

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LUCA ALVES MORAES

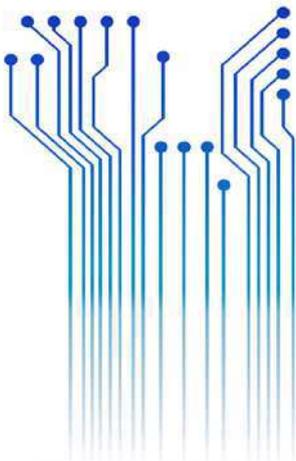


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática



Departamento de
Engenharia Elétrica

Análise do Comportamento Espectral de Isoladores em Linhas de Transmissão



Campina Grande
2016

LUCA ALVES MORAES

Análise do Comportamento Espectral de Isoladores em Linhas de Transmissão

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:
Professor Dr. Helder Alves Pereira

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

LUCA ALVES MORAES

Análise do Comportamento Espectral de Isoladores em Linhas de Transmissão

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador , UFCG

Professor Dr. Helder Alves Pereira
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais: Rejane Maria
Alves Reis e Jurandyr Moraes de Oliveira Junior

AGRADECIMENTOS

Agradeço a essa Instituição, em primeiro lugar, pela minha acolhida e pelas condições oferecidas, que me permitiram concluir este trabalho.

Agradeço também à minha mãe, Rejane Maria Alves Reis e ao meu pai, Jurandyr Moraes de Oliveira Junior por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço ao professor Dr. Helder Alves Pereira por ter me auxiliado, sempre disposto a ajudar, no decorrer da elaboração do trabalho de conclusão de curso. Obrigado pela paciência.

Agradeço também aos funcionários do departamento, Prof. Damásio Fernandes, Adail Ferreira e Tchaikowsky Oliveira, que principalmente nesta reta final auxiliaram imensamente em todas as questões burocráticas da faculdade.

Por fim, agradeço a toda minha família e amigos, que com todo carinho e apoio, não mediram esforços para chegar a esta etapa da minha vida.

RESUMO

O funcionamento adequado do sistema de isolamento das linhas de transmissão é de extrema importância para a continuidade do fornecimento de energia. Esse isolamento, nos sistemas de potência, é composto basicamente por isoladores elétricos. Distribuídos ao longo de uma extensa área territorial, os métodos e procedimentos de inspeção se tornam de difícil execução e dependem, principalmente, da avaliação visual do técnico e de condições climáticas específicas. Faz-se então necessário o estudo de um método eficiente para auxiliar a determinar quando é preciso realizar uma limpeza ou substituição de uma cadeia de isoladores poluída/defeituosa. Realizando simulações computacionais, este trabalho apresenta uma análise do espectro irradiado pelos isoladores, permitindo distinguir e classificar isoladores de acordo com seu nível de poluição. Os resultados obtidos apresentam um método de classificação com base em comparação de coeficientes de reflexão dos isoladores, a partir de diferentes níveis de poluição.

Palavras-chave: Classificação, Coeficiente de Reflexão, Espectro Eletromagnético, Isoladores, Linhas de Transmissão.

ABSTRACT

The proper functioning of transmission lines insulation system is of utmost importance for the continuity of power supply. This insulation in power systems is basically composed of electrical insulators. Spread over an extensive geographical area, methods and inspection procedures become difficult to perform because of its dependency on the visual assessment of the technician and specific climatically conditions. It is necessary to study an efficient method to assists when to perform a cleaning or replacement of a chain of polluted or defective insulators. This paper presents an analysis conducted through computer simulations of insulator's radiated spectrum, by verifying if one can distinguish and classify insulators according to their level of pollution. The results of the analysis' shown that not only insulators with different pollution levels has different spectra, but also that it is possible to use a classification method based on the comparison of the reflection coefficient of each polluted insulator.

Keywords: Classification, Electromagnetic Spectrum, Insulators, Reflection Coefficient, Transmission Lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fotos de isoladores para linhas de transmissão de alta tensão.	16
Figura 2.2 - Esquema do isolador de vidro.	17
Figura 2.3 – Detalhes do isolador polimérico.	18
Figura 2.4 – Etapas de discretização de um isolador cerâmico.	24
Figura 4.1 – Isolador polimérico de suspensão.	32
Figura 4.2 – Modelo 2D do isolador.	32
Figura 4.3 – Interface COMSOL – Isolador 2D.	34
Figura 4.4 – Detalhes do modelo 2D do isolador.	35
Figura 4.5 – Discretização do isolador com mesing refinado ao longo da superfície.	37
Figura 4.6 – Distancia do ponto prova em relação ao isolador.	38
Figura 4.7 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 7,5$.	39
Figura 4.8 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 15$.	39
Figura 4.9 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 30$.	40
Figura 4.11 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído.	41
Figura 4.12 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 7.5$ Espessura variável.	43
Figura 4.13 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 15$ Espessura Variável.	43
Figura 4.14 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 30$ Espessura Variável.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Desligamentos por quilômetro de linha de transmissão. _____	13
Tabela 3.1 - Principais contribuições sobre monitoramento do estado de conservação de isoladores. ____	30
Tabela 3.1 - Principais contribuições sobre monitoramento do estado de conservação de isoladores. ____	31
Tabela 4.1 – Propriedade dos materiais. _____	36
Tabela 4.2 – Coeficiente de Reflexão para diferentes níveis de poluição na frequência de 963MHz. ____	45

LISTA DE SIGLAS

CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
EM	Eletromagnética
EPDM	Etileno-Propileno Dieno Monômero
EPM	Etileno-Propileno Monômero
EVA	Acetato de Vinil-Etileno
MEF	Método dos Elementos Finitos
RF	Rádio Frequência
RNA	Rede Neural Artificial
SIR	Borracha de Silicone
UV	Ultravioleta
VNA	Vectorial Network Analyzer
	Analisador de Rede Vetorial

Sumário

1. Introdução.....	13
1.1. Contextualização do Assunto.....	13
1.2. Motivação	14
1.3. Objetivos.....	15
1.4. Metodologia	15
1.5. Estrutura do Trabalho	15
2. Fundamentação Teórica.....	16
2.1. Isoladores	16
2.1.1. Isoladores de Vidro ou de Porcelana	17
2.1.2. Isoladores Poliméricos.....	18
2.2. Manutenção em Isoladores.....	20
2.3. O Isolador como Elemento Irradiador.....	22
2.4. Método dos Elementos Finitos.....	23
3. Estado da Arte	27
3.1. Introdução	27
3.2. Estado da Arte.....	27
4. Ferramenta de Simulação	32
4.1. Introdução	32
4.2. COMSOL.....	33
4.3. Simulação e Análise dos Resultados.....	34
4.3.1. Simulação Isolador 2D	34
4.3.2. Análise dos Resultados.....	38
5. Conclusão	46
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	46
6. Referências Bibliográficas.....	48

1. Introdução

1.1. Contextualização do Assunto

A necessidade de um suprimento confiável de energia tem se mostrado evidente com o crescente desenvolvimento tecnológico de nossa sociedade (MARCELINO, 2006). Bezerra (2004) indica que problemas nos isolamentos elétricos são os principais motivos de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

A função dos sistemas de isolamento é, idealmente, impedir a circulação de corrente entre áreas energizadas ou entre uma área energizada e a terra, isto é, segregar regiões com diferentes níveis de tensão (CAMINHA, 1997). Assim, desde a geração, passando pela transmissão e chegando à distribuição, os sistemas de isolamento influenciam todo o sistema elétrico.

Nos sistemas de potência, esse sistema de isolamento é constituído, basicamente, por isoladores elétricos. Esses isoladores, por sua vez, apresentam uma influência direta no desempenho das linhas de transmissão (NIGRI, 1999).

Pesquisas realizadas por Monticelli e Garcia (2003) indicaram que as falhas em isoladores ocasionam grande parte dos desligamentos ocorridos em linhas de transmissão, como pode ser observado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Desligamentos por quilômetro de linha de transmissão.

Componentes	Desligamentos(%)	
	<230kV	≥230kV
Isoladores	46,4	63,2
Cabos	19,6	9,7
Cabos para-raios	3,6	7,4
Estruturas	16,3	10,1
Ferragens	0,8	1,8
Outras causas	13,2	7,8

Fonte: adaptado de Monticelli e Garcia (2003).

A partir das informações descritas na Tabela 1.1 é possível ver que os desligamentos em linhas de transmissão podem ocorrer devido a falhas em diversos componentes. Também é observável o fato de que, dentre todos os componentes, as falhas em isoladores são responsáveis pela maior parte desses desligamentos.

Por sua vez, as falhas em isoladores podem ser associadas à efetividade das inspeções e da manutenção das linhas de transmissão (OLIVEIRA, 2008). Portanto, dada a importância que os isoladores possuem para o sistema elétrico, é necessária uma atenção especial para esses elementos, de modo que seja possível antecipar/prevenir falhas.

1.2. Motivação

Falhas em isolamentos tem consequências indesejáveis, desde interferências em sinais de rádio ou de televisão, até curtos-circuitos que podem retirar a linha ou subestação de operação. No último caso, a interrupção temporária de suprimentos acarreta prejuízos às unidades consumidoras e à concessionária de energia. Processos industriais contínuos, de maneira geral, não devem ter o suprimento de energia interrompido de forma não programada. Para a concessionária, falhas em isolamentos podem resultar em danos materiais, custo de manutenção, perda de faturamento e, em vários casos, multas impostas por parte das agências reguladoras (FERREIRA, 2011).

A inspeção e a lavagem periódica desses equipamentos tornam-se necessárias, a fim de que unidades defeituosas sejam trocadas e de que a poluição acumulada sobre os discos não reduza a capacidade de isolamento a níveis perigosos (FERREIRA, 2011).

Um fator que contribui para a ineficiência da forma atualmente empregada na manutenção de isoladores de alta tensão é a ausência de um critério objetivo. Algo que permita que o encarregado da manutenção tome qualquer decisão sobre a necessidade ou não de intervenção no equipamento, podendo essa ser apenas de limpeza ou até de substituição (ROCHA, 2014).

Faz-se então necessário o estudo de um método eficiente para auxiliar a determinar quando é necessário realizar uma limpeza ou substituição de uma cadeia de isoladores poluída/defeituosa.

O estudo feito neste trabalho visa, portanto, analisar a viabilidade da utilização de um método baseado na análise do espectro eletromagnético (EM) irradiado pelos isoladores quando submetidos a alta tensão para verificar o estado de degradação devido à poluição dos mesmos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de simulações computacionais, o comportamento do espectro eletromagnético irradiado por isoladores em linhas de transmissão.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Construir um modelo de isolador com o auxílio da ferramenta computacional simulação COMSOL.
- Realizar simulações computacionais com o modelo de isolador implementado.
- Analisar o comportamento do campo eletromagnético irradiado pelo modelo de isolador quando submetido à alta tensão.

1.4. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em etapas. Inicialmente, realiza-se uma revisão bibliográfica, estudo e leitura de trabalhos publicados e identificação do estado da arte na literatura.

A segunda etapa será a modelagem e simulação computacional do isolador. Em seguida, será feita uma análise dos resultados obtidos a partir das simulações.

1.5. Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, realiza-se uma revisão teórica dos assuntos e temas abordados no trabalho. No Capítulo 3, são apresentados os trabalhos mais relevantes na área de isoladores e das técnicas utilizadas para avaliar e monitorar os mesmos. No Capítulo 4, faz-se uma explicação, de forma sucinta, da ferramenta computacional utilizada para simulação e se analisa os resultados obtidos. No Capítulo 5, são expostas as conclusões e a propositura de trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

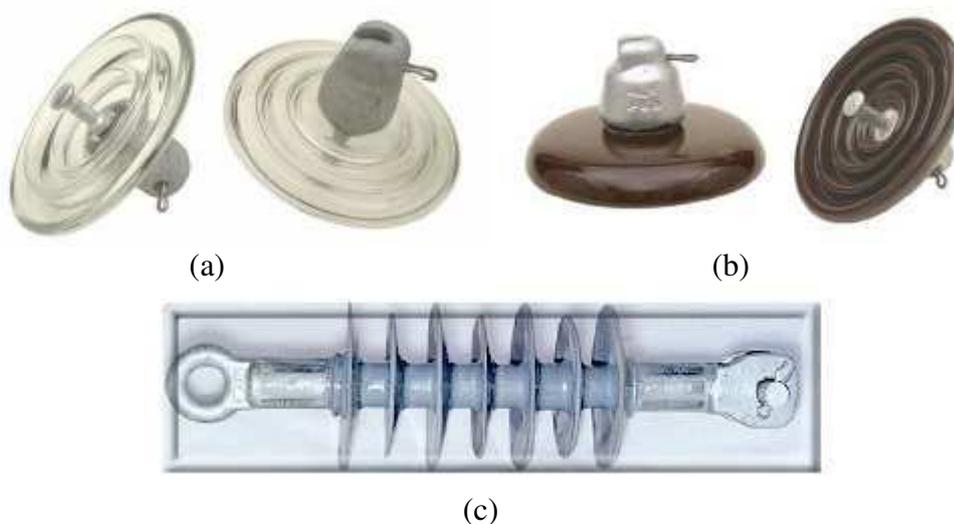
Neste capítulo são apresentados os conceitos sobre isoladores, bem como sua manutenção, tipos e procedimentos. Descreve-se o isolador como elemento irradiador e apresenta-se o método dos elementos finitos, que é utilizado também para se realizar a análise dos isoladores a partir de simulações computacionais.

2.1. Isoladores

Isoladores, de modo geral, são aplicados em sistemas elétricos com a função de manter a distância de isolamento entre duas estruturas com potencial diferente, impedindo uma circulação indesejável de corrente, além de servirem como sustentação para os cabos energizados. Os isoladores podem assumir formatos e tamanhos diferentes em função das exigências mecânicas, elétricas e ambientais a que serão submetidos (FERREIRA, 2007).

Nas linhas de transmissão, o isolador está sujeito a um ambiente vulnerável, como por exemplo cargas mecânicas, campo elétrico intenso, danificações oriundas de vandalismo e à ação de intempéries (LEITE, 2005). Na Figura 2.1 são apresentados os tipos de isoladores que são utilizados atualmente: (a) Isolador de Vidro; (b) Isolador de Porcelana e (c) Isolador polimérico (MORA, 2010).

Figura 2.1 - Fotos de isoladores para linhas de transmissão de alta tensão:
(a) Isolador de Vidro (b) Isolador de Porcelana
(c) Isolador polimérico.

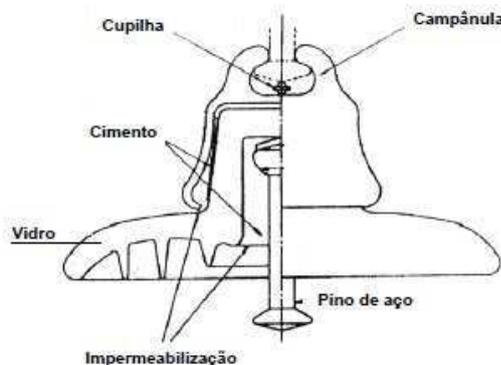


2.1.1. Isoladores de Vidro ou de Porcelana

Cadeias de isoladores compostas por isoladores de vidro, ou de porcelana, são utilizadas a mais de 120 anos em linhas de transmissão. Os isoladores de vidro possuem uma vida útil de mais de 40 anos mas são os elementos mais vulneráveis, uma vez que estão submetidos a cargas de natureza eletromecânica, ação de intempéries e depredação. São projetados de forma que os caminhos na superfície do vidro sejam os mais longos possíveis, com o objetivo de diminuir a possibilidade de ocorrência de descarga elétrica entre duas partes metálicas (YANAGUIZAWA; SHINORAH, 2011).

Em termos construtivos, um isolador de vidro consiste nas seguintes partes: campânula metálica, disco de vidro temperado, pino metálico e cimento aluminoso. A Figura 2.2 mostra um esquema de um isolador de vidro concha-bola (FERREIRA, 2008). O vidro utilizado possui excelente propriedade dielétrica e tem o formato de “chapéu”. A campânula e o pino são feitos de aço galvanizado. Por fim, o cimento tem a função de fixar o pino metálico ao vidro temperado e pode suportar cargas mecânicas elevadas, dependendo do tipo de isolador, de 80 kN a 240 kN (LEITE, 2004).

Figura 2.2 - Esquema do isolador de vidro.



Fonte – FERREIRA, 2008.

Devido à sua longa vida útil, os isoladores permanecem muito tempo expostos a intempéries como umidade, variações de temperatura, maresia, e outros diversos fatores que ocasionam o acúmulo de poluentes (QUEIROZ, 2014). Entretanto, a principal causa de defeito nos isoladores de vidro continua sendo o vandalismo.

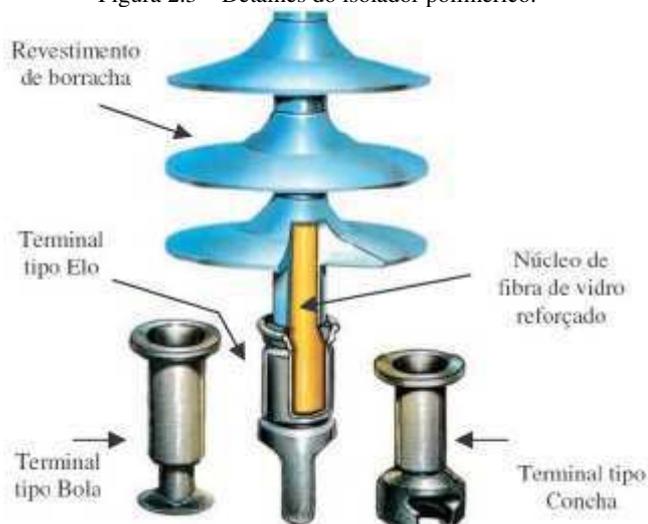
De acordo com dados fornecidos pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), de um monitoramento realizado durante um período de 13 anos (entre 1988 e 2001), ocorreram 339 desligamentos em suas linhas de transmissão, dos quais 75% foram originados de atos de vandalismo. Os 25% restantes foram devido a descargas atmosféricas, falhas de fabricação dos equipamentos, manutenção e etc (CHESF, 2001).

2.1.2. Isoladores Poliméricos

Os primeiros isoladores poliméricos surgiram na década de 40, quando materiais orgânicos começaram a ser utilizados na fabricação de isoladores de alta tensão. Entretanto, foi apenas no início da década de 80 que surgiu a primeira versão comercial de isoladores poliméricos para linhas de transmissão (HALL, 1993). Desde então, o uso de isoladores poliméricos em linhas de transmissão vem aumentando devido às suas vantagens em relação a isoladores de vidro e porcelana (SILVA, 2012).

Os isoladores poliméricos são constituídos, basicamente, pelo núcleo de fibra de vidro, revestimento polimérico, aletas e ferragens terminais. Os detalhes a respeito das partes constituintes do isolador são apresentados na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Detalhes do isolador polimérico.



Fonte – Adaptado de RODURFLEX, 2016a.

O núcleo é constituído por um bastão de fibra de vidro reforçada e tem como função suportar os esforços mecânicos provenientes do condutor, mantendo ao mesmo tempo suas características como isolante elétrico (NERI,2005).

Um composto especial de borracha é aplicado sobre o núcleo do isolador, visando a proteção do mesmo contra agentes externos. O revestimento permite que o núcleo fique protegido das condições externas degradantes como umidade, contaminantes químicos e radiação ultravioleta (UV) (GORUR, 1999). Os materiais comumente utilizados no revestimento de isoladores poliméricos são: etileno-propileno monômero (EPM), etileno-propileno dieno monômero (EPDM), borracha de silicone (SIR), acetato de vinil-etileno (EVA) e ligas de EPDM (ou EPM) (ZHAO; BERNSTORF, 1998).

As aletas são, geralmente, feitas do mesmo material do revestimento. A sua função é aumentar a distância de escoamento entre as ferragens terminais, evitando que se formem caminhos condutivos (NERI, 2005).

As ferragens terminais são os componentes metálicos do isolador, e sua função é transmitir os esforços mecânicos do condutor. O formato da ferragem também possui importância significativa, uma vez que ele é importante para equalizar o campo elétrico em torno do isolador (FERREIRA, 2007).

Como vantagens desse tipo de isolador em relação aos outros, podem ser citadas:

- Facilidade de manuseio, instalação e fabricação:

Isoladores poliméricos são mais leves que isoladores de vidro e cerâmicos, podendo chegar a possuir um peso 90% menor que isoladores de vidro da mesma classe de tensão. Portanto, sua instalação e manuseio se tornam mais simples e rápidos. Além disso, o tempo gasto no seu processo de fabricação é considerado curto, devido à facilidade na usinagem e à fundição e cura a baixas temperaturas (GUEDES, 2015).

- Resistência ao vandalismo:

Suas aletas, à base de polímeros apresentam elasticidade e, junto à elevada resistência do núcleo, garantem um desempenho seguro dos isoladores em regiões sujeitas a vandalismo. Além disso, como a estrutura não quebra ou se estilhaça facilmente, esses isoladores se tornam um alvo bem menos atrativo aos vândalos (HACKAM, 1999).

- Baixa emissão de interferência eletromagnética:

Eletricamente, os isoladores poliméricos emitem interferência eletromagnética em níveis menores que as emitidas pelos isoladores cerâmicos e de vidro (FONTGALLAND *et al*, 2004). A ausência de ferragens intermediárias cria uma grande distância de escoamento, o que dificulta a formação de arcos elétricos (FLORENTINO, 2015).

- Hidrofobicidade:

Os isoladores com revestimento polimérico à base de silicone, particularmente, possuem a característica de hidrofobicidade. Em isoladores poliméricos, a hidrofobicidade dificulta a formação de películas de água na superfície, de forma que, mesmo com a presença de gotículas de água, a resistência superficial do isolador ainda é elevada (RODURFLEX, 2016).

Contudo, apesar das vantagens citadas, a utilização de isoladores poliméricos em sistemas de transmissão apresenta algumas desvantagens em relação aos isoladores de vidro e de porcelana. Eles, em muitos casos, não apresentam indícios de que houve uma falha interna (HACKAM, 1999), tornando as inspeções visuais ineficazes. Seu desempenho a longo prazo não é conhecido, o que torna difícil a avaliação da expectativa de vida útil do isolador. Por estarem expostos às intempéries, estão sujeitos a radiação UV da luz solar, e essa radiação, por sua vez, é o principal responsável pela degradação do material polimérico pois, deterioram as estruturas químicas e mecânicas da superfície do material. Além disso, com o emprego de isoladores poliméricos no sistema elétrico, alguns mecanismos de falha até então desconhecidos entre isoladores tradicionais surgiram, como, por exemplo o trilhamento e fratura do núcleo e a erosão (FERREIRA, 2007).

2.2. Manutenção em Isoladores

Rotineiramente, as inspeções em isoladores são efetuadas juntamente com a inspeção nos demais componentes da linha. Essas inspeções têm como objetivo detectar defeitos. Entende-se como defeito qualquer alteração, seja ela física ou química, no estado de um componente ou instalação, sem causar o termino de sua habilidade de desempenhar sua função podendo, entretanto, a curto ou longo prazo acarretar em sua indisponibilidade (GUEDES, 2015).

Atualmente, o processo para se diagnosticar o nível de poluição e, a partir dos resultados, realizar a manutenção em isoladores de alta tensão localizado em linhas de transmissão (LT) é feito, principalmente, a partir da inspeção visual (CAPELINI, 2012). A inspeção visual, na qual o encarregado observa o isolador, está sujeita a erros devido à grande distância entre o ponto de medição e a cadeia de isoladores (FERREIRA, 2011). Essa inspeção visual busca avaliar o efeito corona apresentado pelos isoladores. Uma vez que ela é bastante prejudicada quando é feita próxima a outras fontes de luz, o inspetor de linha escolhe pontos específicos, de acordo com o registro de falhas, preferencialmente em noite de lua nova, pois há menos ocorrência de luminosidade (OLIVEIRA, 2008).

Como é descrito em Khalifa (1988), o monitoramento de isoladores a partir da corrente de fuga, por meio de sensores instalados nas cadeias, faz análise em tempo real da corrente de fuga e envia um sinal ao centro de manutenção caso ultrapasse um limiar pré-estabelecido. Entretanto, para se realizar tais medições, os equipamentos necessários (sensores) possuem alto custo e, além disso, a interferência eletromagnética das proximidades pode reduzir significativamente a confiabilidade das medições.

A utilização de termovisores é outro método possível para inspeção de isoladores. Esses instrumentos convertem a energia infravermelha, provenientes dos isoladores (fontes de calor), em uma escala de cores. Quando aplicado ao diagnóstico de isoladores, seu emprego é feito a partir da comparação de imagens registradas ao longo do tempo. O aumento na temperatura é um indicativo de que deve existir alguma anomalia no isolador (EPPERLY; HEBERLEIN; EADS, 1999).

O diagnóstico a partir da análise da emissão de irradiação ultravioleta também é utilizado como método para monitorar a condição de poluição em isoladores, pois essas emissões são geradas quando há ocorrência de descargas parciais (DP) extremas (CHAURASIA, 1999). A limitação dessa técnica consiste no alto custo para aquisição do equipamento necessário para detecção de irradiação ultravioleta e no fato de que para ocorrer a DP, a umidade relativa do ar deve ser alta (OLIVEIRA, 2008).

Do ponto de vista da manutenção, os procedimentos podem ser classificados como: preventiva, corretiva e preditiva (VIEIRA, 2008). A primeira, refere-se a um modelo de manutenção focado em intervenções e análises de acordo com uma programação pré-estabelecida. Essa forma de manutenção não é muito efetiva, uma vez que realiza ações sem considerar a situação real de cada equipamento, muitas vezes resultando em uma substituição ou intervenção desnecessária.

Na segunda, a intervenção no equipamento ocorre de forma não planejada devido a alguma falha, ou anomalia, em seu funcionamento. Devido ao seu caráter emergencial, esse tipo de manutenção é o mais oneroso para a empresa, pois o problema ocorre de maneira inesperada e necessita de uma equipe grande para sua solução, juntamente a isso, tem a indisponibilidade ocasionada pela falha do equipamento, o que gera perdas expressivas. Na terceira, pode-se defini-la como um processo contínuo de monitoramento do equipamento, feito a partir da análise de certos parâmetros que servem para relatar seu estado operacional. Dessa forma, apenas quando são detectados indícios de mau funcionamento, que possam acarretar na inoperância do equipamento por meio de monitoramento contínuo dos seus parâmetros, é realizada a intervenção.

2.3. O Isolador como Elemento Irradiador

A partir das equações de Maxwell, tomando como ponto de partida a Lei de Ampère, tem-se que (COLLIN, 2001)

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \vec{J}(t) + \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

em que $\vec{H}(t)$ é a intensidade de campo magnético, $\vec{J}(t)$ a densidade de corrente de condução e $\vec{D}(t)$ a densidade de fluxo elétrico, sendo todas variantes no tempo.

A partir da equação (2.1), pode-se observar que a partir da variação da densidade de corrente \vec{J} , ou da densidade de fluxo \vec{D} , é possível variar a intensidade de campo magnético \vec{H} . Portanto, de acordo com a Lei de Faraday (2.2) e a equação auxiliar do campo magnético (2.3), variar \vec{H} provoca uma variação em \vec{E} , e essa variação, por sua vez, provoca uma variação em \vec{H} . Assim se dá, então, o processo de geração de uma onda eletromagnética (ROCHA, 2014).

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{\delta \vec{B}(t)}{\delta t} \quad (2.2)$$

$$\vec{B}(t) = \mu \vec{H}(t) \quad (2.3)$$

Como pode ser observado na equação (2.1), o campo \vec{H} pode ser produzido pela variação de \vec{J} ou \vec{D} , ou seja, a partir da injeção de corrente ou de um potencial elétrico. A densidade de campo elétrico \vec{D} pode ser expressa como o produto de \vec{E} por uma constante ε , sendo esta constante definida pela geometria e propriedade elétricas do material (ROCHA, 2014).

$$\vec{D}(t) = \varepsilon \vec{E}(t) \quad (2.4)$$

Comumente, as antenas são utilizadas para irradiar uma onda eletromagnética a partir da injeção de uma corrente variável no tempo de pequena intensidade. Além disso, a aplicação de um alto potencial elétrico é uma outra maneira para se excitar uma antena com objetivo de irradiação eletromagnética. Essa é a explicação física utilizada para se entender o comportamento dos isoladores de alta tensão, pois os mesmos se comportam de forma semelhante às antenas quando submetidos a alta tensão. Isso torna possível captar e analisar o sinal irradiado pelos isoladores (ROCHA, 2014). Além disso, uma linha de transmissão gera ruído eletromagnético em uma larga faixa do espectro (CHARTIER, 1986) e tem como fator principal para tal a presença de isoladores de alta tensão utilizados para sustentação dos cabos energizados. É necessário, portanto, um estudo das frequências que podem ser irradiadas pelos isoladores, pois assim serão conhecidas quais bandas do espectro são suscetíveis à interferência eletromagnética gerada pelos mesmos.

2.4. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos teve sua origem nos anos 40 do século XX. Entretanto, só começou a ser vastamente utilizado nos últimos 30 anos, graças aos diversos avanços computacionais (SADIKU, 2001). Ele consiste em uma adaptação de métodos já existentes, como por exemplo o Método de Ritz. Devido às suas características de flexibilidade e estabilidade numérica, ele pode ser facilmente implementado em um sistema computacional, o que explica sua grande popularidade nos dias atuais (PEREIRA, 2004).

Diversos problemas de grande importância para engenharia podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Porém, com exceção de alguns casos particulares, não é possível obter uma solução analítica exata para esses problemas (PEREIRA, 2005). Segundo Huebner (1995), o método dos elementos finitos (MEF) apresenta como atrativo a capacidade de apresentar uma forma de solução de problemas complexos e contínuos, subdividindo-os em problemas simples, menores, discretos e correlacionados entre si.

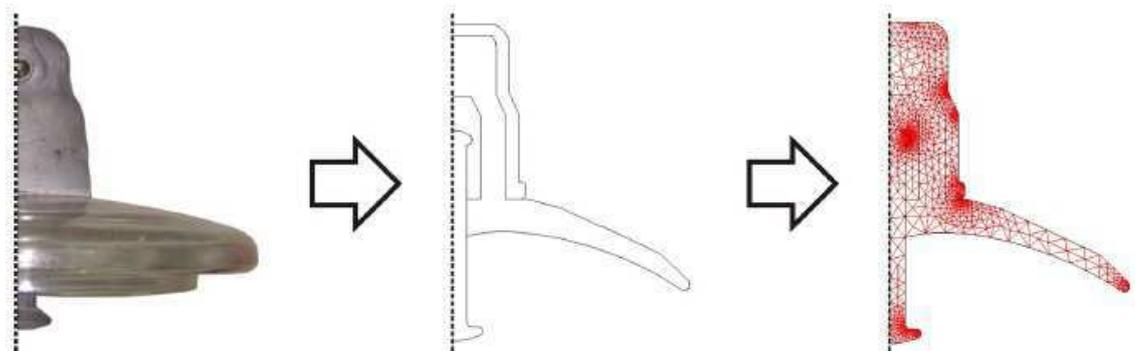
A maioria das publicações disponíveis a respeito do MEF se tratam de aplicações voltadas para engenharia civil e mecânica. Entretanto, esse método tem sido aplicado em diversas áreas como: problemas de guias de onda, máquinas elétricas, dispositivos semicondutores, *microstrips* e absorção de irradiação eletromagnética por corpos biológicos (SADIKU, 2001).

A análise de problemas através do MEF envolve, basicamente, quatro passos (Sadiku, 1989). Todavia, o uso prático do MEF impõe a adição de um quinto passo, o qual será descrito a seguir juntamente com os demais (FERREIRA, 2007).

2.4.1. Discretização

Consiste na representação abstrata da região, equipamento ou corpo que se deseja analisar, e na subdivisão dessa representação em um número finito de elementos (subdomínios). Os subdomínios podem ser de uma forma geométrica qualquer, tais como triângulos, retângulos, quadriláteros e etc. Pode-se também misturar subdomínios de formas distintas, entretanto, para reduzir o esforço computacional, é preferível utilizar a mesma forma geométrica para todos os subdomínios (SADIKU, 2001). Na Figura 2.4 é possível observar, como exemplo, as etapas de discretização de um isolador cerâmico.

Figura 2.4 – Etapas de discretização de um isolador cerâmico.



Fonte – BARROS, 2013.

2.4.2. Equacionamento dos Elementos

Nessa etapa, é feita a definição de um modelo equacional, com o intuito de reger fisicamente os elementos. A escolha desse modelo deve ser feita baseada no problema físico analisado. Após a escolha do modelo físico a ser adotado, são calculadas as matrizes de coeficientes para cada um dos elementos (SADIKU, 2001).

2.4.3. Junção dos Elementos

Tendo considerado os elementos típicos, o próximo passo é realizar a junção de todos os elementos da região que se deseja analisar. Todas as matrizes de coeficientes são utilizadas para a criação da matriz global de coeficientes. Assim, a equação matricial resultante da combinação das equações matriciais dos elementos representa um sistema de equações (SADIKU, 2001).

2.4.4. Solução do Sistema

Após aplicar as devidas condições de contorno, o sistema de equações representado na equação matricial global pode ser então solucionado através de métodos tradicionais. A solução do sistema fornecerá os valores numéricos correspondentes de cada nó do sistema (SADIKU, 2001).

2.4.5. Visualização

Os ambientes computacionais baseados no MEF devem dispor de ferramentas visuais e numéricas de representação, permitindo assim identificar todas as implicações da análise (FERREIRA, 2007). Apesar do fato de que as soluções apresentadas são aproximadas, a exatidão do MEF pode ser melhorada com o refinamento da malha. É possível, portanto, alcançar um nível de refinamento ótimo que forneça uma solução que se aproxima da realidade com um esforço computacional aceitável.

Este trabalho tem como objetivo utilizar uma ferramenta computacional de simulação para analisar o espectro irradiado pelos isoladores. Dessa forma, os conceitos sobre isoladores, suas características, métodos utilizados para manutenção e sua propriedade de irradiação de ondas EM apresentados nas subseções 2.1 a 2.3, bem como do método de elementos finitos, apresentado na subseção 2.4, são importantes pois indicam que é possível propor um método que auxilie a execução da manutenção em isoladores baseado no espectro EM obtido através de simulações. No próximo capítulo, será feita uma revisão bibliográfica na literatura sobre o tema de pesquisa deste trabalho. Posteriormente, será feita a avaliação de um isolador polimérico simulado sob condições normais de operação em uma linha de transmissão.

3. Estado da Arte

3.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos na área de isoladores e das técnicas utilizadas para avaliar e monitorar as suas condições quanto à poluição e estado de degradação dos mesmos.

3.2. Estado da Arte

Em Kalifa (1988), apresenta-se uma forma de monitorar o nível de poluição nos isoladores a partir de um sensor que analisa corrente de fuga. Esse monitoramento é feito a partir de um sensor que é instalado no isolador, sensor esse que envia um sinal para o centro de controle caso o valor da corrente ultrapasse um limite pré-estabelecido. Bezerra (2008) propõe a análise do estado de poluição do isolador a partir do uso do sinal de ultrassom emitido pelo mesmo. Nesse estudo são testados três métodos diferentes de classificação para determinar a condição do isolador, sendo o melhor resultado obtido utilizando redes de múltiplas camadas de percéptrons. Pylarinos (2007) utiliza a análise da forma de onda da corrente de fuga para classificar o estado dos isoladores. A partir da transformada *wavelet* e do processamento feito por uma rede neural artificial (RNA) é feita a classificação dos isoladores. Tal classificação pode, portanto, ser utilizada para investigar o estado da superfície do isolador e sua performance.

Vários trabalhos relatam interferência, análise de espectro de frequência ou medições dos campos provenientes dos isoladores, e comprovam a existência de campos de altas frequências emanados pelos mesmos (NERI, 2005). No trabalho de Moore (2004), descreve-se uma técnica para identificar isoladores defeituosos em linhas de transmissão utilizando um conjunto (*array*) de antenas montado sobre um veículo para captar o sinal RF emitido por DP. Como métodos para detecção de DP foram utilizados: o *bearing* e *RMS time delay error*. Após testes realizados em campo, a eficácia da técnica proposta foi comprovada, localizando com precisão regiões defeituosas na linha de transmissão. Outro trabalho que também utilizou um sistema móvel para detecção de componentes defeituosos a partir de sua assinatura espectral foi proposto por Lauletta (2013).

O sistema utilizado era composto por um sensor móvel posicionado em um veículo, ou aeronave, para detectar emissões de RF, uma rede de celular para transportar as leituras feitas pelo sensor e um portal *online* para acessar os dados recolhidos. Foram realizados testes de campo e, a partir da análise dos dados coletados pelo sensor, foi possível detectar com sucesso equipamentos falhos ao longo das linhas de transmissão.

Estudos feitos por Fontgalland (2004), sobre o sinal de radiofrequência irradiado de isoladores de alta tensão, mostram que descargas associadas aos isoladores de vidro aparentam irradiar ruído eletromagnético na banda de 100 MHz a 900 MHz. Em Braga *et al.* (2011) foi feito um estudo dos sinais eletromagnéticos emitidos por isoladores submetidos a alta tensão e concluiu-se que esses sinais são de natureza aleatória e contínua. Sendo assim, é possível que esse sinal seja trabalhado através de funções que representem as variáveis aleatórias e, após processamento, o mesmo pode ser analisado para se obter uma comparação entre isoladores defeituosos, ou poluídos, e isoladores em condições normais de uso. Baseado no princípio de que isoladores danificados de porcelana do tipo pino emitem ultrassom, infravermelho, ultravioleta e sinais de RF, Salustiano *et al.* (2014) estudou o uso de ferramentas que analisam tais fenômenos com o intuito de melhorar a qualidade das inspeções de campo realizadas. Os resultados desse estudo apontaram que as tecnologias baseadas em RF e ultrassom apresentam acurácia quanto à identificação do estado de conservação dos isoladores.

Shurab (2013) propôs um estudo para verificar a viabilidade de um método para detectar e classificar DP em superfícies de isolamento polimérica. O estudo realizado consiste na geração e aquisição de DPs, extração e seleção de características dessas descargas e, posteriormente, classificação a partir de uma RNA. A partir do sinal RF emitido pelas DPs foi possível não só identificar a ocorrência das mesmas, como também identificar diferentes fontes de DPs, sejam elas defeitos no terminal energizado, no terminal aterrado, contaminação no isolador ou uma combinação dos defeitos mencionados. No trabalho de Shaharyar (2014), foram investigados vários casos de defeitos em isoladores com o intuito de desenvolver uma técnica de monitoramento e classificação de defeitos em isoladores cerâmicos. Os defeitos foram investigados a partir do espectro RF gerado pelas DPs dentro da largura de banda de 300 MHz a 3000 MHz. A técnica apresentada nesse trabalho apresentou resultados satisfatórios quanto à detecção de DPs e, uma vez que as mesmas estão relacionadas com a degradação dos isoladores, essa técnica pode apresentar um meio confiável de avaliação da condição de isoladores.

Em Moura (2013), foi proposto um estudo do uso de um método estatístico para a classificação do estado de poluição de isoladores vítreos. A partir dos gráficos da média e desvio padrão, foi possível observar que isoladores limpos e isoladores poluídos representam pontos distintos do gráfico, permitindo assim uma classificação dos mesmos. Foi observado também que a largura de banda do espectro que melhor discrimina isoladores como limpos e poluídos se encontra na faixa de 30 MHz a 130 MHz. Entretanto, esse trabalho não propôs nenhum método de classificação, limitando-se apenas à análise visual.

No trabalho de Rocha (2015), foi apresentado um método para classificação do estado de conservação de isoladores de vidro a partir da análise do espectro de RF na faixa de 30 MHz a 330 MHz. O método utilizado apresentou resultados precisos quanto à classificação dos isoladores e se baseia no processamento do espectro do sinal RF coletado a partir da transformada *wavelet* e RNA. Em um trabalho recente, Rocha (2016) verificou, a partir de experimentos, que é possível analisar o espectro de RF irradiado na banda que compreende as frequências de 10 MHz a 2 GHz. Também foi exposto que é possível realizar a classificação dos isoladores quanto ao estado de poluição do mesmo segundo uma análise no domínio do tempo, utilizando média e desvio padrão como critério de classificação.

Segundo Fontgalland (2015), com a utilização de histogramas em conjunto com ferramentas estatísticas (teste de normalidade e coeficiente de correlação), é possível extrair informações a respeito da assinatura espectral dos isoladores. Essas informações, por sua vez, podem ser utilizadas para identificar o estado de conservação dos isoladores.

As principais pesquisas, que tratam dos temas discutidos nesse capítulo estão sumarizadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Principais contribuições sobre monitoramento do estado de conservação de isoladores.

Ano	Pesquisadores	Contribuição
1988	Kalifa	Apresenta uma forma de monitoramento dos níveis de poluição de isoladores baseado num sensor que mede a corrente de fuga.
2004	Moore	Estudo e comprovação da eficiência de um método para identificação e classificação de DPs em componentes defeituosos a partir do sinal eletromagnético emitido por essas descargas.
2004	Fontgalland	Constata a presença do fenômeno de irradiação eletromagnética de isoladores quando submetidos a alta tensão.
2007	Pylarinos	Classificação do estado de conservação de isoladores a partir da forma de onda da corrente de fuga. Foi utilizada uma RNA para auxiliar na tomada de decisão quanto a classificação.
2008	Bezerra	Análise do nível de poluição de isoladores baseado no sinal de ultrassom emitido pelo mesmo.
2011	Braga	Constatou a natureza aleatória e contínua do sinal eletromagnético emitido por isoladores. Constatou também a possibilidade de processamento deste sinal para determinar o estado de conservação do isolador.
2013	Lauletta	Utilização de um sistema móvel para detecção de equipamentos falhos baseado na detecção de emissão RF.
2013	Shurrab	Classificação e identificação de fontes de DP a partir do sinal RF emitidos pela descarga, utilizando as características extraídas da DP e uma RNA.
2013	Moura	Mostrou que, a partir de um método estatístico de processamento do espectro eletromagnético irradiado, é possível classificar isoladores limpos e poluídos. Não foi proposto, entretanto, um método de classificação.
2014	Shaharyar	Desenvolveu um método que apresenta resultados satisfatórios quanto a detecção de descargas parciais a partir do espectro RF irradiado. Sugeriu também que, a partir desse método, é possível monitorar a condição dos isoladores.

Fonte – Própria do autor.

Tabela 3.1 - Principais contribuições sobre monitoramento do estado de conservação de isoladores (continuação).

Ano	Pesquisadores	Contribuição
2014	Salustiano	Analisou os fenômenos de emissão de ultrassom, infravermelho, RF e ultravioleta. Constatou, após análise dos resultados, a acurácia das técnicas baseadas em RF e ultrassom quanto a identificação do estado de conservação dos isoladores.
2015	Rocha	Apresentou um método de classificação do estado de conservação de isoladores a partir do espectro RF irradiado com o auxílio de RNA
2015	Fontgalland	Apresentou uma nova abordagem para a análise do espectro RF analisado, aumentando a banda de frequência analisada.
2016	Rocha	A partir de procedimentos experimentais, verificou que uma banda de frequências maior (10 MHz-2 GHz) apresenta resultados satisfatórios quanto a classificação do estado de poluição dos isoladores. Também mostrou que é possível classificar os isoladores em grupos distintos, de acordo com seu estado de conservação.

Fonte – Própria do autor.

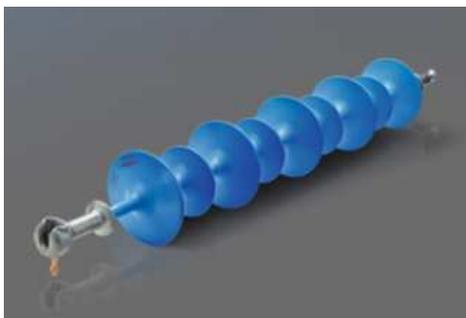
Com base na revisão bibliográfica, observa-se que existem várias publicações sobre métodos que permitem monitoramento e avaliação das condições de poluição em isoladores. Entretanto, pode ser visto que, além da utilização do espectro eletromagnético ser recente, como ferramenta para avaliar o estado de conservação dos isoladores, a análise desse espectro, por meio de simulações, é uma área pouco explorada. Foi realizada então a simulação de um isolador com o objetivo de analisar as informações extraídas do espectro eletromagnético. O capítulo 4, apresentado a seguir, trata do modelo e *software* utilizados bem como da análise realizada a partir dos resultados obtidos.

4. Ferramenta de Simulação

4.1. Introdução

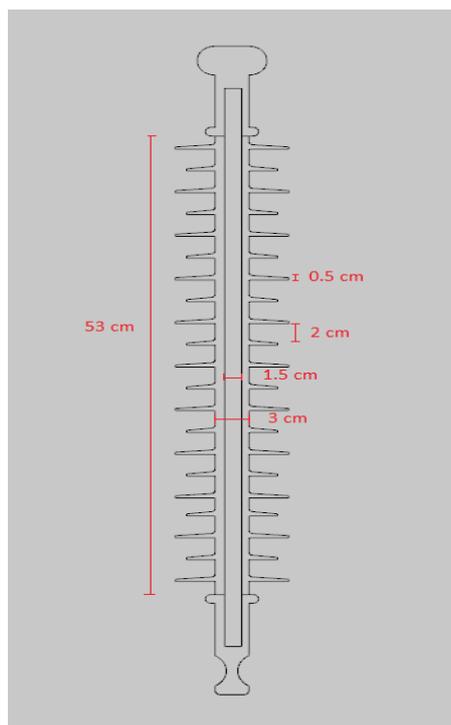
O isolador que foi considerado nesse estudo foi um isolador polimérico padrão de 69 kV, similar ao apresentado na Figura 4.1. O isolador possui 21 aletas, 11 maiores e 10 menores, com diâmetro de, respectivamente, 5 cm e 4 cm, e espessura de 5 mm. O material utilizado no isolamento é a borracha de silicone. Aço forjado é utilizado para os terminais de alta tensão e terra. O núcleo, é feito de fibra de vidro (RODURFLEX, 2016b). As dimensões detalhadas e a geometria do isolador modelado são apresentadas na Figura 4.2.

Figura 4.1 – Isolador polimérico de suspensão.



Fonte – RODURFELX, 2016b.

Figura 4.2 – Modelo 2D do isolador.



Fonte – Própria do autor.

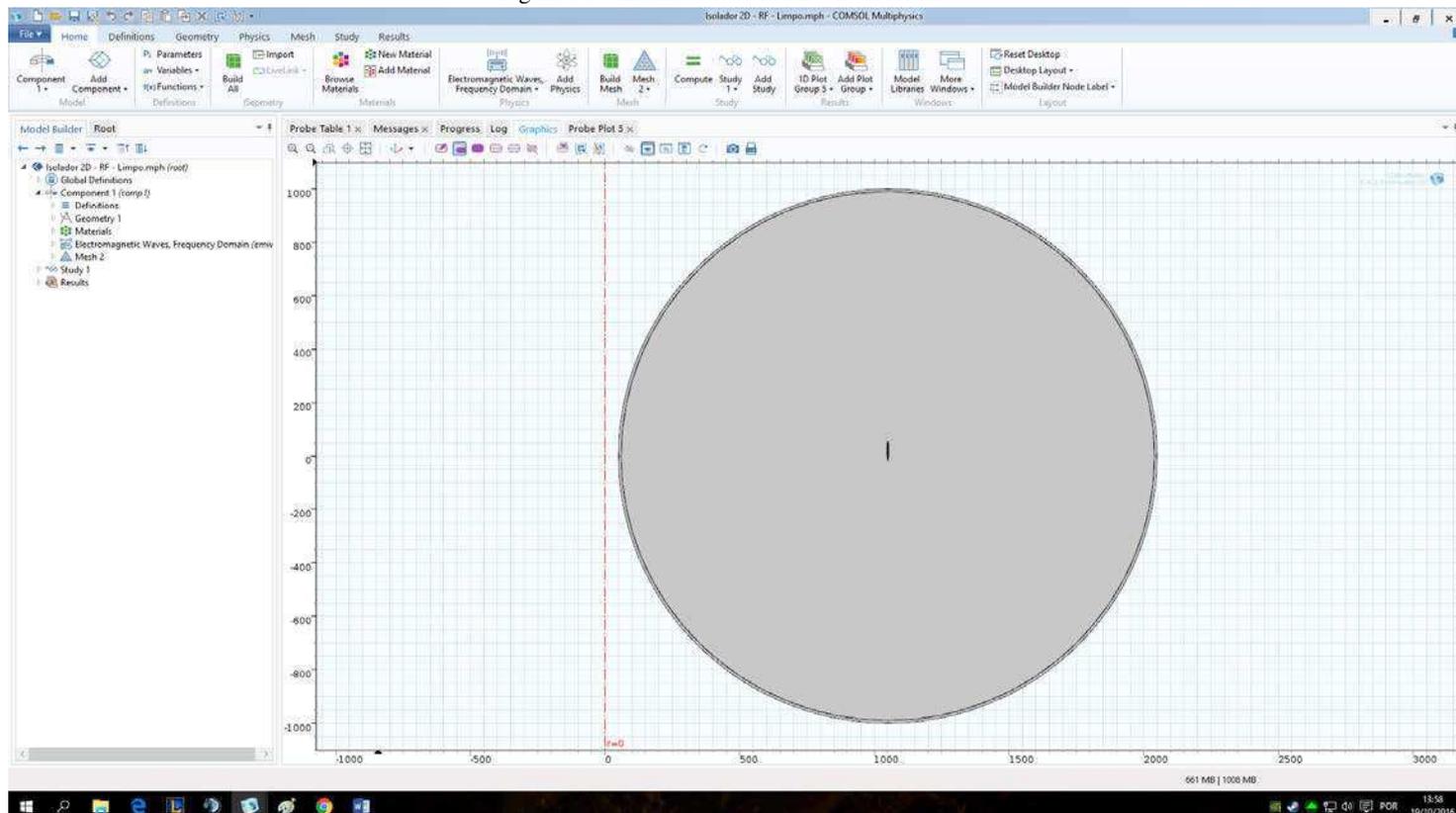
A modelagem do isolador e a simulação do seu comportamento em uma linha de transmissão foram realizadas utilizando o *software* COMSOL Multiphysics versão 4.4. A simulação foi feita em três estágios: 1) pré-processamento, 2) resolução e 3) pós-processamento. No estágio de pré-processamento são inseridas como entrada: a estrutura geométrica, o material, as condições de contorno, o critério para *meshing* e as outras componentes do problema físico. O modelo matemático é executado no estágio de resolução. Por fim, no estágio de pós-processamento, é possível gerar gráficos das variáveis, ou parâmetros, que se deseja analisar.

4.2. COMSOL

O COMSOL é uma plataforma computacional (*software*) utilizada para modelar, projetar e analisar vários problemas multifísicos. Ele também permite ao usuário importar arquivos CAD que podem ser usados para propósitos de simulação ou design de objetos no ambiente computacional. O COMSOL consiste de um grande número de módulos como rádio frequência, ac/dc, micro fluidos, transferência de calor e muitos outros. Esse *software* permite alterações no material, valores iniciais, modificação de design e estudo comparativo das propriedades dos isoladores estudados (KRISHNAN, 2012).

Para o modelo 2D do isolador, foi usado o módulo de rádio frequência. Nessa simulação, foi analisado o comportamento do isolador na faixa de frequência de 1 MHz a 2 GHz. A escolha da faixa de frequência a ser analisada foi baseada nos estudos feitos por Pedro (2016), que classificaram com sucesso os isoladores a partir do espectro irradiado para a faixa 10MHz a 2 GHz. Na Figura 4.3, pode ser visualizada a interface do COMSOL utilizada para modelar o isolador.

Figura 4.3 – Interface COMSOL – Isolador 2D.



Fonte – Própria do autor.

4.3. Simulação e Análise dos Resultados

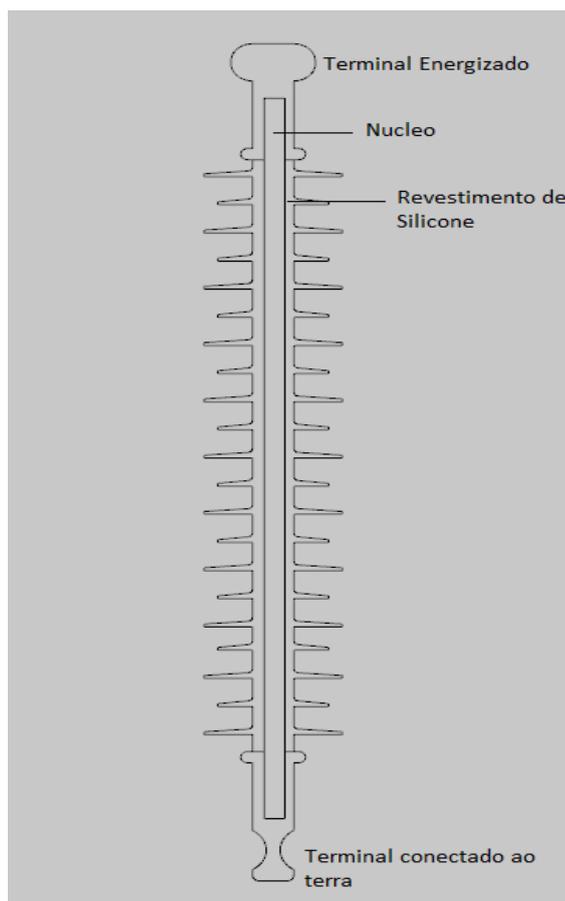
Para compreender como foi realizada a simulação, essa seção tem como objetivo mostrar, de maneira simplificada, o processo realizado para que seja possível utilizar a simulação para obter os resultados desejados.

4.3.1. Simulação Isolador 2D

- Modelo do isolador simulado

O modelo do isolador, disponível em RODURFLEX (2016b), foi criado utilizando a ferramenta de desenho AutoCad. Como a estrutura do isolador possui um formato cilíndrico, a modelagem pode ser simplificada para um problema bidimensional (2D) no lugar de uma modelagem tridimensional (3D). Essa simplificação pode reduzir a memória e o tempo de processamento utilizados, sem afetar a acurácia dos resultados da simulação. Os detalhes do modelo 2D do isolador é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Detalhes do modelo 2D do isolador.



Fonte – Própria do autor.

- Propriedades dos materiais

Cada região do modelo foi especificada de acordo com as propriedades dos materiais descritos na seção 4.1. Para ambos materiais dielétricos, borracha de silicone e núcleo, foi atribuída uma baixa condutividade, $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-14}$ S/m e suas permitividades relativas são, respectivamente, $\epsilon_r = 4,3$ e $\epsilon_r = 7,1$ (ABD-RAHMAN, 2012). No trabalho de Abd-Rahman (2012), o valor da permitividade relativa da camada de poluição típica é considerado $\epsilon_r = 7,5$. Para verificar a influência do grau de poluição nos resultados, também foram utilizados como valor da permitividade relativa $\epsilon_r = 15$ e $\epsilon_r = 30$. Para todos os casos, a condutividade da camada de poluição foi definida $0,6 \mu\text{S/m}$ (WILLIAMS, 1999). A camada de poluição foi distribuída de forma homogênea ao longo da superfície do isolador, com uma espessura de $0,5 \text{ mm}$ (ABDEL-SALAM, 1987). O ar que envolve o isolador foi especificado com uma condutividade baixa, $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-15}$ S/m (ABD-RAHMAN, 2012). As propriedades dos materiais utilizados para a modelagem do isolador nesse estudo são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedade dos materiais.

Material	Permitividade Relativa, ϵ_r	Condutividade, σ (S/m)
Aço Forjado	1,0	$5,9 \cdot 10^7$
Núcleo	7,1	$1,0 \cdot 10^{-14}$
Borracha de Silicone	4,3	$1,0 \cdot 10^{-14}$
Camada de Poluição	7,5/15/30	$6,0 \cdot 10^{-7}$
Ar	1,0	$1,0 \cdot 10^{-15}$

Fonte – Adaptado de ABD-RAHMAN,2012; WILLIAMS,1999 e ABDEL-SALAM,2012.

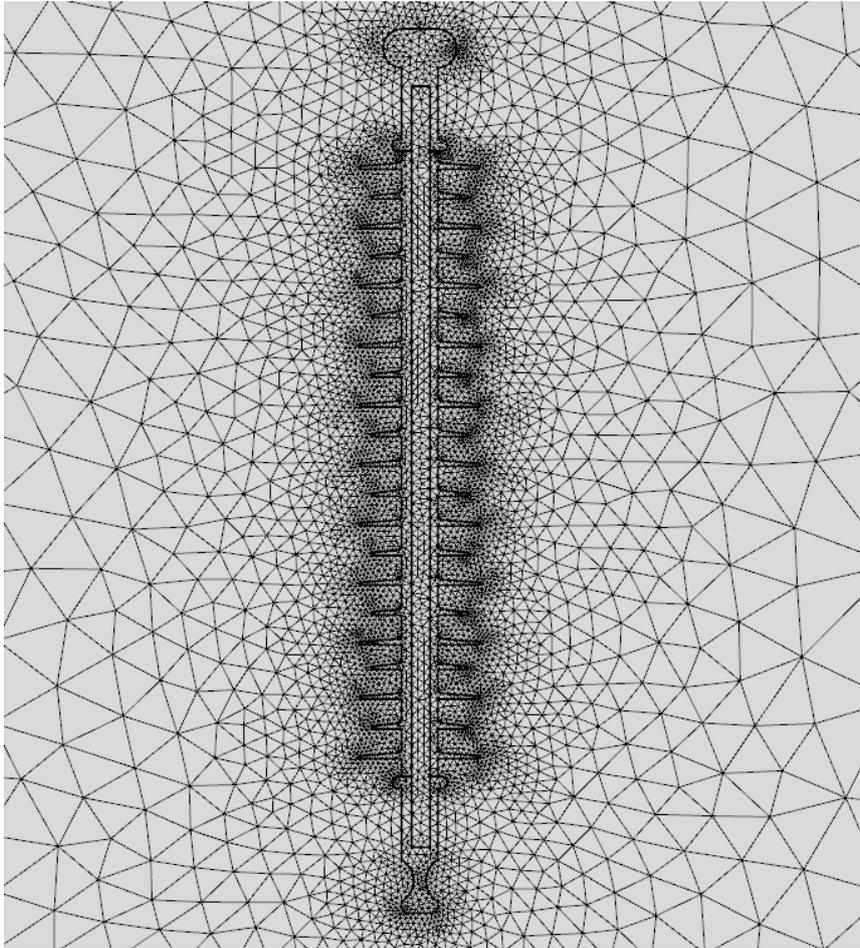
- Condições de contorno

O terminal superior de alta tensão foi energizado com uma tensão de 69 kV, enquanto o terminal inferior foi conectado ao terra, considerando assim o isolador sob condições normais de operação. Seguindo sugestões feitas pela equipe de suporte do COMSOL, para evitar a reflexão das ondas eletromagnéticas no interior do modelo é preciso que o ar que envolve o isolador seja feito grande o suficiente para minimizar o seu efeito na distribuição dos campos ao longo do modelo analisado e, aos limites da região que delimita o ar, seja atribuída a condição de contorno que assume zero corrente externa e fontes eletromagnéticas, representando assim um espaço aberto isolado. Para representar uma camada de poluição, foi sugerido pelo suporte que fosse atribuída aos limites da camada de silicone a condição de contorno de transição, com espessura definida pelo usuário.

- *Meshing*

Depois de completar a fase inicial com a estrutura do modelo, bem como especificar as propriedades dos materiais e condições de contorno, todo o problema do domínio foi discretizado em elementos triangulares durante o processo de *meshing*. Para melhorar a precisão dos resultados da simulação, foi realizado um refinamento do *meshing* na região de interesse através do aumento do número de elementos da malha ao longo da superfície do isolador. O refinamento que resulta em um tamanho de elemento reduzido pode ser visto a partir do *meshing* concentrado ao longo da superfície do isolador, tal como ilustrado na Figura 4.5. A escolha do número de elementos da malha é importante, e deve ser equilibrado, já que um número menor de elementos da malha pode reduzir a precisão dos resultados da simulação, enquanto elementos excessivos levar a um alto consumo de memória e tempo de processamento. Um número otimizado proporciona um tempo de cálculo mais rápido sem comprometer a precisão do resultado.

Figura 4.5 – Discretização do isolador com mesing refinado ao longo da superfície.



Fonte – Própria do autor.

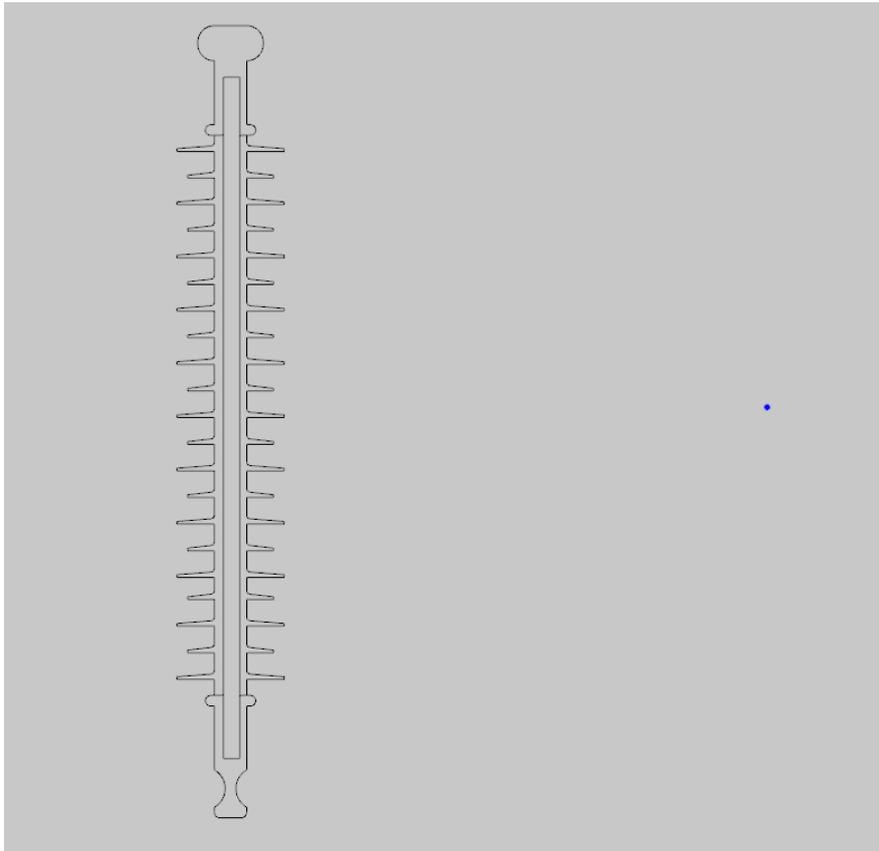
Como foi mencionado na subseção 2.3, os isoladores se comportam de forma semelhante às antenas quando submetidos à alta tensão. Sabe-se que a energia pode ser transportada de um ponto a outro por meio de ondas EM. A taxa de transporte dessa energia pode ser obtida a partir das equações de Maxwell e é dada por (SADIKU, 2004):

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial y}{\partial x} \int_v \left[\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int_v \sigma E^2 dv \quad (4.1)$$

A expressão $\vec{E} \times \vec{H}$ é conhecida como vetor de Poynting \vec{P} dado em W/m^2 . Essa expressão representa o vetor densidade de potência instantânea associada com o campo EM em um dado ponto (SADIKU, 2004).

Foi definido um ponto prova para analisar o comportamento da densidade de potência dentro da faixa de frequência que se estende de 1 MHz a 2 GHz. A Figura 4.6 mostra o ponto prova definido a uma distância de 1 m do isolador.

Figura 4.6 – Distância do ponto prova em relação ao isolador.

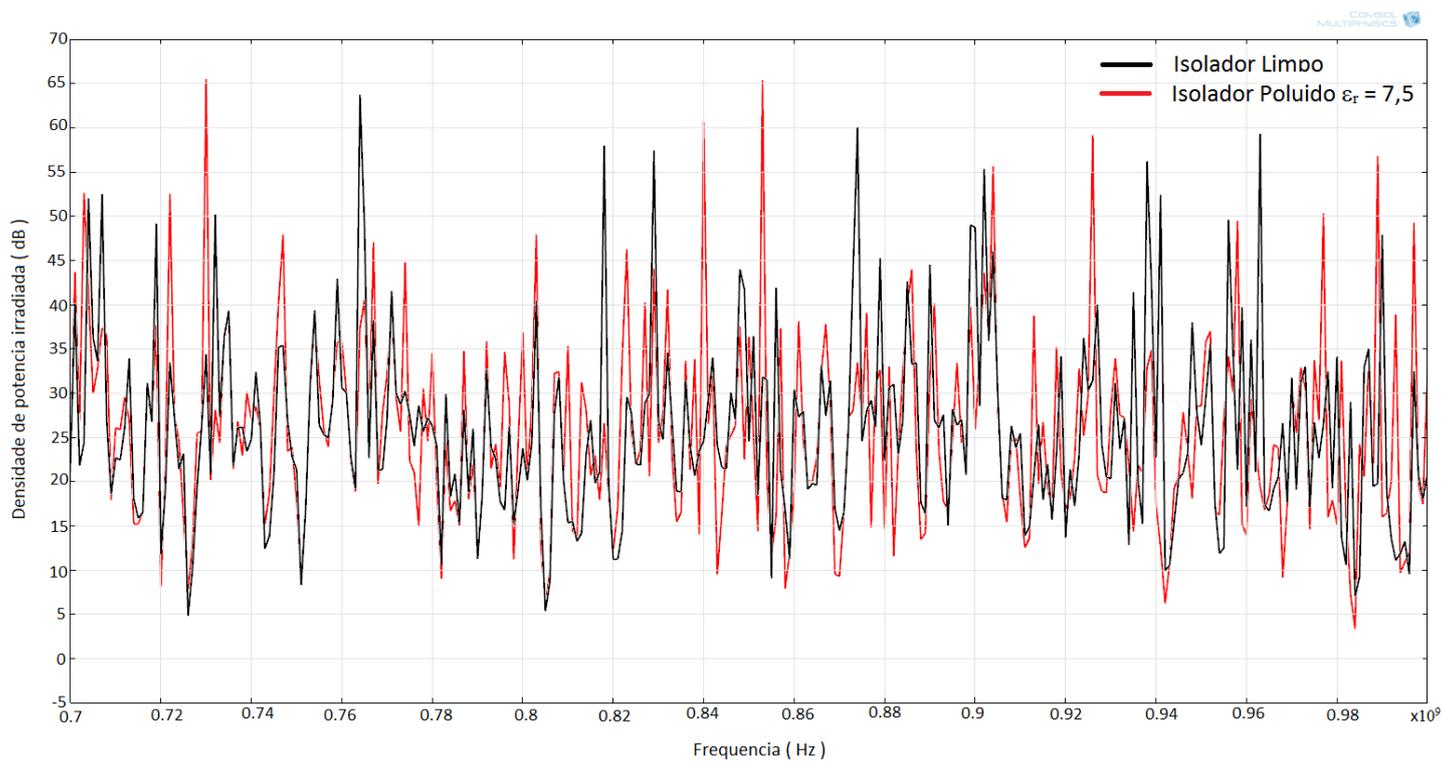


Fonte – Própria do autor.

4.3.2. Análise dos Resultados

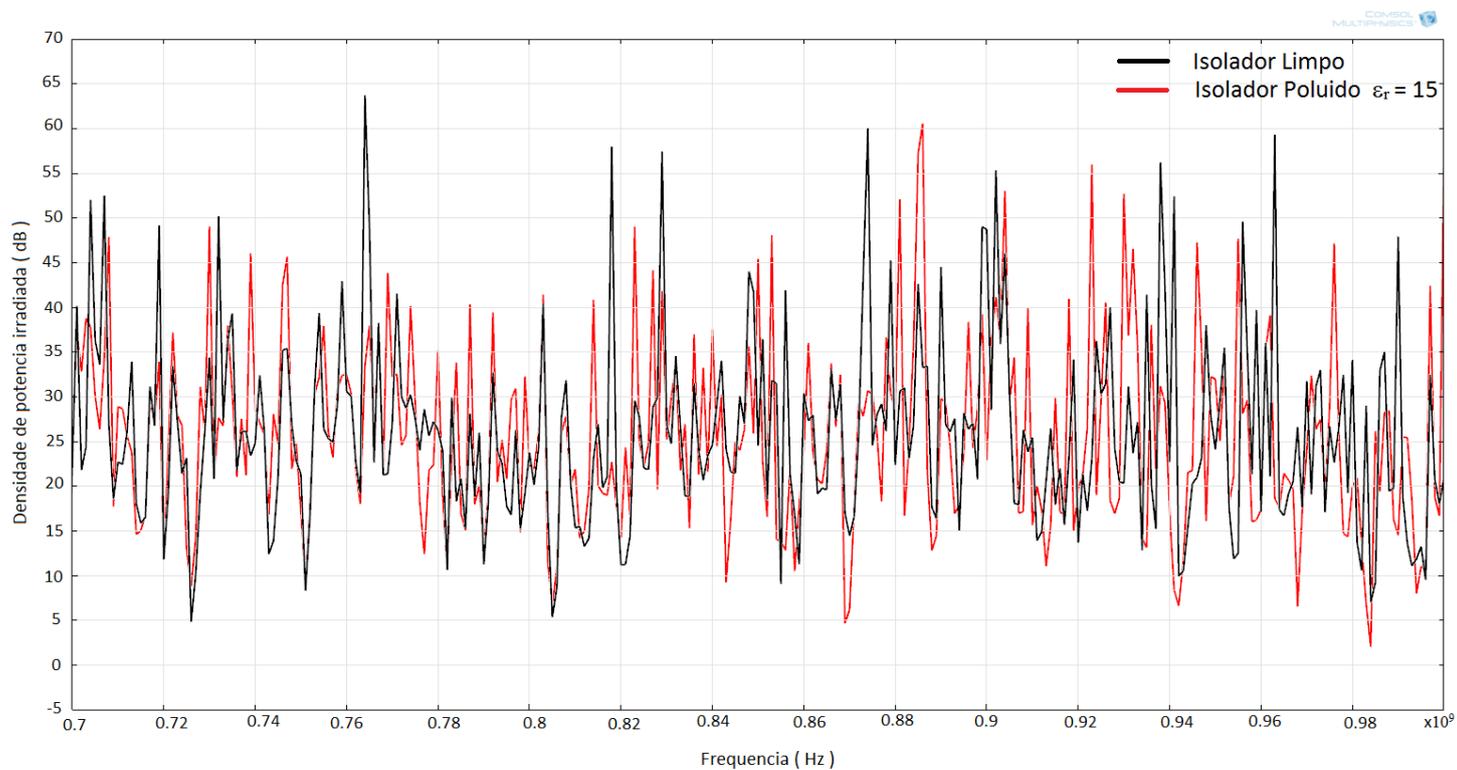
Foram obtidos resultados da densidade de potência em função da frequência para diferentes níveis de poluição simulados. Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 podem ser vistos os gráficos comparativos da densidade de potência entre o isolador limpo e com diferentes níveis de poluição na faixa de frequência de 700 MHz a 1 GHz. Poder ser visto, a partir do ilustrado nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, que os isoladores poluídos possuem uma assinatura espectral diferente da do isolador limpo, e tal informação reflete a severidade do nível de poluição a que o isolador está submetido. Dessa forma, a poluição influencia em como o mesmo se comportará quando submetido a uma alta tensão, alterando o espectro eletromagnético.

Figura 4.7 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 7,5$.

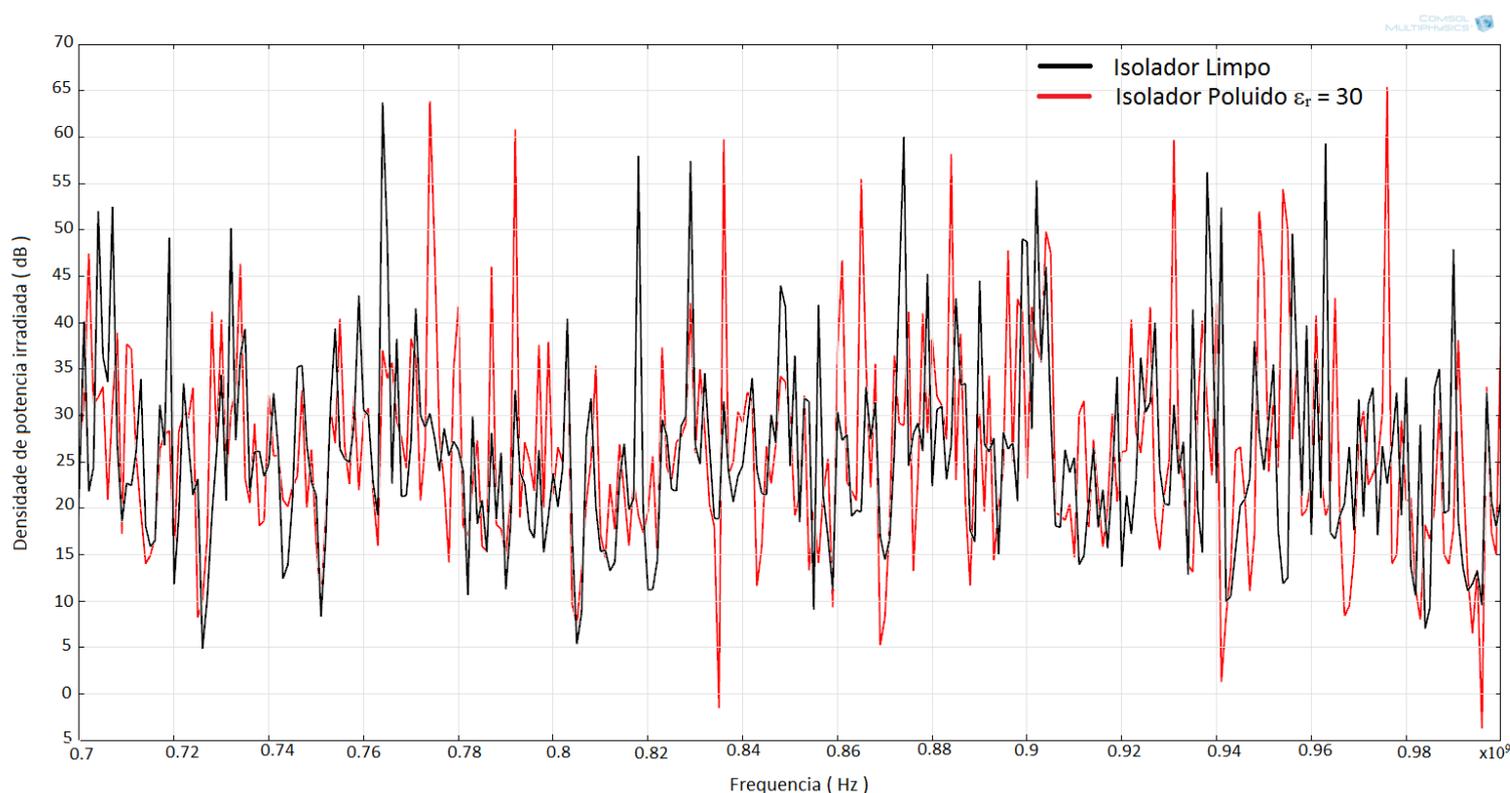


Fonte – Própria do autor.

Figura 4.8 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 15$.



Fonte – Própria do autor.

Figura 4.9 – Densidade de potência: Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 30$.

Fonte – Própria do autor.

Uma análise similar foi feita nos trabalhos de Rocha (2015) e Fontgalland (2015), onde, na análise, foi estudado o espectro eletromagnético irradiado por isoladores de vidro. Foram propostas análises baseadas na utilização de RNA (Rocha, 2015) e dos coeficientes de correlação e normalidade (Fontgalland, 2015) para diferenciar o isolador de vidro limpo do poluído.

A partir da análise do espectro irradiado pelos isoladores nesses trabalhos, os isoladores de vidro limpo e poluídos possuem diferentes espectros irradiados. Isso permite assumir a hipótese de que, assim como foi feita com sucesso a análise e classificação do espectro irradiado para os isoladores vítreos, também deve ser possível utilizar o espectro dos isoladores poliméricos para classificá-los de acordo com o nível de poluição. Com a utilização de processamento estocástico do sinal e utilização de um método de classificação deve ser possível extrair informações suficientes para a classificação do isolador polimérico quanto ao seu estado de poluição.

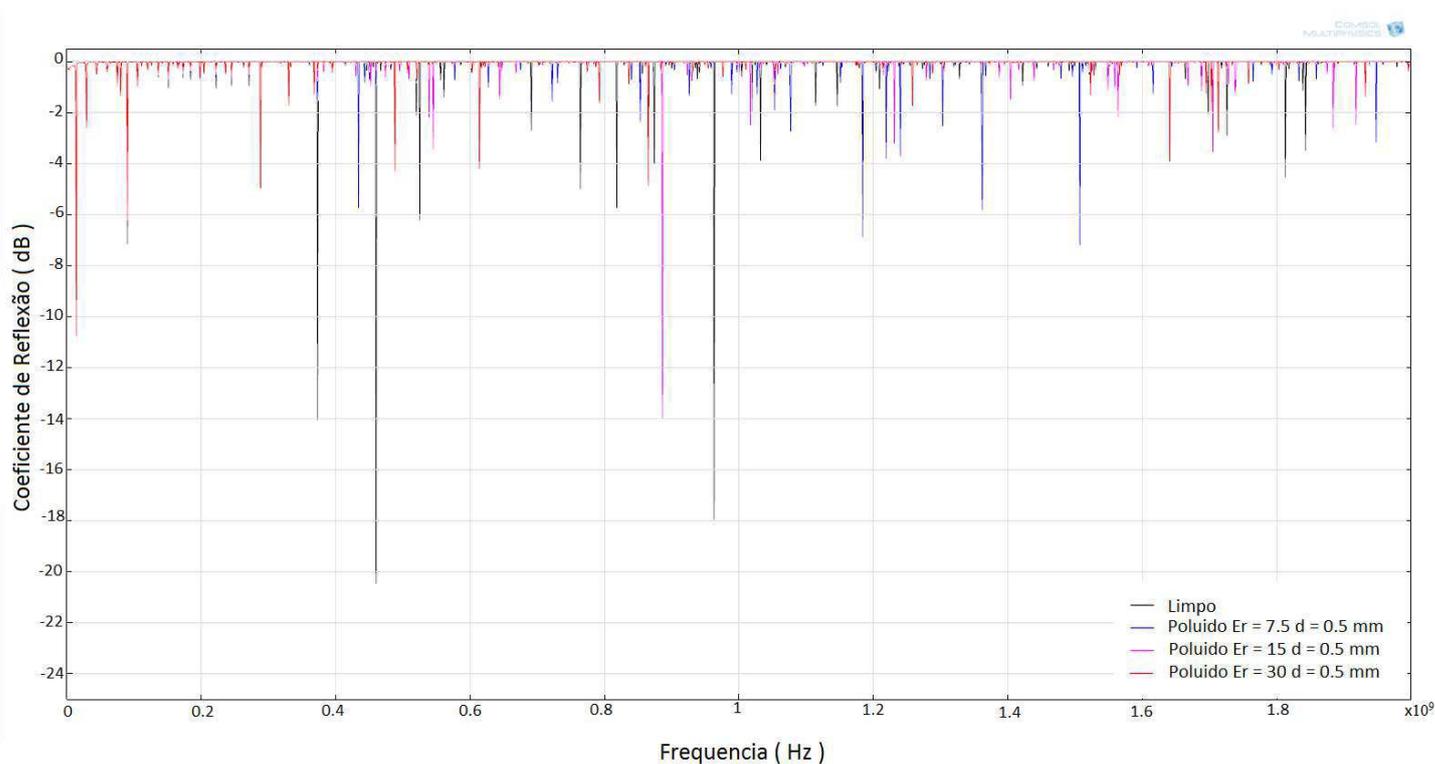
Caso tal procedimento seja utilizado nos sinais obtidos a partir da simulação, também pode-se assumir que seria possível classificá-los, uma vez que, assim como nos testes realizados em isoladores reais, os isoladores poluídos simulados possuem um espectro eletromagnético diferente do isolador limpo.

- Coeficiente de Reflexão - Parâmetro S11

S11 representa quanto da potência recebida é refletida pela antena, e é conhecido como coeficiente de reflexão. A partir do coeficiente de reflexão, pode-se determinar quais faixas de frequência a antena consegue irradiar maior nível de potência (BEVELACQUA, 2009).

Foi obtido um gráfico comparativo do coeficiente de reflexão para o isolador limpo e com diferentes níveis de poluição, apresentado na Figura 4.11, para encontrar em quais faixas de frequência uma maior potência de sinal é irradiada. A partir dessas faixas, é possível determinar dentre elas, quais são as melhores faixas de frequência para realizar processamento do sinal com o intuito de determinar o grau de poluição. A análise feita foi baseada no fato de que a espessura prática da camada de poluição nos isoladores é considerada 0.5 mm (WILLIAMS, 1999).

Figura 4.11 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído ϵ_r Variável.



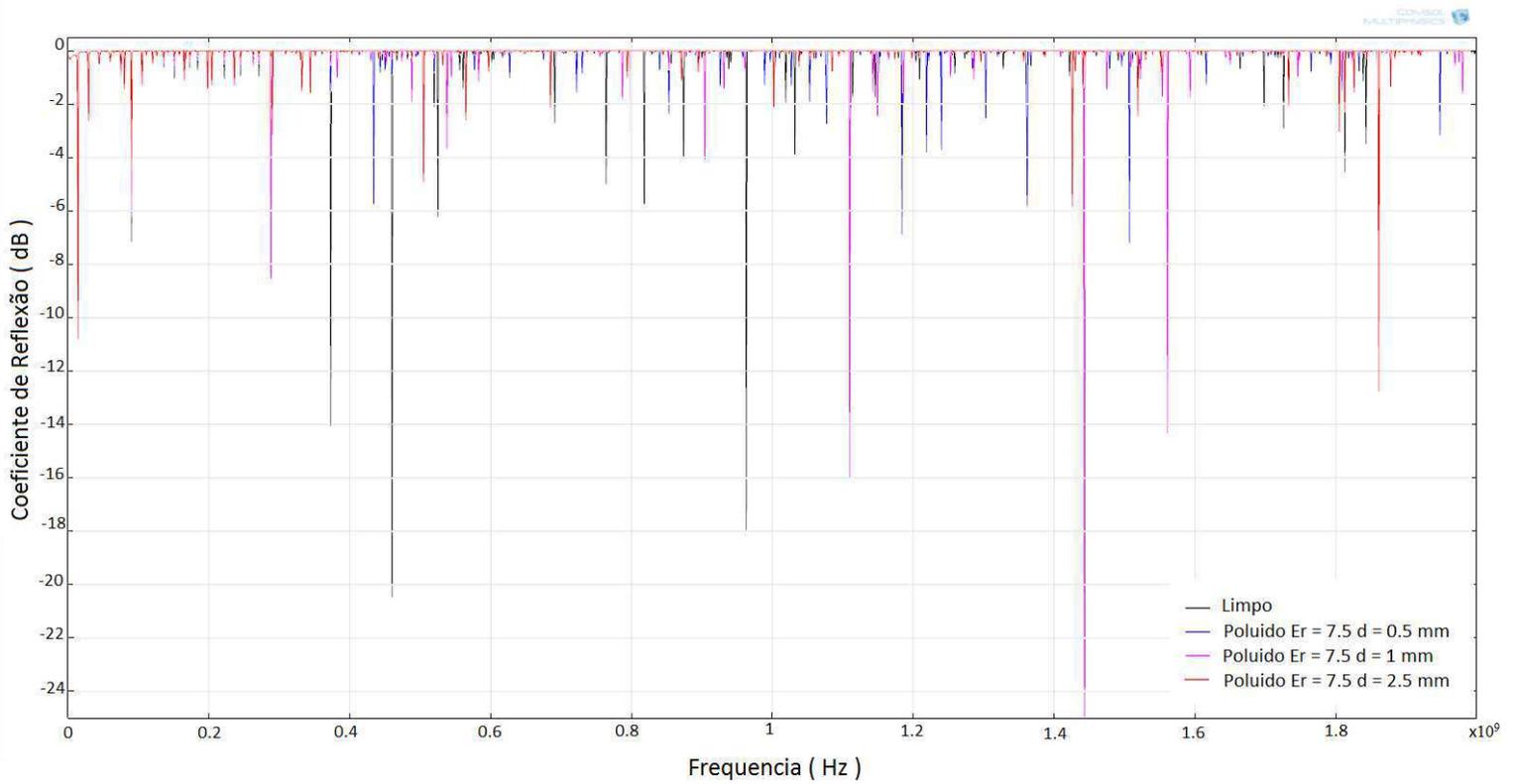
Fonte – Própria do autor.

Como esperado, uma vez que já foi visto que há diferenças no espectro eletromagnético, pode-se constatar que a poluição também exerce influência sobre a distribuição do coeficiente de reflexão dentro da faixa de frequência sobre observação.

Sabendo que para valores do coeficiente de reflexão menores que -3dB mais de 50% da potência é irradiada e analisando como esse parâmetro está distribuindo para os vários níveis de poluição, pode-se ver que a faixa de frequência que se estende de 1 MHz a 100 MHz, 300 MHz a 600 MHz e 800 MHz a 1,1 GHz apresentam valores do coeficiente de reflexão que indicam uma possível faixa de irradiação para ambos isoladores limpo e poluído. Também é observado que, na maioria dos casos, para ambas as classes de isolador, limpo ou poluído, o isolador limpo irradia com maior intensidade. Essa possível faixa de irradiação é comprovada nos trabalhos com isoladores de vidro feitos por Rocha (2015 e 2016) e Fontgalland (2015), onde é feita com sucesso a classificação dos isoladores limpos e poluídos, analisando o espectro eletromagnético na faixa de 10 MHz a 1 GHz.

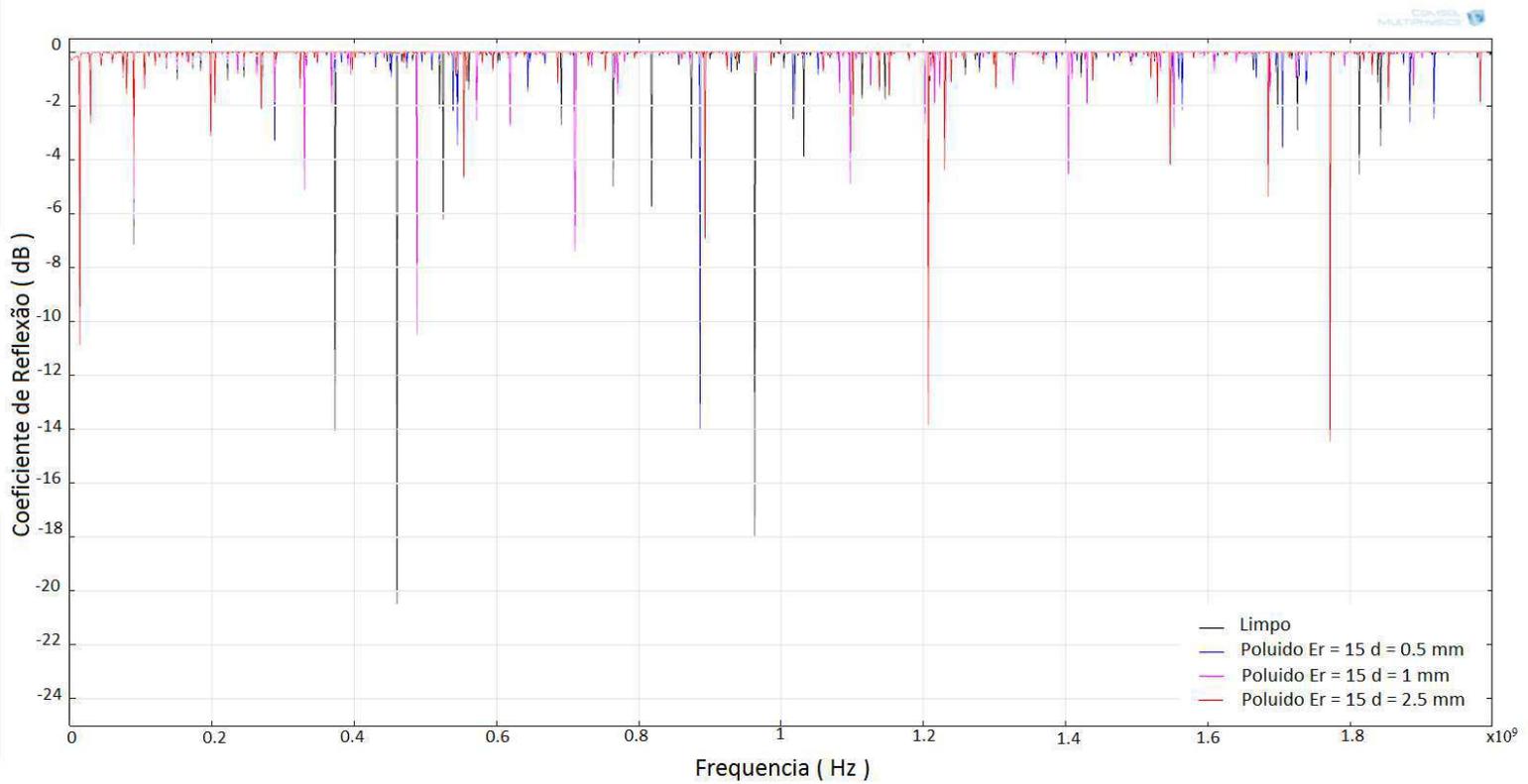
Foi analisado também o efeito da espessura da camada de poluição no coeficiente de reflexão, como mostram as Figuras 4.12 a 4.14. Pode-se observar que, para todos os níveis de poluição analisados, o aumento da espessura da camada de poluição ocasiona em uma alteração da distribuição do coeficiente de reflexão ao longo do espectro de frequência e no aumento dos níveis de irradiação dos isoladores poluídos. É possível verificar também que, para cada nível de poluição simulado, os isoladores apresentam frequências de ressonância distintas. Tal fato permite a formulação de um método de classificação de isoladores baseado no coeficiente de reflexão.

Figura 4.12 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 7.5$ Espessura variável.

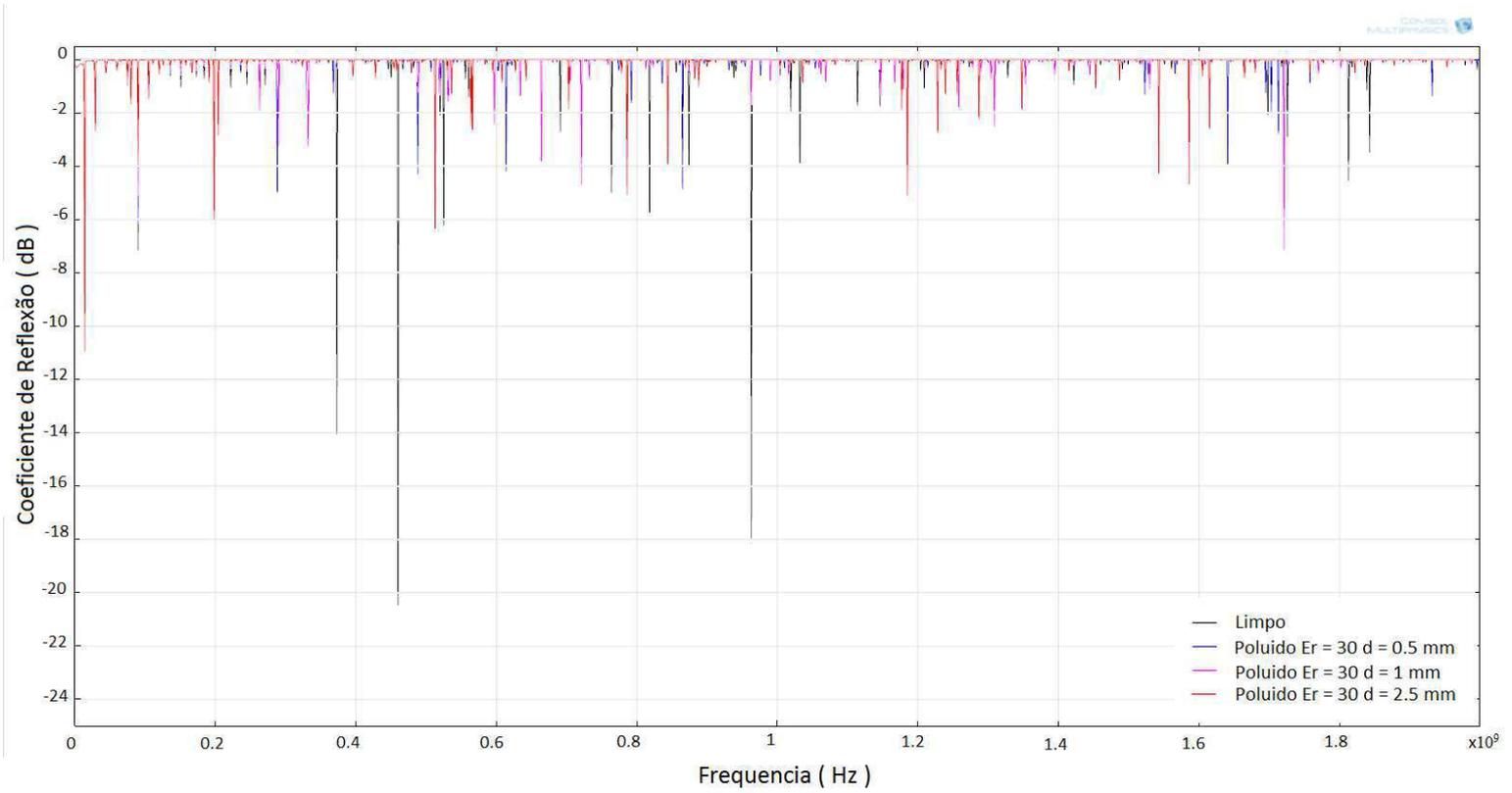


Fonte – Própria do autor.

Figura 4.13 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 15$ Espessura Variável.



Fonte – Própria do autor.

Figura 4.14 – Coeficiente de Reflexão Isolador Limpo x Isolador Poluído $\epsilon_r = 30$ Espessura Variável.

Fonte – Própria do autor.

Considerando os valores de poluição simulados, foi escolhida a frequência para a qual o isolador limpo consegue irradiar maior nível de potência e que seja possível projetar uma antena de microfitas de tamanho reduzido (≈ 963 MHz). Os valores do coeficiente de reflexão, para cada nível de poluição nessa frequência, são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Coeficiente de reflexão para diferentes níveis de poluição considerando a frequência aproximada de 963 MHz.

Nível de Poluição	Coeficiente de Reflexão (dB)
Limpo	-18
$\epsilon_r = 7,5$, $d=0,5$ mm	-0,0006187
$\epsilon_r = 7,5$, $d=1$ mm	-0,000433
$\epsilon_r = 7,5$, $d=2,5$ mm	-0,00227
$\epsilon_r = 15$, $d=0,5$ mm	-0,000478
$\epsilon_r = 15$, $d=1$ mm	-0,000423
$\epsilon_r = 15$, $d=2,5$ mm	-0,000509
$\epsilon_r = 30$, $d=0,5$ mm	-0,000416
$\epsilon_r = 30$, $d=1$ mm	-1,712
$\epsilon_r = 30$, $d=2,5$ mm	-0,0003553

Fonte – Própria do autor.

Como pode se observar, a partir da Tabela 4.2, para cada valor de poluição, os isoladores apresentam um valor distinto para o coeficiente de reflexão na frequência analisada. Seria possível, portanto, após realizar a medição do espectro irradiado por um isolador em operação, obter os valores do coeficiente de reflexão para a frequência de referência, comparar os resultados com os valores obtidos a partir de simulação e verificar em que classe, poluído ou limpo, o isolador se encontra. Utilizando os valores das simulações descritos na Tabelas 4.2, um isolador que, por exemplo, possua um coeficiente de reflexão baixo para a faixa de frequência próxima a 963 MHz seria considerado limpo, e um isolador que apresentasse valores maiores que um certo limite, seria considerado poluído.

É evidente, entretanto, que para se obter maior acurácia com a classificação dos isoladores, seria necessário não só a utilização de um número maior de frequências de referência, mas também a delimitação de níveis de poluição aceitáveis para os quais os isoladores ainda se encontrariam em condições de operação.

5. Conclusão

Neste trabalho foram realizadas simulações com o objetivo de analisar o comportamento espectral do isolador polimérico quando submetido a alta tensão. Para realização da simulação, foi utilizado o modelo do isolador polimérico submetido a 69 kV. Após a realizar algumas simulações, foi visto que o *software* escolhido, COMSOL, possui as ferramentas necessárias para se obter e analisar o espectro eletromagnético irradiado pelo isolador.

Um resultado positivo da análise feita neste trabalho foi que, assim como o esperado, os isoladores poliméricos irradiam sinais eletromagnéticos diferentes dependendo do nível de poluição a que o mesmo está submetido. Tal resultado é similar aos obtidos em publicações que identificaram o nível de poluição em isoladores de vidro a partir do espectro irradiado. Essa similaridade entre os resultados obtidos através de simulação e os resultados obtidos a partir de testes em laboratório sugere que deve ser possível fazer uma análise desse espectro irradiado e classificar o isolador polimérico quanto ao estado de conservação.

Outro resultado obtido com as simulações realizadas trata da utilização do coeficiente de reflexão como critério para identificar o nível de poluição. Foi visto, a partir dos resultados gerados pelo simulador que, para diferentes níveis de poluição, os isoladores possuem valores baixos para o coeficiente de reflexão para uma determinada frequência de referência. A escolha dessa frequência como referência e uma posterior comparação dos coeficientes de reflexão obtidos entre os isoladores simulados pode ser uma ferramenta poderosa na identificação do nível de poluição dos isoladores.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir do que foi pesquisado e dos resultados obtidos, como possíveis temas de trabalhos futuros podem ser sugeridos:

- Aumentar a quantidade de níveis de poluição analisados e verificar se o método é capaz de classificá-los.
- Analisar o espectro eletromagnético e coeficiente de reflexão para níveis de poluição para os quais o isolador se encontra em condições de operação.

- Investigar a possibilidade de utilizar o método de classificação para frequências maiores, o que acarretaria na diminuição do tamanho da antena.
- Investigar se é possível utilizar o método de classificação para isoladores com tensões de operação maiores que 69 kV e isoladores vítreos ou cerâmicos.
- Empregar o método proposto para classificação de isoladores poliméricos poluídos em laboratório.

6. Referências Bibliográficas

BARROS, R. M. R.; FERREIRA, T. V.; GUEDES, E. C. Determining optimal positioning ring Equalizer in Polymeric Insulation. *Energética*, vol. 34, n. 2, pp. 89-97. 2013

BEVELACQUA, P. J. S Parameters. Disponível em: <<http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>> Acesso em 12 de outubro de 2016

BEZERRA, J. M. B.; *Caracterização de Atributos de Sinais para Utilização de Técnicas de Reconhecimento de Padrões na Avaliação do Isolamento de Instalações e de Equipamentos Elétricos*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2004.

BEZERRA, J. M. B. et al. Application of Pattern Recognition Techniques to non-Invasive Insulation Monitoring. *Conference Record of the 2008 IEE International Symposium on Electrical Insulation*. Vancouver. p. 96 – 99. 2008.

BRAGA, D. C. P. Estudo de Técnicas de Processamento de Sinais de Radiointerferência Aplicados a Isoladores de Alta Tensão. *Revista Semente*, p. 214-228, 2011.

CAMINHA, A. C. *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*. São Paulo: Edgar Blucher LTDA, 1997. 210 p.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF). SILT Sistema de Informações de Linhas de Transmissão. Recife: CHESF, 2001, [s.p.].

CHARTIER V. L., SHERIDAN, R. DIPLACIDO, J. N., LOFTNESS, M. O. Electromagnetic Interference Measurements at 900 MHz on 230-kV an 500-kV transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* vol.1, Abril., p. 140–149, 1986.

CHAURASIA, D. C. Scintillation Modeling for insulator String under Polluted Conditions. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 4. p. 224-227, 1999.

CAPELINI, R. M. et al. Localização de cadeias de isoladores danificadas em linhas de transmissão através da análise de descargas parciais de corona. *XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012*. Campina Grande, p. 4581-4587, 2012.

COLLIN, R. E. *Foundations for Microwave Engineering*, 2. ed., IEEE Press, 924 p. 2001.

D. L. WILLIAMS, A. Haddad, A. R. Rowlands, H. M. Young, and R. T. Waters, Formation and characterization of dry bands in clean fog on polluted insulators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, n.1 pp. 724-731, 1999.

EPPERTLY; HEBERLEIN, EADS, Thermography, a tool for reliability and safety. *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol.5, p. 28-32, 1999.

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

FERREIRA, T. V. *Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos*. Universidade Federal de Campina Grande. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

FLORENTINO, M. T. B.. *Análise de sensibilidade do método dos vetores de energia dos centroides das sub-bandas espectrais aplicado ao monitoramento de isoladores poliméricos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2015.

FONTGALLAND, G Normality and Correlation Coefficient in Estimation of Insulators' Spectral Signature. *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, vol. 22, n. 8, Agosto de 2015

FONTGALLAND, G.; SILVA, E. M.; BEZERRA, J. M. B.; NERI, M. G. G.; VALLE, R. R. M.; DE MELO, M. A. B. On the behavior of Electromagnetic interference measured from glass insulator. *The 10th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, Winnipeg, Manitoba, Canada. p. 301 – 304. ISBN-0-9692563-9-6. 2004.

GORUR, R. S.; BURNHAM, J. T.; CHERNEY, E. A. *Outdoor Insulators*. 1. ed. Phoenix: Ravi S. Gorur Inc., 1999.

GUEDES, C. P. G. *Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV e a lógica FUZZY*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

HALL, J.F. History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 8, n.1, Pages: 376 – 385. Janeiro. 1993.

HACKAM, R. Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 6 N. 5, pp. 557-585, Outubro. 1999.

KRISHNAN, R. Electric Field Analysis of High Voltage Insulators, *International Journal of Computer Science and Informatics ISSN*. Vol.1, n.4, pp. 2231 –5292, 2012.

KHALIFA, M. et al. A new monitor for pollution on power line insulators: Part 2: Simulated field tests. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Cairo, v. 135, n. 1, p. 24-30, janeiro. 1988.

LAURETTA, J. L. A Novel Sensing Device for Power System Equipment Condition Monitoring. *Energytech IEEE*, 2013.

LEITE, L. R. P. ; YANAGUIZAWA, J. A. ; SHINOHARA, A. H. ; Xavier, G. J. V. ; COSTA, E. G. ; MACIEL, D. A. . Avaliação da tensão disruptiva de cadeias de isoladores de vidro com unidades danificadas em atmosfera de ar e gás SF₆. *Congresso Latinoamericano de Generation y Transporte de Energia Eléctrica*. v. 1. p. 1-5. Mar Del Plata. 2005

LEITE L.R.P, YANAGUIZAWA J.A., SHINOHARA A.H., XAVIER G.J.V., COSTA, E.G., MACIEL, D.A. Avaliação Experimental das Tensões de Disrupção nas Cadeias de Isoladores de Vidro Parcialmente Danificadas por Vandalismo. *IEEE/PES T&D2004 Latin América*, São Paulo. 2004.

MORA, N. D. *Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Foz do Iguaçu, 2010

MARCELINO, D. A. Setor Elétrico: Um Estudo Sobre a Estratégia do Segmento de Geração de Energia Elétrica do Brasil. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, p. 01 - 14. Rezende, 2006.

M. ABDEL-SALAM and E. K. Stanek, Optimizing Field Stress on HighVoltage Insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 22, pp. 4756, 1987.

MOORE, P. J. Remote Diagnosis of Overhead Line Insulation Defects. *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE. 2004.

MOURA, E.; LEITE, A.; ALBERT, B.; FALCÃO G.; FONTGALLAND G.; Reading the RF spectrum of insulators for classification of pollution levels, *16th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*. Quebec, Canada, p 319 – 320. 2013.

MONTICELLI, A. & GARCIA, A. *Introdução aos sistemas de energia elétrica*. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2003.

NERI, M. G. G. *Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande 2005.

NIGRI, A. I. Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção. *XVSNPTEE– Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Foz do Iguaçu, PR, 1999.

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

PEREIRA, L. A. Método dos Elementos Finitos 2D Aplicado ao Eletromagnetismo, Disponível em: <http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D_Eletromagnetismo.pdf> Acesso em 12 de outubro de 2016

PYLARINOS, D.; et al. Classification of surface condition of polymer Coated Insulators using Wavelet Transform as Neural Networks. *Proceedings of the IEEE 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. p. 658 – 663. China. 2007

PEREIRA, O. J. B. A. Introdução ao Método dos Elementos Finitos na Análise de Problemas Planos de Elasticidade. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/ae2/IMEFAPPE.pdf>> Acesso em 12 de outubro 2016.

QUEIROZ, M. B. Estudo da Corrosão nos Componentes Metálicos dos Isoladores de Vidro das Linhas de Transmissão de Alta Tensão, *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Florianópolis, 2014.

ROCHA, P. H. V. *Classificação Dos Isoladores de Vidro de Alta Tensão a partir do Espectro Eletromagnético Irradiado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2014.

ROCHA, P. H. V. Caracterização do espectro eletromagnético irradiado de isoladores poliméricos de 230 kV sob poluição artificial. *The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE*. 2015.

ROCHA, P. H. V. Classificação de isoladores vítreos a partir do espectro de RF irradiado. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal. 2016.

RODURFLEX; The history of RODURFLEX® – quite a long story covering more than 3 decades. Disponível em: <https://www.lappinsulators.com/fileadmin/user_upload/RodurflexCatalog.pdf> Acesso em 12 outubro de 2016.

RODURFLEX; The history of RODURFLEX® – quite a long story covering more than 3 decades. Disponível em: <<https://www.lappinsulators.com/products/composite-insulators/rodurflex-suspension-insulators/?L=2>> Acesso em outubro de 2016.

R. ABD-RAHMAN. Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators Using Zinc Oxide Microvaristor Composites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 19, n. 2; Abril. 2012.

R. SALUSTIANO, R. M. Capelini, S. R. de Abreu, M. L. B. Martinez, I. C. Tavares, G. M. F. Ferraz, M. A. A. Romano. Development of New Methodology for Insulators Inspections on Aerial Distribution Lines Based on Partial Discharge Detection Tools. *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference*. 2014

SILVA, H. A. B., *Utilização da Frequência de 915 MHz para Monitoramento e Supervisão de Isoladores Poliméricos Classe de Tensão de 500 KV*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campina, 2012.

SHAHARYAR, A. Classification of Defects in Ceramic Insulators using Partial Discharge Signatures Extracted from Radio Frequency (RF) Signals. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2014

SHURRAB, I. Y. RF-Based Monitoring and Classification of Partial Discharge on Wet Silicone Rubber Surface. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 20, n. 6; dezembro. 2013.

SADIKU, M. N. O. *Elementos do Eletromagnetismo*. Bookman (3ª ED). p. 694. 2004.

SADIKU, M. N. O. A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 32, n. 2, maio. 1989.

VIEIRA, G. A. B. *Estudo da Viabilidade de Utilização da Técnica de Ultra-som Associada ao Processamento Digital de Sinais (PDS) para Detecção de Pontos Quentes e Equipamentos de Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica, Rio de Janeiro. 2008.

YANAGUIZAWA, J. A.; SHINOHARA, A. H. Isolamento mínimo em cadeias de isoladores de vidro danificados por vandalismo em linhas de transmissão. *Cientec - Revista de Ciência, Tecnologia e Humanidades do IFPE* v. 03, n. 01, p.132-142, Recife, 01 Julho. 2011.

ZHAO, TIEBIN; BERNSTORF, R.A.; Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 14, n.2, p. 26 – 33. março. 1998.