico da antena, um procedimento de arredondamento da estrutura foi realizado, avaliando novamente os impactos no desempenho em termos de S_{11} e ganho. Na Figura 5, são apresentados os modelos para a antena antes e após o arredondamento. Após o arredondamento, a antena passou a ter um raio de 160 mm.

Após a determinação do melhor revestimento dielétrico a partir da primeira etapa descrita, o material escolhido foi aplicado na antena circular com espessura

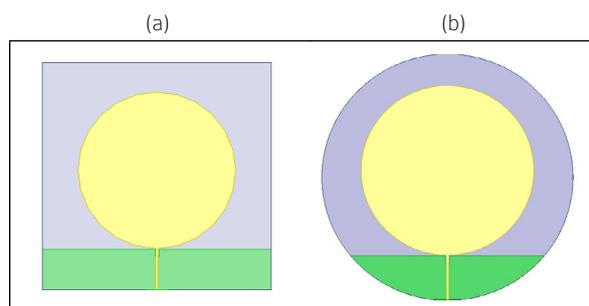
também de 5 mm, para verificar quais seriam os efeitos que a mudança no formato do revestimento resultaria.

Figura 4 – (a) Antena sem revestimento dielétrico; (b) Antena com revestimento dielétrico



Fonte: Elaboração própria

Figura 5 – (a) Antena com substrato quadrado; (b) Antena com substrato circular

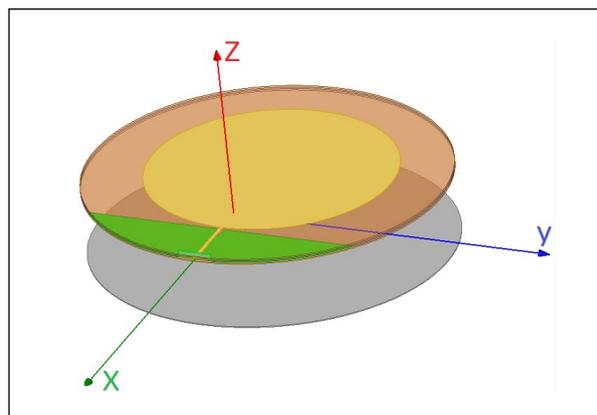


Fonte: Elaboração própria

Foi realizado, além disso, um estudo do efeito de uma blindagem eletromagnética nas proximidades da antena, conforme ilustrado na Figura 6. O processo consistiu em variar a distância entre uma placa metálica circular, de dimensão similar a da antena circular, e o material dielétrico, considerando o ar como meio dielétrico entre a placa metálica e a antena. Medições

de 20 mm até 120 mm foram realizadas, com intervalo de 20 mm, adquirindo os dados a cada intervalo.

Figura 6 – Modelo para estudo de blindagem

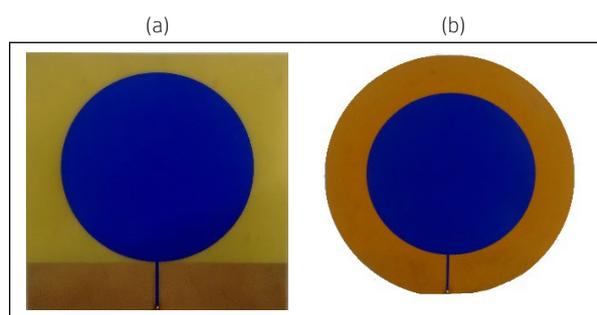


Fonte: Elaboração própria

3.2 Procedimento experimental

Com o intuito de comparar os dados obtidos via simulações com medições laboratoriais, modelos reais da antena estudada foram confeccionados, tanto em formato com substrato quadrado quanto em formato circular. O material utilizado como substrato na fabricação das antenas foi uma placa de fenolite com $\epsilon_r = 4,4$, espessura 1,6 mm e $tg(d) = 0,02$. O resultado final do processo é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – (a) Antena com substrato quadrado; (b) Antena com substrato circular



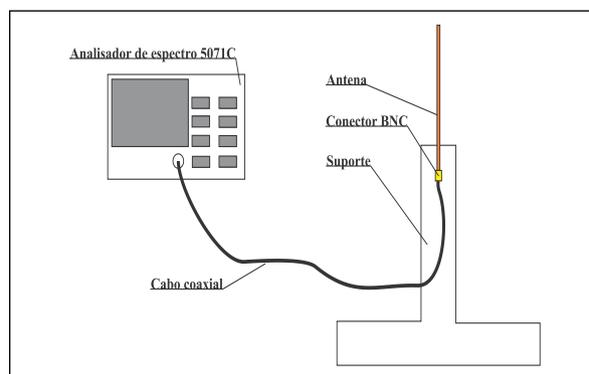
Fonte: Elaboração própria

De posse das antenas, foram realizados experimentos conduzidos em laboratório para obter o valor do S_{11} das antenas. Para as medições, utilizou-se o analisador de espectro vetorial E5071C (9 MHz – 8,5 GHz) da *Keysight Technologies* e um cabo coaxial de comprimento de 5 m, devidamente calibrado antes de se iniciarem os cálculos.

Para implementar o revestimento dielétrico, duas placas do material dielétrico que apresentou

melhor resposta foram utilizadas, tendo cada uma delas espessura de 2 mm. Assim, o conjunto antena e placas do material dielétrico tem 5,7 mm de espessura, próximo aos 5 mm utilizados na simulação. O arranjo para realizar essas medições é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Arranjo para medição de S_{11}



Fonte: Elaboração própria

Na segunda parte do experimento, o efeito de blindagem foi verificado de maneira semelhante ao que foi modelado em simulação. Para isso, foram utilizadas uma placa metálica quadrada de dimensões próximas as da antena e a antena UHF com substrato circular com revestimento. O método, assim como na simulação, consistiu em variar a distância da placa metálica em relação ao plano de terra da antena de 20 a 120 mm, ao passo de 20 mm, coletando a leitura do S_{11} . O equipamento utilizado para realizar essas medições foi o analisador de espectro E5071C (9 MHz – 8,5 GHz) da *Keysight Technologies*.

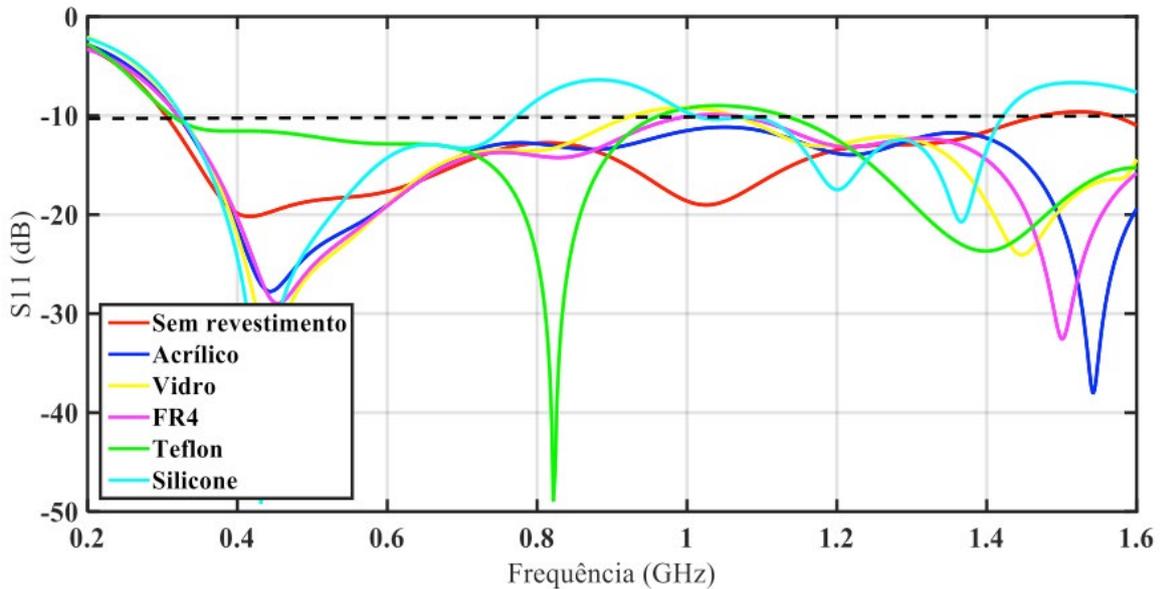
4 Resultados da pesquisa

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos tanto por meio das simulações como dos experimentos. Primeiro são expostos e discutidos os resultados das simulações e, em seguida, os experimentais, seguidos de alguns comentários gerais.

4.1 Resultados das simulações

Na Figura 9 (página seguinte) são apresentados os resultados de S_{11} simulados para os materiais listados na Tabela 1 e aplicados como revestimento dielétrico.

Figura 9 – Resposta em S_{11} para diferentes materiais na antena



Fonte: Elaboração própria

A partir da Figura 9, observa-se que a antena sem revestimento (curva em vermelho) está com ampla largura de banda (faixa abaixo de -10 dB), de 305 a 1474 MHz, representando cerca de 97% do espectro de principal ocorrência de DP, definido na literatura como a faixa de 300 a 1500 MHz (RUTGERS; FU, 1997). Desse modo, o modelo de antena sem revestimento já apresenta capacidade para aplicação no uso em detecção de DP, pois conta com largura de banda adequada ao uso.

Os materiais analisados também apresentaram boa resposta. Entre eles, apenas o silicone chegou a prejudicar a largura de banda inicial, resultando em valores maiores que -10 dB na faixa de 773 a 1000 MHz (24,3% do modelo inicial) e no intervalo de 1442 a 1600 MHz. Quanto aos demais materiais, o vidro, o acrílico e o FR4 não chegaram a apresentar valores acima da faixa de -10 dB, demonstrando, inclusive, um aumento na largura de banda da antena para acima da faixa de principal atividade de DP (1500 MHz). Para o teflon, ainda que a frequência superior tenha sido deslocada para acima de 1500 MHz, os valores de coeficiente de reflexão ultrapassaram o limite de -10 dB para uma considerável faixa de frequência (962 a 1130 MHz), reduzindo a banda operacional em 14,4% em relação ao modelo inicial.

Na Tabela 2 é apresentado o ganho médio obtido para cada tipo de material utilizado, na faixa de 300 a 1500 MHz, coletando os dados ao passo de 100 MHz.

Tabela 2 – Ganho médio da antena com materiais dielétricos aplicados como revestimento

Material	Ganho (dB)
Teflon	3,23
Acrílico	4,28
FR4 epoxi	3,56
Vidro	3,88
Silicone	4,18

Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 2, foi verificado que os ganhos obtidos para todos os materiais empregados como revestimento foram superiores ao valor do modelo inicial (3,22 dB) e, conseqüentemente, maior que 2 dB, valor recomendado na literatura para a detecção de DP (LUO *et al.*, 2016).

Correlacionando a Figura 9 e a Tabela 2, pode-se constatar que todos os materiais possuem potencial para serem empregados como proteção termomecânica. Entre eles, apenas o silicone prejudicou de forma mais significativa a largura de banda, apesar de resultar em um ganho de 4,18 dB. Entretanto, indagações quanto à facilidade em adquirir esses materiais, seus custos, bem como a conveniência em se trabalhar com eles devem ser levadas em consideração para, assim, garantir um sensor UHF não apenas com requisitos técnicos adequados à detecção de DP, mas também que tenha viabilidade prática e econômica.

Para este trabalho, o material dielétrico que melhor atendeu às questões práticas e econômicas citadas foi o acrílico. Isso porque esse material apresentou um ganho de 4,28 dB, o maior entre os obtidos, e não interferiu significativamente no S_{11} . O acrílico também apresenta um custo razoável e é amplamente utilizado no mercado para aplicações similares.

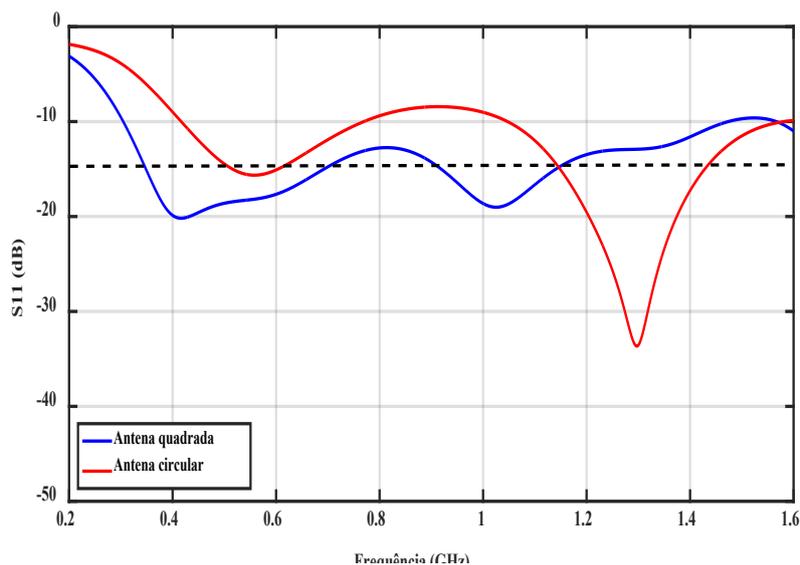
Para o arredondamento da antena, os resultados em termos de S_{11} são apresentados na Figura 10.

A partir da Figura 10, tem-se que o arredondamento da antena deslocou a frequência inferior de operação de 300 MHz para 420 MHz. Ademais, constatou-se o surgimento de uma faixa

estreita acima da linha de -10 dB (770 MHz a 1050 MHz), resultando na redução da largura de banda em 33%. Porém, para a aplicação em formato circular, pequenos ajustes estruturais podem ser realizados na antena de modo a melhor qualificá-la ao uso em detecção de DP. Logo, a técnica de arredondamento da antena desse modelo apresentou ser pertinente, uma vez que mantém boa parte da característica do S_{11} do modelo de referência.

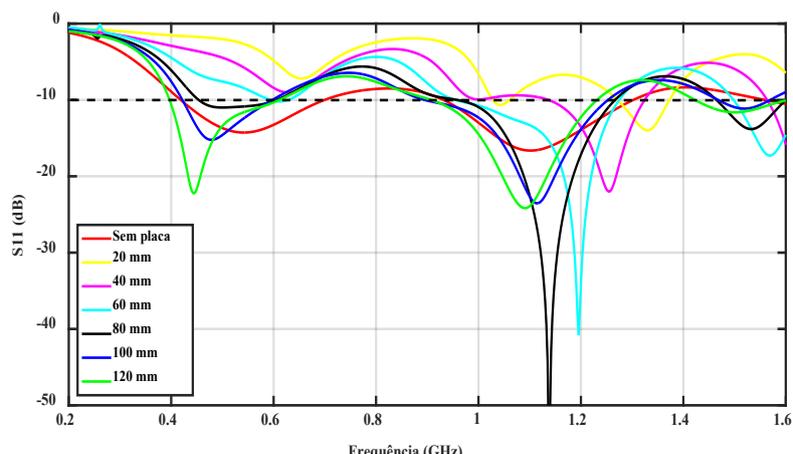
Ademais, a aplicação da camada de acrílico na antena circular bem como o efeito de blindagem para a antena no formato circular são apresentados na Figura 11.

Figura 10 – Alteração do S_{11} para os diferentes formatos da antena



Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – Resposta em S_{11} para a variação da distância entre a placa metálica e a antena circular com camada de 5 mm aplicada



Fonte: Elaboração própria

Por meio da Figura 11, nota-se que a presença de uma estrutura metálica próxima à antena distorce, consideravelmente, a resposta obtida para o modelo sem placa com antena e acrílico arredondados. O emprego do acrílico resultou em mudanças pouco significativas, mantendo aspectos similares.

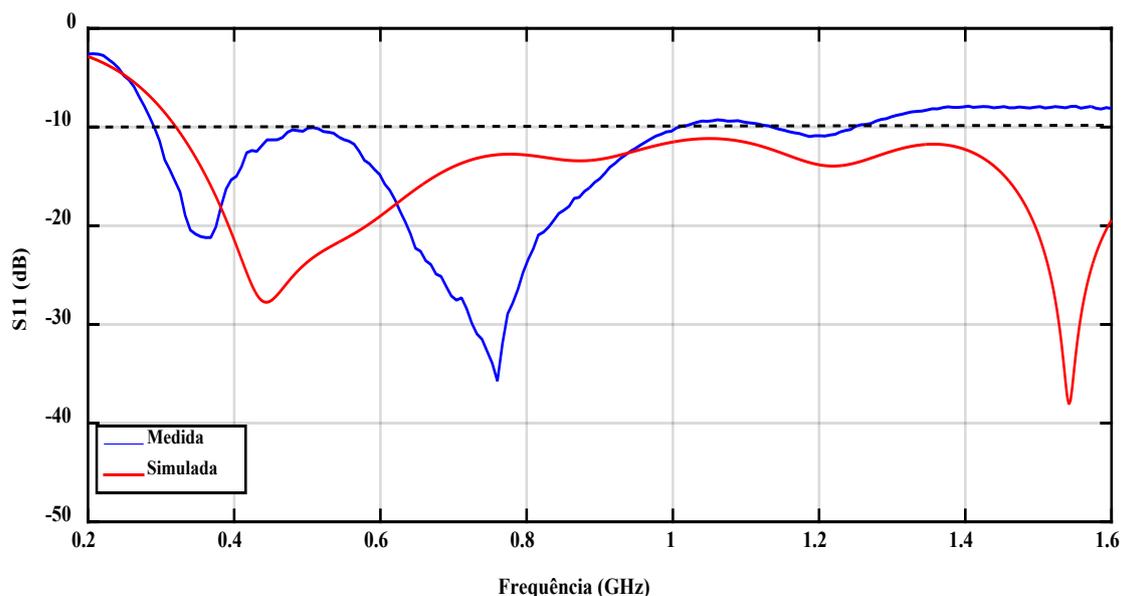
As curvas seguem as características da curva sem placa, no entanto com redução significativa da largura de banda. Tendências de subidas e descidas são verificadas ao longo da faixa de frequência considerada, com deslocamentos à direita quando a distância entre a placa e a antena diminui e deslocamento ao ponto inicial (402 MHz) à medida que a distância aumenta.

Para a distância mínima de 20 mm, observam-se pequenos intervalos abaixo dos -10 dB. A partir de 40 mm, tem-se a presença de intervalos na faixa de 1000 a 1265 MHz abaixo dos -10 dB. A partir de 60 mm (curva em azul claro), verifica-se que todas as curvas ficam abaixo de -5 dB, o que representa uma taxa de transmissão de mais de 70% do sinal captado, tornando-se um resultado satisfatório.

4.2 Resultados experimentais

Por fim, são apresentados os resultados experimentais obtidos. Na Figura 12, é apresentada a resposta obtida para a antena quadrada com acrílico, com os resultados simulados e experimentais.

Figura 12 – Resposta em S_{11} da antena quadrada com revestimento de acrílico



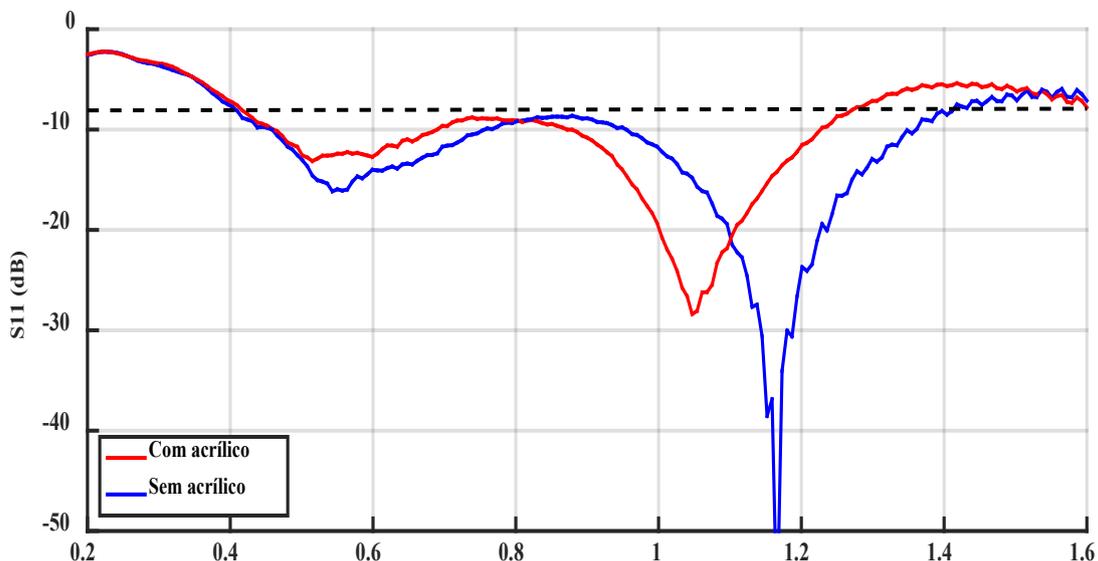
Fonte: Elaboração própria

Analisando a curva em azul da Figura 12, observa-se que a antena quadrada com acrílico tem largura de banda começando de 291 a 1000 MHz, representando aproximadamente 58,33% da largura de banda desejada. Observa-se, ainda, que foram obtidos resultados não tão satisfatórios; essa disparidade pode ter sido provocada, principalmente, por imprecisões no momento de confecção da antena e de corte da chapa

de acrílico, por interferências externas no momento de medição e pela desconsideração das perdas durante a simulação.

O resultado obtido nas medições com a antena em formato circular, com e sem revestimento de acrílico, é ilustrado na Figura 13. Na Figura 14 é apresentada uma fotografia da antena circular em conjunto com o revestimento de acrílico aplicado.

Figura 13 – Resposta em S_{11} da antena circular com e sem revestimento de acrílico



Fonte: Elaboração própria

Com base na Figura 13, percebem-se resultados com tendências similares aos simulados. Analisando a curva em azul, correspondente à antena circular sem acrílico, verifica-se um máximo negativo em 1167 MHz, tal qual ocorreu em simulação (Figura 10), porém com um pequeno deslocamento para uma frequência com valor mais elevado (1298 MHz). Além disso, a faixa abaixo de -10 dB se inicia em 460 MHz, semelhante ao simulado, que iniciou em 420 MHz. Por último, constata-se que uma parcela da curva fica acima de -10 dB, de 753 a 956 MHz, assim como na simulação, na qual essa mesma tendência é verificada para a faixa de 770 a 1050 MHz.

Comparando as curvas em vermelho das Figuras 11 e 13, as mesmas análises podem ser realizadas, mostrando conformidade e consistência dos resultados.

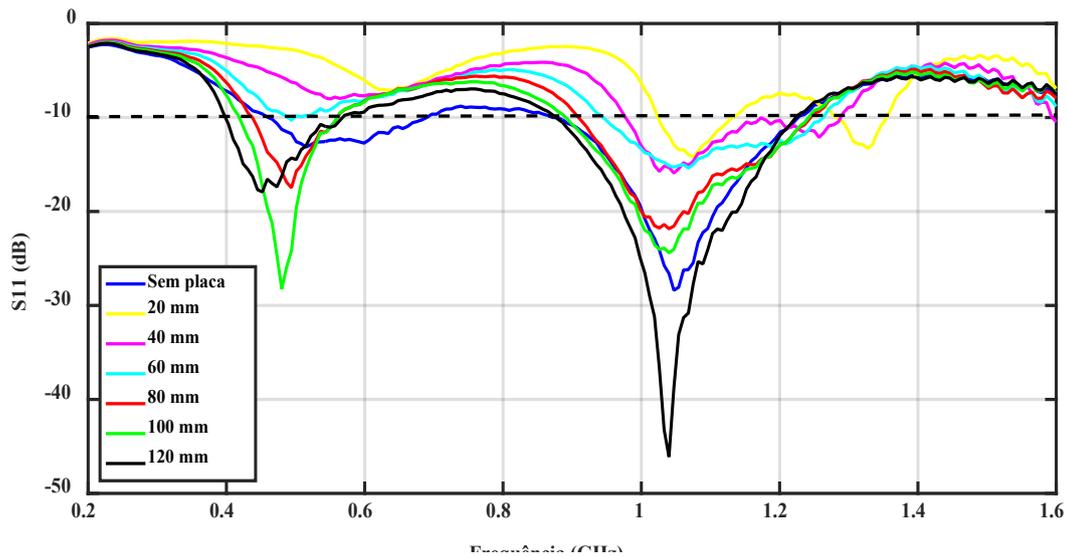
Por fim, são apresentados os resultados do experimento de blindagem na Figura 15 (página seguinte).

Figura 14 – Antena circular com acrílico



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Resposta em S_{11} para a variação da distância entre a placa metálica e a antena circular com revestimento de acrílico



Fonte: Elaboração própria

Verificando as Figuras 11 e 15, nota-se que ambos os resultados mostram comportamentos similares, embora haja algumas disparidades. Na Figura 16, verifica-se que, com a distância de 20 mm – curva em amarelo –, há um deslocamento da curva para a direita e quando ampliamos a distância entre a placa metálica e a antena, a distorção causada no S_{11} tende a diminuir e assumir o resultado original – curva em azul –, de acordo com o previsto pelas simulações.

Embora a distância de 120 mm tenha tido o resultado mais satisfatório, do ponto de vista construtivo, sensores com essa ou maiores distâncias podem vir a tornar trabalhosos para confecção e aumentar o gasto com material metálico, sendo necessário ter uma perspectiva conjunta de resultados técnicos desejados e viabilidade construtiva e econômica. Ademais, adotando um critério de -5 dB, correspondente a mais de 70% de transmissão de potência do sinal, vemos que as distâncias de 80 a 100 mm podem ser consideradas como satisfatórias.

5 Conclusões

Diante das simulações e experimentos realizados e apresentados, constata-se que, entre os materiais empregados, o acrílico, o vidro e o FR4 demonstraram as melhores respostas tanto em coeficiente de reflexão quanto em ganho, mantendo por completo

a largura de banda, com ganho médio superior a 3 dB, e melhorando o coeficiente de reflexão da antena. Além disso, estes materiais são de aplicação prática viável, tanto economicamente quanto tecnicamente. No entanto, o uso do acrílico demonstrou melhor adequação ao sensor UHF utilizado como referência, resultando em um ganho de 4,28 dB, com menor impacto na largura de banda da antena de referência quando comparado aos demais materiais avaliados. Além disso, o acrílico apresenta propriedades que proporcionam aplicabilidade na proteção termodinâmica de sensores UHF utilizados para a detecção de DP em transformadores de potência via janelas dielétricas.

O procedimento de arredondamento do sensor resultou em poucas mudanças negativas, mantendo, ainda, aproximadamente 67% da largura de banda inicial. Trata-se, portanto, de uma técnica com potencial a ser explorado, que qualifica o uso de sensores de microfita circulares para a aplicação em janelas dielétricas com o objetivo de detectar a atividade interna de DP em transformadores de potência.

Ademais, com base nos resultados simulados e experimentais, verificou-se que a blindagem eletromagnética causa efeitos negativos na resposta do sensor, mesmo com o diferente formato do sensor e da camada dielétrica. Distâncias de 60 a 120 mm ainda garantem mais de 70% de transmissão da potência

do sinal captado, apesar da redução considerável da largura de banda.

Como possíveis trabalhos futuros, é interessante realizar experimentos laboratoriais para determinar o ganho das antenas com os diferentes tipos de materiais dielétricos. Também poderiam ser realizados ensaios com as antenas, verificando o comportamento delas frente à captação de sinais reais provenientes de descargas parciais geradas em laboratório.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, M. V. D. *et al.* Avaliação da inserção de camadas dielétricas no desempenho de sensor UHF de microfita aplicado a detecção de descargas parciais. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED DIELECTRICS AND APPLICATIONS (IWADA)*, 3., 2019, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: [s. n.], 2019a.
- AQUINO, M. V. *et al.* Influência de estruturas mecânicas no projeto de um sensor UHF para detecção de descargas parciais em transformadores de potência. *In: ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO do CIGRÉ (ERIAAC)*, 17., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2019b. Disponível em: <http://www.xviiiieriac.com.br/index.php?pagina=na/trabalhos&dir=Trabalhos%20Tecnicos/D1/>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2005.
- CHAI, H.; PHUNG, B. T.; ZHANG, D. Development of UHF sensors for partial discharge detection in power transformer. *In: Condition Monitoring and Diagnosis*, 2018, Perth. **Proceedings [...]** Perth: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535779. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8535779>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- CIGRÉ. **Recommendations for condition monitoring and condition assessment facilities for transformers**. Working Group A2.27. [S. l.]: CIGRÉ, 2008. Disponível em: <https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Tech.%20Brochure/343%20Recommendations%20for%20condition%20monitoring%20condition%20assessment%20facilities%20or%20Trafo.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- CRUZ, J. N. *et al.* Bio-inspired printed Monopole antenna applied to partial discharge detection. **Sensors (Basel)**, v. 19, n. 3, 628, p. 1-15, 2019. DOI: 10.3390/s19030628. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/628>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- HARAZ, O.; SEBAK, A.-R. UWB antennas for wireless applications. *In: KISHK, A. (ed.). Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*. [S. l.]: InTech, 2013. p. 125-152. DOI: 10.5772/3385. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272150882_UWB_Antennas_for_Wireless_Applications. Acesso em: 8 dez. 2019.
- HWANG, K. R. *et al.* Development of UHF sensor for partial discharge diagnosis of power transformer. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING (ISH)*, 17., 2011, Berlin. **Proceedings [...]**. Berlin: VDE-Verlag, 2011. Disponível em: http://viabs.iitkgp.ac.in/vhvlab/html/pages/CD/topics_a-h/D-051-HWA-F.pdf. Acesso em: 8 dez. 2019.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60270: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements**. Genebra: IEC, 2000.
- JUDD, M. D. Locating discharges in power transformers. *In: EURO TECHCON*, 2011, Warwick. **Proceedings [...]**. Warwick: [s. n.], 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283324619_Locating_Partial_Discharges_in_Power_Transformers. Acesso em: 8 dez. 2019.
- JUDD, M. D.; YANG, L.; HUNTER, I. B. B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors. Part 1: sensors and signal interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 21, n. 2, p. 5-14, 2005a. DOI: 10.1109/MEI.2005.1412214. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1412214>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- JUDD, M. D.; YANG, L.; HUNTER, I. B. B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part 2 – field experience. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 21, n. 3, p. 5-13, 2005b. DOI: 10.1109/MEI.2005.1437603. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437603>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- JUDD, M. D. *et al.* Dielectric windows of UHF partial discharge detection. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 8, n. 6, p. 953-958, 2001. DOI: 10.1109/94.971451. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/971451>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- LUO, H. *et al.* Research on the UHF microstrip antenna for partial discharge detection in high voltage switchgear. *In: CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS (ICIEA)*, 11., 2016, Hefei. **Proceedings [...]**. Hefei: IEEE, 2016. p. 2273-2276. DOI: 10.1109/

ICIEA.2016.7603970. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7603970>. Acesso em: 8 dez. 2019.

METWALLY, I. A. Status review on partial discharge measurement in gas insulated switchgear/lines. **Electric Power Systems Research**, v. 69, n. 1, p. 25-36, 2004. DOI: 10.1016/j.epr.2003.07.006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222018273_Status_review_on_partial_discharge_measurement_techniques_in_gas-insulated_switchgearlines. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

NATTRASS, D. A. Partial discharge measurement and interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 4, n. 3, p. 10-23, 1988. DOI: 10.1109/57.830. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/830>. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

NOBREGA, L. A. M. M. *et al.* Design and development of a bio-inspired UHF sensor for partial discharge detection in power transformers. **Sensors (Basel)**, v. 19, n. 3, p. 1-16, 2019a. DOI: 10.3390/s19030653. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/653>. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

NOBREGA, L. A. M. M. *et al.* UHF partial discharge location in power transformers via solution of the Maxwell equations in a computational environment. **Sensors (Basel)**, v. 19, n. 15, p. 1-13, 2019b. DOI: 10.3390/s19153435. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3435>. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

RUTGERS, W. R.; FU, Y. H. UHF PD detection in a power transformer. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 10., 1997, Montreal. **Proceedings [...]**. Montreal: [s. n.], 1997. p. 219-22. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/597322>. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

SARKAR, B. *et al.* Microstrip patch antennas based UHF sensor for detection of partial discharge in high voltage electrical equipments. *In*: ANNUAL IEEE INDIA CONFERENCE (INDICON), 2014, Pune. **Proceedings [...]**. Pune: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/INDICON.2014.7030463. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7030463>. Acesso em: 08 de dezembro de 2019.

SINAGA, H. H.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, T. R. Design of ultra high frequency sensors for detection of partial discharges. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING (ISH), 16., 2009, Cape Town. **Proceedings [...]**. Cape Town: Paper D-10, 2009. Disponível em: <https://www.tib.eu/en/search/>

id/TIBKAT%3A667708715/Proceedings-of-the-16th-International-Symposium/. Acesso em: 8 dez. 2019.

STONE, G. C. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 5, p. 891-904, 2005. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522184. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1522184?denied=>. Acesso em: 8 dez. 2019.

XAVIER, G. V. R. *et al.* Study on the applicability microstrip circular antennas in partial discharges detection in power transformers. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), 2018, Niterói. **Anais [...]**. Niterói: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395595. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8395595>. Acesso em: 8 dez. 2019.

XUE, N.; YANG, E. J. The location of partial discharge source in the power transformer with UHF sensors. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS AND INFORMATICS (ICSAI), 5., 2018, Nanjing. **Proceedings [...]**. Nanjing: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICSAI.2018.8599407. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8599407>. Acesso em: 8 dez. 2019.