

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ANDRÉ LUIZ FERREIRA GOMES
MARCO ANTONIO DE CARVALHO MOREIRA GUIMARÃES
THIAGO CASTANHA DE AZEVEDO**

**O USO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS EM LINHAS DE ENERGIA
ELÉTRICA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2022**

**ANDRÉ LUIZ FERREIRA GOMES
MARCO ANTONIO DE CARVALHO MOREIRA GUIMARÃES
THIAGO CASTANHA DE AZEVEDO**

**O USO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS EM LINHAS DE ENERGIA
ELÉTRICA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA**

**The use of polymeric insulators in electric power lines: a comparative
analysis**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia de Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Dr. Eng. Emerson Rigoni

**CURITIBA
2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANDRÉ LUIZ FERREIRA GOMES
MARCO ANTONIO DE CARVALHO MOREIRA GUIMARÃES
THIAGO CASTANHA DE AZEVEDO**

**O USO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS EM LINHAS DE ENERGIA
ELÉTRICA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 09 de junho de 2022

Prof. Dr. Emerson Rigoni
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

*"Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos quando os criamos".
(Albert Einstein)*

RESUMO

O trabalho pretende apresentar uma análise comparativa do uso de isoladores poliméricos em linhas de transmissão de energia elétrica. Sabe-se, no entanto, que as principais causas de interrupções em linhas de transmissão de energia elétrica estão relacionadas as correntes de fuga em isoladores, que podem ser causadas pelas degradações do material, condições climáticas, ambientais e a poluição. Devido a isso, é preciso que sejam otimizadas as tecnologias referentes aos isoladores, visando melhorar seu desempenho nas linhas de transmissão de energia elétrica e assim adquirir melhor confiabilidade diante das mais diversas condições. Considerando além disso, os vários fatores relevantes que fazem parte da construção destas linhas, dentre elas a escolha do condutor mais apropriado, a estrutura das torres, o devido isolamento com as partes não elétricas, dentre outros, é que se tem a necessidade do descobrimento de novas tecnologias para esses isoladores, para que seja possível realizar manutenções periódicas visando um processo de otimização e segurança. Na análise comparativa é perceptível que o isolador polimérico apresenta maiores benefícios quanto sua utilização, quando comparado com os isoladores de vidro e porcelana que são utilizados a muito mais tempo no mercado. Com isso, é esperando que o mesmo apresente um desempenho que permita evitar falhas e interrupções. Por fim, observou-se que a escolha adequada do material isolante e tipo de isolador é imprescindível para a boa operação das linhas de transmissão de energia elétrica.

Palavras-chave: Isoladores. Linhas de Transmissão. Energia Elétrica.

ABSTRACT

This paper intends to present a comparative analysis of the use of polymeric insulators in electric power transmission lines. It is known, however, that the main causes of interruptions in electric power transmission lines are related to leakage currents in insulators, which can be caused by material degradation, climatic and environmental conditions and by the pollution. Due to this, it is necessary to optimize the technologies for insulators, in order to improve their performance in power transmission lines and thus acquire better reliability under the most diverse conditions. Furthermore, considering the various relevant factors that are part of the construction of these lines, such as the choice of the most appropriate conductor, the structure of the towers, the proper insulation with non-electrical parts, among others, there is a necessity of finding new technologies for these insulators, so that it is possible to perform periodic maintenance aiming at an optimization and safety process. In the comparative analysis it is noticeable that the polymeric insulator presents greater benefits regarding its use, when compared to the glass and porcelain insulators that have been used for a longer time in the market. With this, it is expected that it will present a performance that will avoid failures and interruptions. Finally, it was observed that the proper choice of the insulator material and type of insulator is essential for the proper operation of electrical power transmission lines.

Keywords: Insulators. Transmission lines. Electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de cargas em dielétricos polarizados.	16
Figura 2: Distância de escoamento.	19
Figura 3: Descarga superficial sob tensão de descarga a seco.	20
Figura 4: Diagrama elétrico para medição de rádio interferência de um isolador.....	21
Figura 5: Cadeia de isoladores de vidro.	24
Figura 6: Diagrama de forças do vidro temperado.	25
Figura 7: Isolador concha-bola e suas partes constituintes.....	28
Figura 8: Isolador de vidro tipo disco aerodinâmico.	28
Figura 9: Isolador do tipo disco antipoluição.	29
Figura 10: Gráfico de relação entre a espessura e a tensão de perfuração.....	30
Figura 11: Triângulo de composição da porcelana.....	32
Figura 12: Isoldor do tipo roldana.....	36
Figura 13: Isolador do tipo pino.	37
Figura 14: Isolador de suspensão ou disco.....	38
Figura 15: Isolador de suspensão conectados em série.	38
Figura 16: Isolador suspensão conectados em série do tipo bastão.....	38
Figura 17: Isolador do tipo pilar.	38
Figura 18: Isolador do tipo castanha.	39
Figura 19: Isolador tipo pino de polimérico.....	40
Figura 20: Elementos do isolador polimérico.....	42
Figura 21: Cadeia polimérica do polietileno.....	44
Figura 22: Isolador polimérico do tipo pilar.....	48
Figura 23: Isolador de suspensão ou ancoragem.	49
Figura 24: Gráfico das perdas dielétricas dos isoladores de vidro.	51
Figura 25: Vantagens e desvantagens entre isoladores.	53
Figura 26: Porcentagem aproximada de cada tipo de isolador nas LT's.	55
Figura 27: Falhas por tipo de isolador.	56
Figura 28: Média anual dos desligamentos permanentes por Km de linha.	57
Figura 29: Incidência de tipos de defeito do isolador que causam falhas.	57
Figura 30: Número de desarmes da proteção entre 2012 e 2016.....	59
Figura 31: Número total de desarmes de proteção ao longo do dia (2012 e 2016)...	59
Figura 32: Número de desarmes de proteção ao longo do dia.	60

Figura 33: Número total de desarmes de proteção em 2014 ao longo de 50 km da subestação UPME.....	61
Figura 34: Número total de desarmes de proteção em 2015 ao longo de 50 km da subestação UPME.....	61
Figura 35: Número total de desarmes de proteção em 2016 ao longo de 50 km da subestação UPME.....	61
Figura 36: Resumo dos custos dos componentes de uma linha de Transmissão.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre os diferentes tipos de isoladores.....	54
Tabela 2: Quantidade aproximada de isoladores instalados.	55
Tabela 3: Número de isoladores instalados de acordo com a tensão.	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2 PROBLEMA.....	12
1.3 PREMISSAS	12
1.4 OBJETIVOS.....	13
1.4.1 Objetivo Geral.....	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	13
1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA	14
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2. MATERIAIS ISOLANTES	16
2.1 ISOLADORES.....	17
2.1.1 Distância de Escoamento	18
2.1.2 Tensão de Descarga a Seco e Sob Chuva	19
2.1.3 Tensão de Rádio interferência	20
2.1.4 Tensão Suportável 1 Minuto a Seco a Frequência Industrial.....	21
2.1.5 Tensão Crítica de Descarga Sob Impulso de 1,2 x 50 μ s	22
3. TIPOS DE ISOLADORES	23
3.1 ISOLADORES DE VIDRO	23
3.1.1 Composição Química e Processo de Fabricação de Isoladores de Vidro ..	24
3.1.2 Hidrofobicidade e Desgastes dos Isoladores de Vidro	26
3.1.3 Tipos de Isoladores de Vidro	27
3.2 ISOLADORES DE PORCELANA.....	29
3.2.1 Composição Química e Processo de Fabricação de Isoladores de Porcelana.....	31
3.2.2 Hidrofobicidade do Isolador de Porcelana	34
3.2.3 Desgastes do Isolador de Porcelana	35
3.2.4 Tipos de Isoladores de Porcelana.....	36
3.3 ISOLADORES POLIMÉRICOS	39
3.3.1 Processo de Fabricação e Composição Química dos Isoladores Poliméricos	41
3.3.2 Hidrofobicidade do Isolador Polimérico.....	45
3.3.3 Desgastes do Isolador Polimérico	46

3.3.4 Tipos de Isoladores Poliméricos	48
4. ANÁLISE COMPARATIVA.....	50
4.1 NORMAS EXISTENTES E APLICAÇÕES.....	63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS.....	68
ANEXOS	72

1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão de energia elétrica, no contexto nacional, são predominantemente aéreas e se estendem por longas distâncias devido à grande extensão territorial do Brasil. Entre os principais componentes de linhas aéreas, estão inclusos os materiais condutores e isoladores elétricos. Apesar de que os materiais condutores são o fator principal do projeto e implementação de linhas, o desempenho elétrico dos materiais isoladores também é um fator preponderante para a confiabilidade dos sistemas de distribuição (CAPELINI, 2015; LOPES, 2016; XAVIER, 2017).

Alguns dos métodos para redução dos índices de falhas pelas concessionárias de energia elétrica no Brasil, tem sido a preocupação referente a aspectos preventivos e de manutenção. Com o objetivo de assegurar a continuidade de fornecimento de energia e bom funcionamento das linhas de transmissão de energia elétrica, é necessário realizar monitoramentos preventivos e manutenções antecipadas para prevenir falhas (LOPES, 2016; XAVIER, 2017).

Sendo assim, as relações econômicas e de confiabilidade relacionadas ao projeto das linhas de transmissão de energia elétrica e distribuição, exigem a aplicação de isoladores com o maior custo-benefício possível, pois isso permite agregar segurança ao sistema em relação a falhas por corrente de fuga, causadas pela degradação de materiais isolantes (MAMEDE FILHO, 2019; PEREIRA, 2020).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Delimita-se o tema no propósito de comparar as características físicas, assim como as diferentes consequências de utilização dos isoladores de vidro, porcelana e poliméricos em linhas de transmissão de energia de alta, média e baixa tensão. A competitividade e a conseqüente redução de custos exigem isoladores de tensão com o maior custo-benefício possível, e que agreguem segurança ao sistema, além de maior confiabilidade. Sendo assim, os critérios de comparação entre os isoladores visam sua capacidade de resistência tanto a tração quanto a poluição e hidrofobicidade, além de analisar sua manutenção, local mais utilizado e melhor desempenho nos projetos de linhas de transmissão de energia elétrica.

Portanto, a pesquisa utilizará de trabalhos realizados anteriormente a presente

data, pois se faz necessário tais informações acerca dos diferentes tipos de isoladores, para que seja possível comparar o intervalo de manutenção, confiabilidade, peso e disponibilidade no mercado desses isoladores.

1.2 PROBLEMA

Pereira (2020) aponta que dentre as principais causas de interrupção em linhas de transmissão de energia elétrica, estão inclusas as correntes de fuga em isoladores causadas pela degradação dos materiais e intensificadas pelas condições de ambiente, como por exemplo, poluição e condições atmosféricas. Considerando que os índices de falhas ediminuição de confiabilidade das redes de transmissão estão principalmente relacionados as interrupções, há necessidade técnica de otimizar o projeto de isoladores na direção de melhorar as condições de isolamento, mesmo sob condições adversas. Isso permite evitar falhas e interrupções, o que é um fator economicamente prejudicial para concessionárias e consumidores (MAMEDE FILHO, 2019; MELLO, 2017; MENDONÇA, 2013; LIRA, 2013).

Com isso, pretende-se responder tal problema de pesquisa: Qual seria a tecnologia de construção de isoladores que minimiza as interrupções em linhas de transmissão de energia? Tal pergunta se desdobra ao estudo comparativo visando apontar as vantagens e desvantagens das tecnologias atuais de fabricação de isoladores aplicados em redes de transmissão de energia elétrica.

1.3 PREMISSAS

Os materiais isoladores têm como principal aspecto de projeto e escolha, a suportabilidade a tensões de operação. Por outro lado, também devem ser previstas situações de falta e sobretensões, porque estas situações podem degradar o desempenho dos isoladores. Portanto, a escolha dos isoladores deve garantir boas condições de operação, sem provocar interrupções devido a degradação de materiais sob condições diversas (CAPELINI, 2015).

Diante do exposto, percebeu-se a possibilidade de se realizar uma análise a partir das seguintes premissas: a) qual seria o material, para construção do isolador, que melhor atenda aos padrões de qualidade, segurança e economia necessários à operação segura das linhas de transmissão. b) Qual tecnologia de fabricação de isoladores seria mais adequada para minimizar as correntes de fuga? c) Quais seriam

as características físico-químicas mais adequadas para a construção de isoladores com alta capacidade dielétrica e confiabilidade? d) Qual seria o isolador que reúne as melhores características de custo-benefício?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo investigativo do impacto da utilização de isoladores poliméricos em linhas de transmissão de energia elétrica em comparação com os isoladores de porcelana e vidro.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os isoladores, abordando de forma abrangente seus tipos, classificações e aplicações;
- Comparar os isoladores de acordo com tipo e classificação;
- Analisar as vantagens e desvantagens dos isoladores com intuito de entender os impactos técnicos e econômicos de sua utilização nas linhas de transmissão de energia elétrica.

1.5 JUSTIFICATIVA

Com o imenso e expansivo sistema de linhas de transmissão presente no país, com uma baixa economia individual de cada poste, seja pelo custo do material, pelo valor reduzido das manutenções, melhor segurança da rede ou vida útil do equipamento, pode nos trazer uma rede mais confiável com menos desligamentos e conseqüentemente uma economia de grande escala tanto a curto quanto a longo prazo. Esse estudo nos permitirá otimizar linhas em todo o país.

Há uma certa escassez de informações cruzadas a respeito dos isoladores e materiais isolantes empregados na fabricação destes, ou seja, é possível encontrar informações a respeito destes produtos e materiais em catálogos de fabricantes por exemplo, contudo estes, pouco ajudam a discernir as melhores situações para o uso deste ou daquele material ou produto. Tendo isso em consideração torna-se necessário realizar este trabalho visando criar uma possibilidade de melhor análise para escolha do material que atenda os padrões de qualidade, segurança e

econômico.

1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA

Buscando atingir o objetivo principal da pesquisa que é proporcionar um conhecimento detalhado sobre a aplicação de diferentes tipos de isolantes em uma linha de transmissão, apresentando quais equipamentos são de fundamental importância para garantir o bom funcionamento e a segurança do sistema, é que se pensou em utilizar o método qualitativo baseado em pesquisas e análises bibliográficas.

Nesse sentido, a pesquisa é considerada como um procedimento que permite um sistema reflexivo, controlado e crítico que visa a descoberta de fatos ou dados em qualquer área do conhecimento, sendo considerado algo próprio da natureza humana, pois estamos em constante busca por conhecimento. Para a realização desse projeto será utilizada uma abordagem qualitativa com fim exploratório cujo objetivo é “produzir informações aprofundadas e ilustrativas e não se preocupa com representatividade numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização, etc.” (GERHARDT; SILVEIRA, 2009, p.30).

O referido trabalho terá como base a análise bibliográfica, que como explica Gil (2002, p.44), “[...] a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Sendo assim, é preciso ter cuidado durante a elaboração, definindo primeiramente o problema de pesquisa e o objetivo geral, conforme realizado. Pesquisar é explorar e tem por objetivo descobrir e interpretar os fatos que estão inseridos em uma determinada realidade. A escolha da bibliografia ideal para o aporte teórico do artigo, terá sustentação em livros físicos, artigos, leituras de livros com consultas em acervos digitais e pesquisas sobre o assunto buscadas no google acadêmico.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Dessa forma, o trabalho apresenta a seguinte divisão: a primeira parte do trabalho visa apresentar o que são materiais isolantes, bem como suas características e formas de utilização. Posteriormente, serão apresentados os principais isoladores utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica, sendo eles isoladores de vidro, porcelana e poliméricos, destacando suas características, utilização, fabricação,

composição e desgastes. Por fim, será realizado o estudo comparativo visando apontar as vantagens e desvantagens desses isoladores, comparando-os entre si, além de utilizar-se de artigos e pesquisas acadêmicas para poder avaliar o impacto econômico da utilização desses isoladores e possivelmente mensurar o impacto de sua utilização bem como da sua manutenção.

2. MATERIAIS ISOLANTES

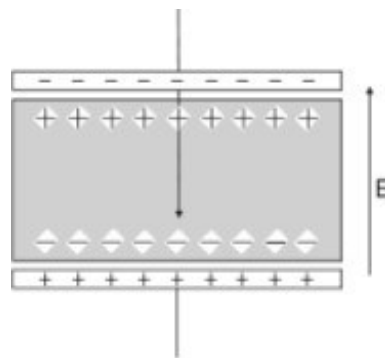
A proposta aqui apresentada trata dos principais materiais isolantes aplicados em linhas de transmissão de energia, suas principais características, bem como as formas de utilização, se dão início nesse tópico com a revisão bibliográfica.

Dentre os principais tipos de materiais dielétricos que compõem os isoladores, equipamentos elétricos construídos a partir de materiais isolantes, estão a porcelana vitrificada, o vidro temperado e os compostos poliméricos.

Explica-se que, materiais isolantes, também chamados dielétricos, são aqueles materiais capazes de oferecer resistência considerável à passagem de corrente elétrica através de sua estrutura (SCHMIDT, 2019).

Ao ser imerso numa região na qual há presença de um campo elétrico, o material isolante sofre um fenômeno físico denominada polarização o qual consiste, segundo Schmidt (2019, p. 1), em “um deslocamento reversível dos centros das cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado.” Como se pode verificar na figura 1.

Figura 1: Distribuição de cargas em dielétricos polarizados.



Fonte: Schmidt, 2019

Como é possível observar, na região central do material isolante da figura acima apresentada, percebe-se um espaço não preenchido de cargas, estas encontram-se atraídas justamente pelos polos gerados devido à presença de um campo elétrico. As grandezas físicas que mensuram a capacidade de um material ou meio impedirem a passagem de corrente elétrica em seu interior e superfície são, respectivamente, a rigidez dielétrica e a resistência superficial de descarga (SCHMIDT, 2019).

É evidente que os dielétricos possuem um limite de resistência à passagem de corrente e quando este limite é ultrapassado, o material sofrerá uma modificação

geralmente irreversível de suas propriedades isolantes, e até mesmo das mecânicas na forma de ruptura dielétrica, deformação permanente, modificação estrutural, entre outras (SCHMIDT, 2019). A seguir, serão detalhados os isoladores, suas características e formas de utilização.

2.1 ISOLADORES

Os equipamentos elétricos construídos a partir de materiais isolantes, são chamados de isoladores. Dentre os principais tipos de materiais dielétricos que compõem os isoladores, estão a porcelana vitrificada, o vidro temperado e os compostos poliméricos. O uso e dimensão das cadeias de isoladores deve satisfazer diversas condições como aplicação, tensão de operação, condições ambientais e aplicação em que serão instalados.

Equipamentos como isoladores são essenciais na estrutura de linhas de transmissão aéreas. Por mais que apresentem um custo relativamente baixo quando comparado com o custo total das linhas de transmissão de energia elétrica, os isolantes possuem função crucial no que se diz respeito a confiabilidade do sistema elétrico instalado, sendo responsáveis por uma grande porcentagem de defeitos nos circuitos de tensão elevada.

Os isolantes também possuem função mecânica de suporte e fixação quando instalados nas linhas de transmissão de energia elétrica. É feita a instalação de isolantes suportando as linhas de transmissão de energia elétrica e as estruturas de apoio, isolamento elétrico entre os condutores e as partes ligadas à terra. Este fator é crucial na definição do tipo de material e *design* de um componente isolante (QUARESMA, 2018).

Por serem os componentes mais vulneráveis das linhas e redes elétricas de distribuição, os isoladores são alvos de vandalismo e depredação. Assim, as concessionárias têm investido em campanhas de conscientização com o objetivo de dar fim as ações humanas que danificam os isoladores, pois, estes eventos provocam interrupções da energia elétrica e possuem alto custo de manutenção corretiva (CAPELINI, 2015; LOPES, 2016; XAVIER, 2017).

Sobre sua função mecânica de suporte e sustentação, os isoladores são submetidos à esforços mecânicos de três tipos:

- I. forças verticais, causadas pelo próprio peso dos condutores;

- II. forças horizontais axiais no sentido dos eixos longitudinais das linhas, para que os condutores se mantenham suspensos sobre o solo;
- III. forças horizontais transversais, com sentido perpendicular aos eixos longitudinais das linhas, causadas pela pressão do vento sobre os cabos. (PEREIRA, 2012).

Já sob as necessidades elétricas que estes componentes devem resistir, caracterizam-se as tensões mais elevadas que ocorrem eventualmente em linhas de transmissão de energia elétrica, sendo elas a tensão nominal e sobretensões em frequência industrial, surtos de sobretensão de manobra de curta duração e sobretensões de origem atmosférica, que apresentam tensões variadas que podem ser elevadas (FUCHS, 1977).

Segundo Mello (2017), os isoladores reduzem seu desempenho devido à poluição que se deposita sobre as superfícies isolantes, chegando a formar uma superfície condutora quando submetida a certas condições de umidade, como chuvisco, névoa e orvalho, que causam um aumento considerável no percentual de descargas disruptivas que acontecem nos isoladores. Assim, em sua construção materiais isolantes devem ser projetados de maneira a dificultar que essas descargas disruptivas aconteçam.

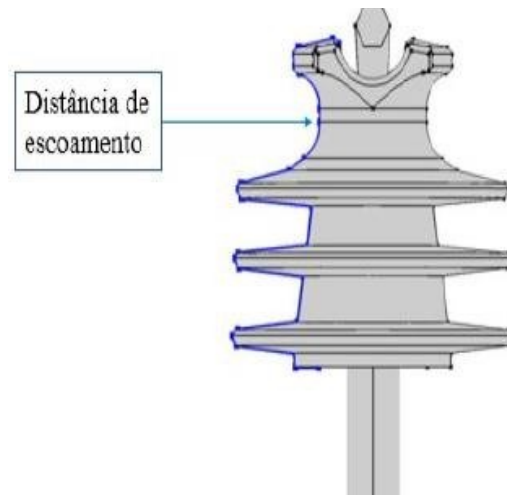
Como exposto acima, os materiais isolantes podem sofrer ruptura dielétrica, o que irá alterar suas propriedades fundamentais, contudo, segundo Mamede Filho (2019), os isolantes empregados em alguns dos equipamentos isoladores são fabricados de tal forma a suportar solicitações elétricas que superam suas propriedades fundamentais e ainda assim retornam à condição dielétrica anterior à descarga. Desta forma, Mamede Filho (2019) classifica os isoladores com capacidade de isolamento autorregenerativo e não regenerativo. Tratando dos isoladores utilizados nas linhas de transmissão de energia elétrica, são considerados do tipo autorregenerativo.

Em relação às características elétricas que constituem os isoladores Mamede Filho (2019) apresenta 6 diferentes parâmetros elétricos principais destes equipamentos. Os quais, serão apresentados e detalhados a seguir.

2.1.1 Distância de Escoamento

Dentre as características elétricas que constituem os isoladores, seguindo os parâmetros elétricos principais, está a distância de escoamento, que é conceituada da seguinte forma: “a distância medida entre o ponto de contato metálico energizado e o ponto de fixação do isolador, considerando todo o percurso externo entre os dois pontos.” (MAMEDE FILHO, 2019, p.632). Como se pode observar na figura 2.

Figura 2: Distância de escoamento.



Fonte: Revista Principia, 2019

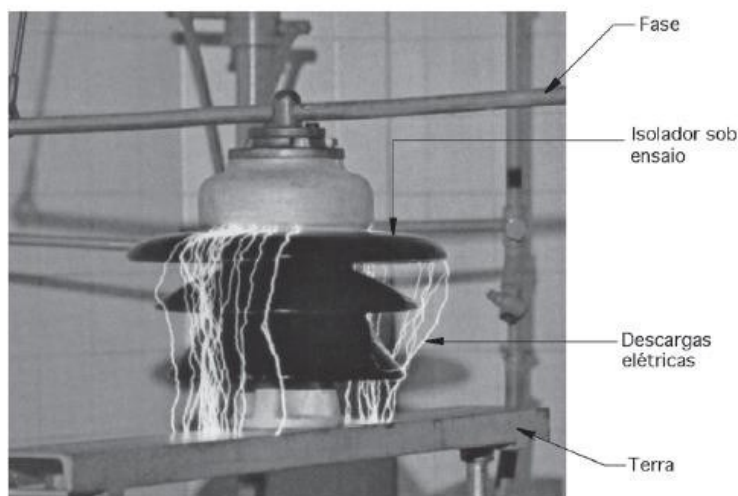
Sendo assim, caracteriza-se por distância de escoamento a menor distância ou a soma das distâncias ao longo do contorno da superfície externa do corpo isolante do isolador, entre as partes condutoras que normalmente são submetidas à uma tensão de operação do sistema, conforme ilustrado na figura acima. A distância de escoamento é um requisito de projeto que deve ser especificado e atendido.

2.1.2 Tensão de Descarga a Seco e Sob Chuva

Seguindo os procedimentos da NBR 6936 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, ao se aplicar, em laboratório, uma tensão elétrica com o equipamento seco (ou molhado dependendo do tipo de ensaio), limpo e sujeito à temperatura ambiente, a partir de um determinado valor de tensão, será possível verificar a presença de descargas elétricas pela sua superfície externa, também chamadas de descargas do tipo contornamento (MAMEDE FILHO, 2019; QUEIRÓS, 2013).

A figura 3, demonstra o momento em que ocorre uma descarga sobre um isolador durante um ensaio.

Figura 3: Descarga superficial sob tensão de descarga a seco.



Fonte: Mamede Filho, 2019

Corroborando com a ideia de Mamede Filho (2019), Xavier (2017) explica também que caracteriza-se como falha no ensaio quando a tensão de descarga a seco obtida no ensaio for inferior a 95% do valor proposto pelo fornecedor.

O ensaio de tensão de descarga sob chuva é realizado de forma similar ao ensaio a seco, porém, com presença de uma chuva artificial, geralmente de 1 a 2 mm/minuto de vazão de água. Executa-se este ensaio com o isolador montado tanto na posição vertical, como na horizontal. É caracterizada falha no equipamento se o valor de tensão de descarga sob chuva encontrado no ensaio for inferior a 90% do proposto pelo fornecedor do equipamento, e aprovado pelos órgãos reguladores (MAMEDE FILHO, 2019; QUEIRÓS, 2013).

2.1.3 Tensão de Rádio interferência

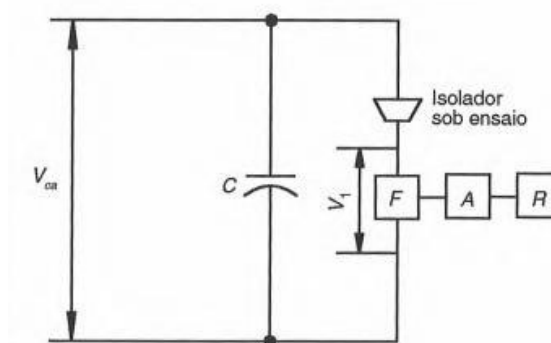
O ensaio apresentado por Mamede Filho (2019), tem como objetivo construir uma curva de tensão vs nível de rádio interferência, a qual, não deve ultrapassar 50 μ V. e para realizá-lo aplica-se uma tensão sobre o isolador entre fase e terra correspondente a 110% de sua tensão nominal, esta é mantida por, ao menos, 5 minutos, sendo posteriormente atenuada em degraus de 10%, para 30% do valor aplicado inicialmente, e, finalmente, elevada ao valor inicial (MAMEDE FILHO, 2019).

A radiointerferência é produzida por pequenas descargas contendo um grande número de harmônicos que provocam a radiação de energia de alta

frequência. Essas descargas não são visíveis nem audíveis. A frequência das radiações pode variar entre 1 MHz e 10 MHz, que corresponde à frequência de ondas de rádio de amplitude modulada (rádio AM). Os receptores localizados próximos às estruturas podem sofrer interferências indesejáveis. Também o efeito corona dos condutores das linhas de transmissão provoca os mesmos fenômenos mencionados anteriormente. (MAMEDE FILHO, 2019, p. 633).

Conforme o exposto, observa-se que a rádio interferência é produzida por pequenas descargas, por conter grande número de harmônicos que provocam radiação de alta frequência, como se pode observar na figura 4, a qual apresenta um diagrama elétrico para medição da rádio interferência de um isolador.

Figura 4: Diagrama elétrico para medição de rádio interferência de um isolador.



Fonte: Mamede Filho, 2019

O objetivo do ensaio de rádio interferência é verificar se os ruídos causados pelos isoladores estão dentro dos limites especificados por norma. Em laboratório, conforme a figura acima, o ensaio de rádio interferência é feito inserindo o isolador em um circuito com um filtro que permite somente a passagem de ondas de alta frequência para a tensão de ensaio, contendo um amplificador e um registrador de medição.

2.1.4 Tensão Suportável 1 Minuto a Seco a Frequência Industrial

A determinação da tensão suportável especificada do isolador consiste em um ensaio que aplica uma tensão eficaz durante 1 minuto, em condições a seco, à frequência nominal do sistema, analisando assim, qual a tensão o isolante consegue suportar durante este período (MAMEDE FILHO, 2019). Esta característica elétrica dos isoladores auxilia na definição de componentes de um projeto.

2.1.5 Tensão Crítica de Descarga Sob Impulso de 1,2 x 50 μ s

Sobre essa característica, apresentada por Mamede Filho (2019), pode-se inferir que se caracteriza pela aplicação de uma tensão de impulso igual a 120% do valor de tensão nominal durante um período de 50 μ s, a um isolador durante um ensaio sem ocorrência de descarga.

A seguir, dando continuidade aos estudos aqui propostos, o próximo capítulo objetiva apresentar os tipos de isoladores, bem como as características presentes em cada um, analisando a importância e a aplicabilidade nos sistemas elétricos.

3. TIPOS DE ISOLADORES

Neste capítulo o objetivo principal é apresentar os tipos de isoladores, suas características e principais aplicabilidades, a pesquisa se deu através de fontes apresentadas na Internet, em sites confiáveis, bem como trabalhos realizados por pesquisadores da área. Conceituando, analisando os principais aspectos, a fim de cumprir com os objetivos determinados.

Atualmente, dentre os principais tipos de isoladores existentes comercialmente, destacam-se os de vidro, cerâmicos e poliméricos. Estes tipos de isoladores destacam-se por suas características mecânicas e elétricas propícias, baixo custo de matéria-prima, processo de fabricação simplificado e elevada rigidez dielétrica.

Os isoladores elétricos são dispositivos utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica e redes de distribuição elétrica. Sua finalidade é garantir o isolamento dos condutores entre as fases e a terra, bem como garantir sustentabilidade e fixação à esforços mecânicos. Sendo assim, os isoladores requerem elevada robustez elétrica e mecânica (MAMEDE FILHO, 2019).

Outro fator crucial para os isoladores é a natureza do material isolante. A sua condutividade será tanto menor quanto menos polar for o material isolante, enquanto a sua condutividade superficial será tanto menor quanto mais liso for o acabamento superficial e limpa a superfície (SCHMIDT, 2019).

3.1 ISOLADORES DE VIDRO

Os isoladores de vidro são caracterizados por um material dielétrico temperado, submetido a uma elevada temperatura e resfriado rapidamente. Apresentam como característica elevada resistência a impactos e compressões, choques térmicos e radiação ultravioleta, mas também, caracterizam-se por um elevado peso. Estes isoladores vêm sendo, cada vez mais utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, porém esses isoladores não são tão utilizados em outras aplicações que envolvem o sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2019).

Devido a sua utilização os isoladores de vidro temperado são equipamentos que entregam alta confiabilidade de operação. Além de apresentar resistência ao clima e poluição, esses isoladores de vidro protegem eletricamente a linha de transmissão da parte não energizada e ajudam na sustentação mecânica de cabos aéreos.

Em relação à aplicação destes isoladores:

Os isoladores de vidro têm conquistado um lugar no mercado das linhas de alta tensão, mas têm pouco significado em outras aplicações no sistema elétrico, como em subestações, onde os isoladores de porcelana representam a grande maioria dos equipamentos (QUEIRÓS, 2013, p. 15).

Silva (2008, p. 6) diz que “as cadeias de isoladores de vidros são largamente utilizadas tanto para isolar os condutores de eletricidade da terra, como suportá-los mecanicamente nas torres das linhas de transmissão.” Como pode-se observar na figura 5:

Figura 5: Cadeia de isoladores de vidro.



Fonte: Oliveira, 2016

Nesse sentido, Silva (2008) explica que eletricamente o isolador se comporta como um capacitor e sua suportabilidade depende de fatores como distância de caminho entre condutores elétricos, limpeza, poluição e integridade do material utilizado em sua fabricação.

3.1.1 Composição Química e Processo de Fabricação de Isoladores de Vidro

Ao se analisar o processo de fabricação de Isoladores de vidro, serão apresentadas aqui de forma geral e resumida, as etapas da fabricação das peças de vidro empregadas como isoladores, utilizando-se para tanto as pesquisas realizadas por Mamede Filho (2019), o qual nos diz que

Inicialmente, são misturados todos os componentes químicos necessários, cuja carga é levada a um forno de fusão com temperatura de cerca de 1.300°C. Fundida a carga, é conduzida, nas porções adequadas, às formas com o esboço da peça a ser fabricada. Essas formas são, em seguida,

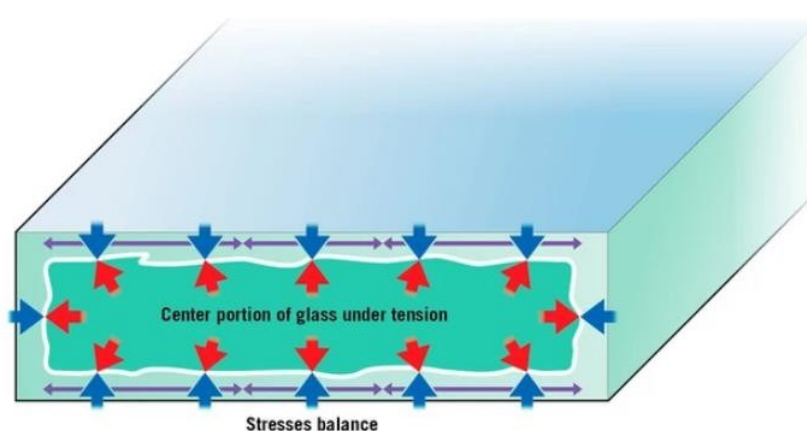
fechadas sob pressão, obtendo-se, no caso, o isolador de vidro (MAMEDE FILHO, 2019, p. 637).

Nessa etapa, segundo Mamede Filho (2019), após realizar o que se expõe acima, o vidro fabricado deve passar por uma das duas diferentes etapas de tratamento térmico, conforme escolha do fabricante. Estas etapas consistem na têmpera ou no recozimento e estes tratamentos térmicos têm a finalidade principal de otimizar o desempenho mecânico dos isoladores de vidro.

Para o processo de fabricação do vidro recozido, a peça é levada a um forno elétrico ou a óleo diesel de grandes proporções, lá são submetidas a temperaturas próximas a 500°C a fim de eliminar tensões mecânicas internas. Após esta etapa passam por um processo de resfriamento lento, e, por fim, os isoladores são conduzidos para uma região de resfriamento rápido, ainda dentro do forno (MAMEDE FILHO, 2019).

No processo de fabricação do vidro temperado, a primeira fase de fabricação termicamente consiste em seu aquecimento a uma temperatura de aproximadamente 750°C e após esta etapa vem um súbito resfriamento da peça. Este procedimento faz com que a camada superficial da peça exerça uma pressão interna comprimindo sua massa interior (MAMEDE FILHO, 2019). Nas palavras de Yoshimura, Guedes e Fredecicci (2009, p.846), “quando o vidro resfia e alcança a temperatura uniforme, um perfil de tensão de compressão é introduzido na superfície e, em compensação, um perfil de tensão de tração é desenvolvido no seu interior”.

Figura 6: Diagrama de forças do vidro temperado.



Fonte: Aquários sobrinho, 2019.¹

¹ Disponível em: < <https://www.aquariossobrinho.com/post/aquario-quebra>>. Acesso em: 05 de jun. 2021.

A figura 6, apresenta o diagrama de forças do vidro temperado e sobre isso, pode-se dizer que, para aumentar ainda mais a qualidade do vidro temperado, este pode ser sujeito a um segundo tipo de têmpera, a têmpera química, a qual é capaz de aumentar a resistência mecânica da peça em até três vezes em relação a um isolador temperado apenas termicamente (YOSHIMURA, GUEDES, FREDECICCI, 2009).

O processo de têmpera química consiste, segundo Yoshimura, Guedes e Fredecicci (2009, p. 846), em:

Neste processo, o vidro é imerso em um banho de sal fundido a uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g , para ocorrência do fenômeno de troca iônica, onde um cátion do vidro é substituído por um cátion de maior volume do banho de sal. Esta troca acarreta no efeito de estufamento iônico (ion stuffing) da superfície, causando a formação de uma camada superficial de tensão compressiva permanente.

A partir do exposto acima, pode-se analisar que no processo de têmpera química, o vidro é imerso em um banho de sal fundido, no qual, observando as temperaturas de transição vítrea, ocorrendo o fenômeno de troca iônica, finda por causar a formação de uma camada superficial de tensão compressiva permanente.

3.1.2 Hidrofobicidade e Desgastes dos Isoladores de Vidro

Devido ao fato de materiais cerâmicos, como vidro e porcelana, serem mais resistentes a ruptura mecânica e a grandes esforços mecânicos (PEREIRA, 2020), muito se acredita que também sejam hidrofóbicos. No entanto, Sousa (2006) nos informa que os isoladores de vidro são facilmente molháveis, sendo considerados então como hidrofílicos. Entretanto, alguns estudos como o de Fontanella, Oliveira e Hotza (2008), expõe que já estão sendo realizados ensaios em isoladores com revestimentos para que seja possível torná-los totalmente hidrofóbicos.

Conseqüentemente, o fato de ser facilmente molhado, o isolador de vidro acaba por apresentar alguns desgastes e falhas. Detectar esses defeitos antes que ocorram falhas durante trabalhos de manutenção é fundamental, principalmente pelas falhas serem relacionadas a defeitos elétricos que causam interrupções na alimentação elétrica. Quanto as falhas devido à queda de linha, não ocorre com frequência (SOUSA, 2006). “Das três categorias de isoladores utilizados em sistemas de alta tensão (porcelana, vidro e poliméricos), a detecção de defeitos em isoladores de vidro é a mais simples de obter” (SOUSA, 2006, p. 65).

o vidro é forte a danos por radiação ultravioleta, possui grande resistência à compressão e fragmenta quando comprometido, esta simplifica o reconhecimento de peças danificadas. As desvantagens desse tipo de isolador são o peso elevado e sua alta atratividade ao vandalismo (DIAS, 2017 apud PEREIRA, 2020, p. 16)

Quanto ao vandalismo, os isoladores de vidro são muito frágeis e suscetíveis a tais atos. A fratura dos isoladores ocorre de forma a se estilhaçarem completamente e quando ocorre o vandalismo com os isoladores em cadeia, pode acontecer a descargas do tipo contornamento e levar a um defeito permanente. Além disso, os isoladores de vidro também sofrem com a ação da poluição (SOUSA, 2006), que quando ocorre de maneira elevada a corrente de fuga que está entre os terminais pode causar erosões na estrutura do material (QUEIRÓS, 2013).

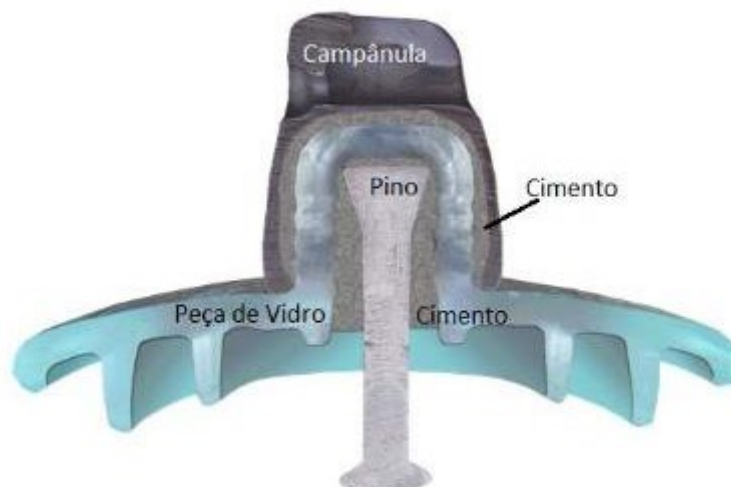
Queirós (2013) retrata que os isoladores de vidro utilizados até a década de 80 apresentavam comportamentos erráticos, porque estilhaçavam de forma espontânea, sem esforço mecânico ou elétrico. Com o passo do tempo, foram realizadas modificações que tornaram o vidro mais resistente e robusto. Também são mais propícios a danos de atividades elétricas em sua superfície, especialmente em descargas do tipo contornamento (QUEIRÓS, 2013).

3.1.3 Tipos de Isoladores de Vidro

Os isoladores de vidro apresentam certas vantagens em casos de falha elétrica ou mecânica, devido ao fato de se estilhaçar completamente. Por isso, esses isoladores apresentam basicamente algumas características, não alterando muito a sua forma (TEXPI).

Um isolador de vidro do tipo disco concha-bola é composto de quatro principais elementos constituintes: campânula metálica, disco de vidro temperado, pino metálico e argamassa de cimento aluminoso ou cimento portland (SILVA, 2008), sendo o vidro o material responsável por exercer a função de dielétrico do equipamento. A campânula e o pino são constituídos de aço galvanizado e sua principal função é possibilitar o acoplamento de vários isoladores em série, já o cimento é o componente responsável por fixar o pino metálico ao disco de vidro e pode ser sujeito a cargas mecânicas, as quais podem variar dependendo do tipo de isolador de 80 kN a 120 kN (SILVA, 2008). Como se pode ver na figura 7;

Figura 7: Isolador concha-bola e suas partes constituintes.



Fonte: Ferreira, 2017

Como visto na figura acima, é apresentado uma parte daquilo que é conhecido como cadeia de isoladores, ou seja, vários isoladores são acoplados mecanicamente, de tal forma que, seja possível maior capacidade de isolamento elétrico entre a parte carregada eletricamente e a parte não condutora da linha de transmissão.

O isolador de vidro temperado do tipo disco aerodinâmico, devido a sua forma minimiza o acúmulo de resíduos principalmente na parte inferior. Seu perfil é aberto e maximiza o fluxo de ar, permitindo que o vento realize a “autolimpeza” reduzindo assim sua contaminação por resíduos (TEXPI). A figura 8 demonstra o formato desse isolador:

Figura 8: Isolador de vidro tipo disco aerodinâmico.



Fonte: Texpi.²

² Disponível em: < <https://www.texpi.com.br/isoladores-de-vidro-aerodinamico.html>>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

Além desse modelo, a Texpi também apresenta o isolador de vidro temperado tipo disco antipoluição. Esses isoladores apresentam saias inferiores bem profundas, resultando em distâncias de escoamento bem maiores do que os de disco normal. Ideal para ambientes com excesso de poluição. A figura 9 demonstra como é a um isolador de vidro temperado tipo disco antipoluição.

Figura 9: Isolador do tipo disco antipoluição.



Fonte: Texpi.³

Os isoladores de vidro de suspensão constituem-se em modelos de utilização para linhas de transmissão e distribuição, sendo compostos por cadeias que variam de acordo com a tensão, dependendo apenas do número de isoladores em série. Pode-se montar duas ou mais cadeias em paralelo para o esforço mecânico alto, grandes vãos ou cabos pesados. Eles possuem uma alta durabilidade, porém sua vida útil é reduzida, além de que quando aplicados esforços mecânicos e elétricos, mesmo que em curta duração, podem causar danos permanentes ao isolador (SANTANA, 2009 apud ZEITOUNE, 2019, p. 43).

3.2 ISOLADORES DE PORCELANA

Em relação aos isoladores de porcelana, são considerados cerâmicas caracterizados por matéria inorgânica processada em alta temperatura. Estes isoladores apresentam grande durabilidade, firmeza, resistência a compressões e ataques químicos. Entretanto, são sensíveis a quebra, retêm água e contaminantes mais facilmente, devido sua composição mineral (QUARESMA, 2018).

Dentre os tipos de isoladores elétricos, o isolador de porcelana pode ser

³ Disponível em: <<https://www.texpi.com.br/isoladores-de-vidro-antipoluicao.html>>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

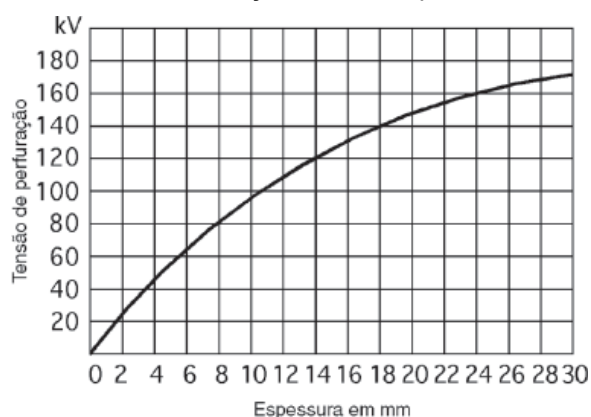
considerado uma solução para a implantação de estruturas elétricas, sistemas de distribuição de energia ou equipamentos elétricos, visto que, a porcelana é caracterizada como um material cerâmico e inorgânico, o que a define sendo resistente a intempéries do tempo, produzido com matérias-primas naturais. Mamede Filho (2019) afirma que existem três fatores cruciais para prever o desempenho de porcelanas empregadas em sistemas elétricos, a umidade do ar, a temperatura e a espessura do material.

A umidade do ar em contato com a cerâmica é absorvida pelo material, ocasiona na redução de sua respectiva rigidez dielétrica. Para evitar este problema é realizada a aplicação de esmalte vidrado em toda a superfície do isolador, de maneira a vedar a entrada de umidade externa. Qualquer trinca nesta camada vítrea protetora pode gerar o comprometimento elétrico da peça (MAMEDE FILHO, 2019).

Em segundo lugar Mamede Filho (2019) afirma que o aumento de temperatura influi na queda de rigidez dielétrica, mais especificamente “a partir dos 100°C, à frequência industrial, e de 180°C, sob tensão de impulso atmosférico, a rigidez dielétrica da porcelana cai vertiginosamente” (MAMEDE FILHO, 2019, p. 633). Considerando este comportamento em relação à temperatura, a porcelana apresenta um comportamento semelhante a um efeito cascata, no qual para temperaturas mais elevadas e a consequente queda de rigidez dielétrica, aumenta-se a contribuição do efeito Joule, e este, por sua vez, ocasiona ainda mais ganhos de temperatura no material (MAMEDE FILHO, 2019).

Em terceiro lugar, a espessura das porcelanas é capaz de alterar também as características isolantes das mesmas (MAMEDE FILHO, 2019). A figura 10 demonstra a relação entre a espessura da isolação e tensão de perfuração das peças de cerâmica:

Figura 10: Gráfico de relação entre a espessura e a tensão de perfuração.



Fonte: Mamede Filho (2019, p. 633)

Para porcelanas mais espessas tem, de forma geral, maior probabilidade de se encontrar trincas no interior de sua constituição física, o que conseqüentemente, aumenta as chances de ocorrência de tensões de perfuração em pontos internos da peça, comprometendo sua rigidez dielétrica (MAMEDE FILHO, 2019).

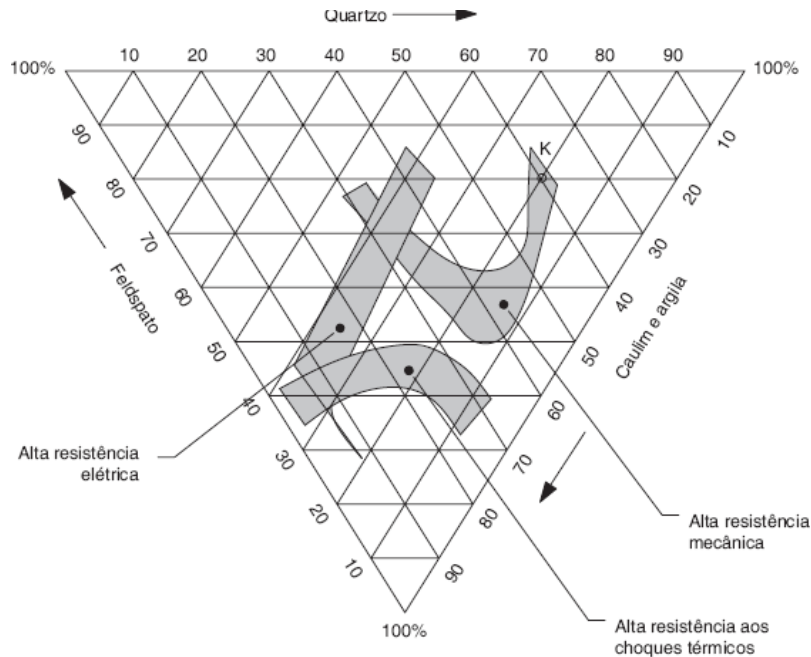
3.2.1 Composição Química e Processo de Fabricação de Isoladores de Porcelana

O material cerâmico é basicamente tido como inorgânico com elevado ponto de fusão e manufatura a frio com processo longo tempo de secagem em altas temperaturas (QUEIRÓS, 2013). No caso dos isoladores de porcelana apresentam grande solidez, resistência a compressão, resistência a ataques químicos e sensíveis a quebras (PEREIRA, 2020). Sua composição é principalmente de feldspato, quartzo e argila.

O feldspato é considerado o mineral mais abundante do planeta, constituindo cerca de 60% da crosta terrestre, possui a função de aumentar a rigidez dielétrica do componente (LIRA; NEVES, 2013; QUEIRÓS, 2013). O quartzo possui influência direta no comportamento térmico do material, quanto maior sua proporção, maior resistência térmica terá a porcelana (QUEIRÓS, 2013). A argila por ser considerada um material natural apresenta uma textura terrosa, possui granulação fina e sendo constituída por argilominerais (QUARESMA, 2018), e por isso tem maior resistência a esforços de compressão devido a quantidade do percentual de massa (QUEIRÓS, 2013).

Mamede Filho (2019) apresenta um gráfico triangular, conforme figura 11, chamado de triângulo de composição da porcelana, o qual permite a visualização de diferentes tipos de porcelana, dadas diferentes concentrações de seus elementos constituintes. O autor explica que conforme variam as proporções de cada elemento na fabricação da porcelana desejada, torna-se possível obter perfis de desempenho distintos, quanto às características dielétricas, mecânicas e térmicas, para cada composição do isolador.

Figura 11: Triângulo de composição da porcelana.



Fonte: Mamede Filho (2019)

Na produção de porcelana, de maneira geral, é adicionada água à mistura, conferindo maior plasticidade ao material e garantindo que não haja quebra durante o processo de torneamento e configuração do desenho. Este processo é bem rigoroso, pois um excesso de umidade pode comprometer sua rigidez dielétrica e desfigurar sua forma inicial, já a ausência de água pode criar uma porcelana muito frágil (QUEIRÓS, 2013). Tendo como consequência o comprometimento da viabilidade e utilização, devido a necessidade do material ser dúctil para suportar variações de temperatura causadas pelo tempo e as causadas por arcos voltaicos. Apesar de sua característica frágil, é necessário que a porcelana possua um certo grau de ductibilidade, pois dependendo da sua utilização, se faz necessário a capacidade de expansão ou contração do material, diminuindo a possibilidade de quebrá-lo.

Por conta de seu alto ponto de fusão, a mistura (feldspato, quartzo, argila e água) é primeiramente submetida a um longo processo de secagem em fornos de altas temperaturas, de modo que seja possível retirar a umidade excedente e bolhas de ar. Após todo este processo em cima da peça esculpida, finalmente o material estará apto para o uso (QUEIRÓS, 2013).

O processo de fabricação de isoladores elétricos de porcelana foi desenvolvido há muitos anos, utilizando composições de porcelana quartzosa. Posteriormente,

substituiu-se o quartzo pela alumina, com a proposta de melhorar a qualidade das propriedades mecânicas destes componentes elétricos (BONETTI, et al, 2009).

O início do processo dá-se pela mistura dos componentes em cilindros rotativos horizontais, com adição de água proporcionalmente à mistura. Também se colocam pedras de aço nos cilindros, com o objetivo de triturar os componentes da mistura, homogeneizando a massa. Para isto, o cilindro é rotacionado por cerca de 30 horas. Após a mistura do cilindro, que está em estado líquido, é levada para reservatórios onde serão retiradas as pedras de ferro com o uso de auxiliares magnéticos (MAMEDE FILHO, 2019).

A partir desse ponto, três processos de fabricação de isoladores de porcelana podem ser definidos, segundo os estudos de Mamede Filho (2019), sendo eles: o processo de desumidificação por gesso, processo de desumidificação à vácuo e processo de vitrificação e queima.

O processo de desumidificação por gesso se dá quando a massa líquida de cerâmica é alocada em formas de gesso. As propriedades do gesso farão com que a água da mistura seja absorvida e o isolador que está sendo fabricado possa ser seco. Quando concluída a etapa de secagem, a peça é encaminhada para uma etapa de usinagem, onde tomará sua devida forma incluindo os acabamentos e é chamado de processo por via úmida. (MAMEDE FILHO, 2019).

O processo de desumidificação à vácuo é caracterizado pela introdução da massa previamente descrita a um sistema de filtro prensa, onde será retirada grande parte da água existente na composição. O resultado é levado a um sistema de rosca sem fim, em um ambiente de vácuo. Esse ambiente a vácuo tem como objetivo eliminar as bolhas de ar existentes na mistura (MAMEDE FILHO, 2019).

A massa resultante, ainda contendo certa quantidade de água, é levada a um torno onde será moldada. A peça então, é armazenada até perder água por evaporação. Em seguida, novamente é realizado um processo de usinagem em torno onde tomará sua forma final. Finalmente, a peça é descansada em forno com temperatura especificada, onde é queimada e reduz cerca de 15% do seu peso, também sendo chamado de processo por via úmida (MAMEDE FILHO, 2019).

No processo denominado como processo por via seca, a massa líquida é levada a um sistema de prensas de aço, responsável por drenar a água da mistura. A peça é então processada por usinagem e mantida em estoque até o restante da água evaporar (MAMEDE FILHO, 2019).

Ressalta-se que, independentemente do método em que foi processado o isolador de porcelana, é aplicada na peça uma camada de esmalte sintético normalmente na cormarrom. Esse esmalte introduzirá uma superfície extremamente lisa no isolador, impedindo a retenção de líquidos e partículas, e é chamado de vitrificação. Após essa etapa, o isolador cerâmico é finalizado com um processo de queima, onde o material é levado a um forno e queimado por aproximadamente seis dias, atingindo temperaturas elevadas (MAMEDE FILHO, 2019).

3.2.2 Hidrofobicidade do Isolador de Porcelana

Um item que também é importante durante a escolha do isolador é quanto a sua hidrofobicidade. Ela pode ser medida de acordo com a repulsão da água sobre a superfície. A hidrofobicidade dos polímeros serve para dar maior suportabilidade para a peça e ao contrário do que é visto nos isoladores poliméricos, os isoladores de porcelana são materiais hidrofílicos, sendo necessário em alguns casos a utilização de recobrimento para que se tornem hidrofóbicos (THOMAZINI, 2009).

Como os materiais cerâmicos são normalmente hidrofílicos, em função do caráter covalente de suas ligações químicas, um filme de água é facilmente formado na superfície. Dessa forma, pode-se alterar o caráter de uma superfície de diversas maneiras, seja pelo recobrimento da superfície com polímeros ou outros compostos hidrofóbicos (QUARESMA, 2018, p. 53).

Devido “a superfície ter baixo grau de hidrofobicidade, favorece a formação de uma película de água, e, conseqüentemente, favorece a uma maior incidência de correntes de fugas” (COSER, 2009, apud DEUTSCH, 2016). Dessa forma, compreende-se que a superfície desses isoladores deve ser cuidadosamente vitrificada para vedar seus poros e impedir a absorção de água (PEREIRA, 2020).

Uma vez que os materiais cerâmicos são tipicamente hidrofílicos, a utilização de recobrimento com polímeros hidrofóbicos repele as gotículas de água, o que dificulta a formação de uma película contínua condutora e a conseqüente passagem de corrente elétrica. Uma prática desenvolvida na década de 90 para dificultar o flashover, foi a de utilizar recobrimento de filmes de borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente sobre os isoladores cerâmicos (QUARESMA, 2018, p. 51-52).

Nesse sentido, os estudos de Fontanella, Oliveira e Hotza (2008), expõem ensaios realizados com os isoladores de porcelana com alguns recobrimentos. No estudo as autoras explicam que foram aplicados sobre as placas já queimadas, exceto o esmalte que foi aplicado nas placas verdes em tratamento térmico de monoqueima.

Os recobrimentos utilizados foram esmalte de uso comum da empresa Germer, tinta poliéster em pó, resina acrílica de copolímeros concentrada Hidronorth, silicone (bota top SS, hidrofudante à base de silano/siloxano, Botament) e poliuretano.

O fim desse estudo, as autoras concluíram o melhor resultado obtido em conjunto, foi com o recobrimento de silicone, pois apresentou maior comportamento hidrofóbico, além de manter o desempenho superior aos demais frente aos ensaios de simulação de intempérie, exceto erosão (FONTANELLA; OLIVEIRA; HOTZA, 2008).

Corroborando com o exposto, Quaresma (2018) aponta que já existem empresas que realizam esse revestimento a fim de trazer a hidrofobicidade para o isolador de porcelana.

3.2.3 Desgastes do Isolador de Porcelana

Os isoladores de porcelana durante seu uso apresentam danificações, podendo ocorrer durante o transporte ou por falta de cuidado no manuseio. Durante o manuseio, quando os isoladores apresentam grande peso, é recomendado o uso de equipamentos adequados para que se reduza a ocorrência de danos. Os que apresentam muitos danos, não são utilizados, porém nem sempre esses danos são visíveis e por isso os que não são detectáveis, quando aplicados corre o risco de apresentar problemas (SOUSA, 2006).

Sousa (2006) também destaca que ao contrário dos isoladores de vidro, os de porcelana não tem tanta atração para destruição, mas caso a quantidade de porcelana não seja aplicada corretamente, podem acontecer descargas do tipo contornamento ou defeitos. Quanto a descargas do tipo contornamento “em isoladores de porcelana ou de vidro a ruptura do espigão do isolador, junto à linha, dá-se instantaneamente se a corrente for superior a 50 kA e durar mais de 10 ciclos” (SOUSA, 2006, p. 62).

Diferente do que ocorre com os isoladores polímeros, os isoladores cerâmicos podem apresentar resistência variada de acordo com o tipo de material utilizado. Os cerâmicos são mais resistentes a químicos e descargas parciais, no entanto são quebradiços e facilmente contaminados pela poluição (QUEIRÓS, 2013).

Quanto a ação de vandalismo, os isoladores de porcelana são mais frágeis e se comparados aos poliméricos, por exemplo, os danos serão maiores por tiros em isoladores de porcelana. (COSER, 2009 apud DEUTSCH, 2016).

Foi observado por Sousa (2006) que stress provocado pela tensão tem apresentado falhas nos isoladores de porcelana, com defeitos que podem ser classificados como elétricos, causando interrupções da linha elétrica. Defeitos mecânicos, no entanto, têm ocorrido de maneira muito rara. (SOUSA, 2006).

Devido sua composição ser uma mistura de argila, feldspato e quartzo, as falhas presentes no isolador de porcelana muitas das vezes pode ser a nível microscópico, como deslocamentos, rotações e micro rupturas. Maiores defeitos podem ocorrer na fabricação e posterior, devido ao uso são as macros rupturas, imperfeições, inclusões e buracos (SOUSA, 2006).

3.2.4 Tipos de Isoladores de Porcelana

As cerâmicas são produzidas com matérias-primas naturais e utilizadas na fabricação de diversos produtos quando se trata de aplicação na indústria eletroeletrônica, além de que os isoladores de porcelana são classificados quanto seu segmento como “cerâmica branca” (QUARESMA, 2018).

É apresentado por Deutsch (2016) que dentre os tipos mais comuns de isoladores de porcelana, os que mais se destacam são: Isolador roldana; isolador castanha; isolador pino; isolador de suspensão ou disco; isolador pilar.

O isolador do tipo roldana é fixado em sua estrutura de suporte por meio de um eixo não integrante e o condutor é fixado no exterior deste equipamento. É em sua maioria utilizado em redes de distribuição urbana e rural secundária com montagem horizontal, redes essas que são de baixa tensão variando de 220V ou 380V. Eles podem ser encontrados em porcelana vitrificada como em vidro recozido (MAMEDE FILHO, 2019; QUARESMA, 2018). Abaixo a figura 12 demonstra o isolador do tipo roldana:

Figura 12: Isolador do tipo roldana.



Fonte: Germer, 2018.

O isolador pino é predominantemente usado em redes de distribuição rural e

urbana primária de média tensão, apresentando menor frequência e por isso sendo utilizados em linhas de subtransmissão de alta tensão até 72kV (QUARESMA, 2018).

Os isoladores de pino podem ser fabricados em porcelana vitrificada ou vidro temperado. A aparência dos isoladores de pino, de vidro e de porcelana é semelhante, tanto no tipo monocorpo como no multicorpo. Os isoladores de pino fabricados em vidro são limitados geralmente a 25 kV. As dimensões dos isoladores de vidro são normalmente inferiores às dos isoladores de porcelana para a mesma tensão nominal. (MAMEDE FILHO, 2019, p. 635).

Além disso, podem se diferenciar entre si quando analisamos a poluição atmosférica dos locais de instalação desejada. Aqueles que são usados em condições mais rigorosas devem ser do tipo antipoluição, cujas distâncias de escoamento são maiores, dificultando assim as correntes de fuga para a estrutura de suporte (MAMEDE FILHO, 2013 apud QUARESMA, 2018). Abaixo a figura 13 demonstra o isolador do tipo pino.

Figura 13: Isolador do tipo pino.






Fonte: Germer, 2019.

Isoladores de suspensão ou disco são utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica de média e alta tensão, sua versatilidade vem do fato de que é possível fazer a conexão de dois ou mais isoladores em série, aumentando progressivamente sua capacidade de resistir a diferentes níveis de tensão. Também possui a capacidade de serem instalados tanto em montagens do tipo horizontal, quanto no modo vertical (MAMEDE FILHO, 2013 apud QUARESMA, 2018).

Conforme Mamede Filho (2019), os isoladores do tipo disco podem ser unidos em composição de cadeias em série e podem-se integrar também em paralelo quando se tratar de linhas de transmissão de energia elétrica com condutores de grandes seções e que necessitam de esforços mecânicos. Abaixo o quadro 1 com as figuras 14, 15 e 16 dos isoladores do tipo suspensão ou disco:

Quadro 1: Tipos de isoladores de suspensão.

<p>Figura 14: Isolador de suspensão ou disco.</p>  <p>Fonte: Germer, 2019.</p>	<p>Figura 15: Isolador de suspensão conectados em série.</p>  <p>Fonte: Germer, 2019.</p>	<p>Figura 16: Isolador suspensão conectados em série do tipo bastão.</p>  <p>Fonte: Santa Fé Transformadores, 2019.</p>
---	--	--

Fonte: Autoria própria.

Assim como o isolador pino, o isolador pilar é em sua maioria utilizado em redes de distribuição urbana e rural primária, redes essas que são de média tensão de até 38kV e pode ser utilizado em linhas de subtransmissão, que são de alta tensão até 72kV, mas não é comum (QUARESMA, 2018).

O isolador do tipo pilar é predominantemente utilizado em redes de distribuição rural e urbana de média tensão e com menor frequência utilizado em linhas de subtransmissão (QUARESMA, 2018). Abaixo a figura 17 demonstra como é o isolador do tipo pilar

Figura 17: Isolador do tipo pilar.



Fonte: Germer, 2019.

O isolador do tipo castanha, assim como o isolador do tipo roldana, é em sua maioria utilizado em redes de distribuição urbana e rural secundária de baixa tensão variando de 127V a 440V e sua principal utilização é nos finais das linhas de transmissão para a ancoragem (QUARESMA,2018). Abaixo a figura 18 representa o isolador do tipo castanha.

Figura 18: Isolador do tipo castanha.



Fonte: Germer, 2019.

Além disso, esse tipo de isolador pode ser usado também em cerca elétricas, devido a sua função em manter o arame firme e prevenir os curtos-circuitos.

3.3 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Um isolador é uma peça feita com algum tipo de material isolante destinado a isolar um condutor elétrico. Geralmente, os isoladores são identificados pelo tipo de material pelo qual são compostos, podendo ser de porcelana, vidro e polímeros. Os isoladores compósitos também são conhecidos como isoladores poliméricos e tem como principal vantagem o seu menor tempo de fabricação, maior resistência e facilidade de manuseio e instalação, quando comparado com os demais isoladores (SOUSA, 2006).

Os isoladores em engenharia elétrica têm a finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outros corpos condutores ou não. Os tipos mais usados de isoladores são os cerâmicos, vítreos e poliméricos. Esses isoladores têm ligação direta com os índices de segurança nas redes de transmissão elétrica, podendo influenciar diretamente nestes índices: DEC (Duração da Interrupção Equivalente em Horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção), usados pelas companhias elétricas para medir o índice de qualidade (MENDONÇA, 2013, p. 31).

O surgimento dos isoladores poliméricos apresentou oportunidade de desenvolvimento para os isoladores convencionais, as indústrias elétricas acabaram

privilegiando o custo de aquisição devido a qualidade de um material, dessa forma, a relação entre preço e qualidade dos compostos veio de maneira a modificar a atitude das empresas sobre os isoladores privilegiando poupanças e a vida útil do material durante seu funcionamento (QUEIRÓS, 2013).

A forma dos isoladores compósitos assemelha-se aos clássicos isoladores de fuste comprido (longrod), mas com construção especial no núcleo e cerca de 90% mais leve. Na sua constituição é possível identificar três peças fundamentais: os terminais metálicos de ligação, o núcleo em vara de fibra de vidro reforçada (FRP) e ainda o revestimento ou housing em material polimérico (QUEIRÓS, 2013, p. 18).

No final da década de 50, houve um grande desenvolvimento na linha de isoladores sendo desenvolvido isoladores com menor peso e melhores materiais em comparação com isoladores convencionais de porcelana. Ao longo do tempo, o interesse por linhas de transmissão de energia elétrica de 1000 kV foi diminuindo, mas o desenvolvimento dos isoladores continuou e em 1959 a General Electric introduziu os primeiros isoladores não cerâmicos. No entanto eles possuíam tracking e um nível elevado de erosão (SOUSA, 2006). Abaixo um exemplo de um isolador polimérico tipo pino apresentado na figura 19:

Figura 19: Isolador tipo pino de polimérico.



Fonte: Direct industry.⁴

A Europa após alguns anos introduziu os primeiros isoladores não cerâmicos que eram compostos por uma fibra de vidro revestido de material polimérico e terminado com acessórios metálicos. Em consequência, os fabricantes acabaram

⁴ Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/zibo-qianheng-automation-engineering-company-ltd/product-161232-1756010.html>> Acesso em: 25 de jul. de 2021.

precisando utilizar vários tipos de polímeros incluindo “teflon, resina epoxy, borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente (RTV), borracha de silicone vulcanizada a alta temperatura (HTV), “ethyleno propyleno monomers” (EPR) e “ethyleno propyleno diene monomers” (EPDM)” (SOUSA, 2006, p. 44).

3.3.1 Processo de Fabricação e Composição Química dos Isoladores Poliméricos

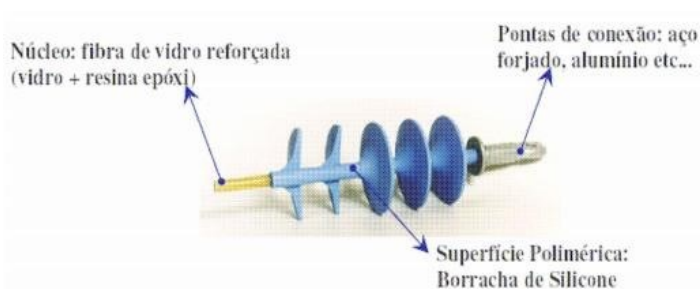
A composição dos isoladores poliméricos constitui-se em uma vara de fibra de vidro revestida com uma camada de silicone e acoplamentos de hardware que ligam essa vara em seus dois extremos, sendo a vara o início da produção desse isolador. A vara desempenha duas funções sendo a primeira de apoio e a segunda de isolante. Sabendo então que os isoladores compósitos são considerados polímeros é que se precisa entender o que são polímeros (MENDONÇA, 2006). Os polímeros são

[...] compostos químicos de elevada massa molecular e de grandes cadeias. Os polímeros são então macromoléculas formadas por unidades básicas os monômeros, em si os polímeros são vários monômeros ligados formando uma longa cadeia que se repete. Existem polímeros naturais (encontrados na natureza) e polímeros artificiais. Como exemplo de polímeros naturais encontramos o DNA e RNA (presentes na maioria das células do nosso corpo), temos também a borracha retirada das seringueiras. Já os polímeros artificiais ou sintéticos são formados por reações de polimerização, que são reações onde as moléculas menores (monômeros) se combinam por valências principais para formar as moléculas mais longas, mais ou menos ramificadas, porém com as mesmas composições centesimais. Os polímeros também podem ser divididos em termoplásticos, elastômeros e termorrígidos. Termoplásticos são os mais comuns em nosso dia a dia sendo encontrados em vários objetos, estes formam a maioria dos plásticos conhecidos. Eles recebem esse nome, pois em altas temperaturas eles apresentam uma alta viscosidade podendo facilmente ser moldados.” (MENDONÇA, 2013, p. 32)

Além disso, o revestimento de um isolador polimérico é feito de uma borracha especial aplicada sobre o núcleo de um isolador. Esse material tem a função de proteger o isolador de agentes externos. O material que compõe de maneira básica o polímero são borrachas de: “silicone (silicone rubber - SIR), etileno-propileno-metileno (EPM), etileno-propileno-dieno-metileno (EPDM), epóxi cicloalifática (CE), acetato de vinil-etileno (EVA) e politetrafluoretileno (PTFE) (ZHAO; BERNSTORF, 1998; HALL, 1993)” (MENDONÇA, 2013, p. 34). Dessa forma, para que se possa obter todas as propriedades elétricas e mecânicas desejadas, os materiais básicos possuem diversos enchimentos. Esses enchimentos, além de ajudar com as propriedades elétricas e mecânicas também auxiliam na diminuição do custo do isolador.

A figura 20, apresenta os elementos do isolador polimérico

Figura 20: Elementos do isolador polimérico.



Fonte: Gianelli et al, 2009.

São utilizados alguns tipos de materiais para o seu revestimento como “o ethyleno-propyleno diene monomer (EPDM), o silicone vulcanizável a alta temperatura (HTV) ou uma mistura dos dois” (SOUSA, 2006 p.47), que normalmente são moldados a vara de fibra de vidro por injeção ou técnicas de moldagem (SOUSA, 2006).

Sousa (2006) explica que o EPDM (etileno propileno dieno), resina epóxis, elastômeros termoplásticos e polidimetilsiloxano (PDMS) tem sido cada vez mais utilizados como material de cobertura para isoladores compostos que ao contrário de outros materiais apresentam capacidade de recuperar sua hidrofobicidade.

Uma superfície hidrófila à base de radicais de óxio de silício (SiOx) é formada durante a exposição do material às descargas corona. A camada retarda a difusão das LMW para a superfície, resultando em uma taxa de recuperação de hidrofobicidade baixa (OLIVEIRA E SILVA, 2009, p. 25).

Alguns polímeros normalmente utilizados para fins elétricos, possuem reforços com cargas que tem o intuito de melhorar propriedades como resistência mecânica, resistência à erosão e retardante de chamas. Alguns dos compostos mais utilizados são alumina trihidratada (ATH) e óxido de silício (Sílica). Outra vantagem que o PDMS tem em relação aos demais polímeros, como por exemplo o EPDM, é a cadeia -Si-O- do PDMS e possui uma energia de ligação maior que a energia da cadeia -C-C- do EPDM (OLIVEIRA E SILVA, 2009). Dessa forma, compreende-se que o PDMS tem menor conteúdo de carbono que o EPDM. Sendo assim, o silicone apresenta uma maior resistência química e física às radiações ultravioletas.

Se tratando de constituição física e design, os isoladores poliméricos se assemelham bastante aos isoladores clássicos, porém com uma constituição especial no núcleo e 90% mais leve. Existem três peças fundamentais na sua constituição, sendo os “terminais metálicos de ligação, o núcleo em vara de fibra de vidro reforçada

(FRP) e ainda o revestimento ou housing em material polimérico” (QUEIRÓS, 2013, p. 18).

Os terminais de ligação

Tal como no caso dos isoladores cerâmicos, os terminais de ligação têm como função o suporte e ligação dos condutores às torres de transmissão, e são compostos pelas mesmas classes de materiais, ou seja, aço forjado, alumínio moldado, forjado ou maquinado, e ferro maleável, sendo aço (galvanizado) o caso mais comum (QUEIRÓS, 2013, p. 18).

Dessa forma, para os isoladores poliméricos é necessário que os metais sejam mais dúcteis devido a compressão e cravação das varas fibrosas. Para o núcleo

A sustentabilidade mecânica nos isoladores compósitos é assegurada por uma vara de material fibroso que garante razões elevadas entre resistência à tração, volume e peso. Um núcleo de 22 mm de diâmetro possui o mesmo grau de resistência à tensão que um núcleo de 75 mm de porcelana. [...] Para aplicações em alta tensão, o material mais comum para o núcleo é a fibra de vidro do tipo E-glass reforçada com resinas epoxicas, em detrimento a resinas de poliéster (QUEIRÓS, 2013, p. 21).

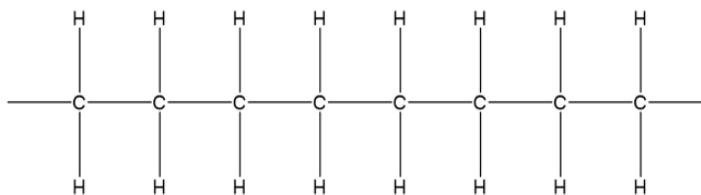
Sendo assim, as fibras que durante a produção podem produzir imperfeições, ficam sujeitas a perdas de propriedades que podem se agravar com o passar do tempo e envelhecimento das resinas.

Na questão do revestimento, sua principal função é proteger o núcleo dos mais variados impactos ambientais, de correntes de fuga, descargas elétricas, além de fornecer uma linha de fuga segura em condições de chuva e umidade (QUEIRÓS, 2013).

Tal como nos cerâmicos, os polímeros básicos são compostos por átomos com quatro ligações de valência, sobretudo silício e carbono, capazes de formar estruturas longas com diferentes propriedades. O carbono é capaz de se combinar consigo mesmo, além do hidrogénio, oxigénio, entre outros elementos, formando cadeias de elevada variedade, complexidade e de repetições cíclicas (monómeros). Os polímeros puros contêm apenas um tipo de molécula e raramente são usados como revestimento nos isoladores (QUEIRÓS, 2013, p. 23).

Dessa forma, para que possamos compreender a cadeia polimérica com a unidade monomérica que forma o polímero, a imagem abaixo, figura 21, pode representar. A região assinalada da cadeia do polietileno é a unidade monomérica etileno.

Figura 21: Cadeia polimérica do polietileno.



Fonte: Autoria própria adaptado de CALLISTER, 2008 apud DEUTSCH, 2016.

A repetição dessas unidades acaba gerando longas moléculas através da polimerização e, assim, formam o polímero. O polímero pode ser natural ou produzido, quando natural é encontrado na celulosa, proteínas, entre outras, e quando produzido é encontrado no nylon, polietileno, silicone etc. (DEUTSCH, 2016).

As propriedades dos polímeros que são alteradas pelo aumento do peso molecular são: temperatura de transição vítrea, índice de fluidez, viscosidade, módulo de elasticidade e resistência mecânica. Propriedades que não são alteradas pelo aumento do peso molecular são: índice de refração, dureza, condutividade elétrica e densidade. Polímeros não possuem comportamento magnético (CALLISTER, 2008, *apud* DEUTSCH, 2016, p. 17).

Dessa forma, compreende-se que se pode ter pelo menos três reações pelos quais pode-se produzir um polímero: a poli adição, poli condensação e a modificação química de outro polímero. Assim os polímeros podem ser classificados e baseados de acordo com as propriedades térmicas e não podem ser recicláveis. De acordo com a temperatura do ambiente, eles podem ser maleáveis, rígidos ou frágeis (QUARESMA, 2018).

Além disso a utilização desses polímeros, muitas vezes, vinha acompanhada de misturas com aditivos como a sílica e tri-hidrato de alumínio para que assim pudessem ter propriedades anti-trackin. Ao longo da evolução dos isoladores compostos e com aumento de sua utilização suas vantagens evoluíram, desde material e manuseio (SOUSA, 2006).

Esta importante vantagem ultrapassava as dificuldades de manuseamento, diminuía os danos na fase de construção das linhas e reduzia o custo de construção das linhas. Sob o ponto de vista elétrico, desde que estes isoladores possam ser produzidos com pequena superfície e longos caminhos de fuga, o seu comportamento à frequência industrial a seco e em condições de contaminação pode ser muito melhorado. Nos últimos tempos, o comportamento sob contaminação é a principal vantagem deste tipo de isoladores. Durante um período de cerca de 15 anos, um grande número de empresas adquiriu este tipo de isoladores para fazer aplicações

experimentais, em grande parte para linhas de curta distância (SOUSA, 2006, p. 44).

Os isoladores poliméricos são então formados por uma vara de fibra de vidro revestida de uma camada de silicone e acoplamentos de hardware. Em sua fabricação, os isoladores poliméricos têm início nesta vara que desempenha duas funções: uma delas é ser o principal membro de apoio e a outra é ser isolante (SOUSA, 2006).

A vara é fabricada pelo processo de pultrusão [...] para fabrico de uma vara de fibra de vidro sólida. Neste processo, os fios de fibra de vidro são puxados através de um tanque com resina sendo depois moldada para a forma desejada. Existem, no entanto, dois parâmetros críticos no processo de pultrusão: velocidade com que se puxa a fibra de vidro e a temperatura. Se a velocidade é muito baixa para a temperatura aplicada ou se a temperatura é muito elevada para a velocidade, podem-se desenvolver fendas axiais por não haver uma secagem uniforme, isto é, a parte exterior seca mais rápido que a parte interior (SOUSA, 2006, p. 46).

No entanto, os defeitos podem ser destacados com tinta fluorescente, porém isso não garante que as varas estejam limpas e não ocorra a formação de fendas.

3.3.2 Hidrofobicidade do Isolador Polimérico

Uma das características mais importantes da cobertura polimérica é a hidrofobicidade, a forma como o plástico impede a água de se acumular na superfície sendo essa uma forma também do isolador polimérico ser melhor que o isolador cerâmico, fazendo assim com que se evite descargas elétricas entre o isolador e a torre de sustentação (OLIVEIRA E SILVA, 2009).

Eles apresentam em sua superfície um material hidrofóbico que torna impossível a ocorrência de fuga de corrente, o que os torna melhores que os isoladores de porcelana. Enquanto os isoladores de porcelana e de vidro são facilmente molháveis (hidrofílicos), os materiais poliméricos resistem à formação de um filme de água em sua superfície, isto é, são hidrofóbicos (SILVA et al, 2017).

São as terminações dos isoladores não cerâmicos que são feitos de alumínio seja moldado, forjado ou maquinado e as suas ligações são feitas de várias maneiras para que possa se ter uma resistência mecânica e uma boa ligação (SOUSA, 2006).

As ligações do hardware devem permanecer imunes a descargas de efeito coroa no ar ou na superfície do isolador. O efeito coroa nos isoladores compósitos provoca deterioração pela acção combinada da descarga na superfície (bombardeamento de ions) e pela actuação de certos compostos

químicos formados pelas descargas. Na concepção de isoladores poliméricos o hardware deve ser dimensionado de forma a evitar descargas de efeito coroa, ou ter um anel uniformizador de campo para garantir o não aparecimento acentuado destas descargas (SOUSA, 2006, p. 49).

Compreende-se com isso que “originariamente, os isoladores poliméricos foram desenvolvidos para resolver alguns problemas apresentados pelos antigos isoladores cerâmicos, principalmente devido ao elevado peso e sua fragilidade ao vandalismo” (BURNHAM;WAIDELICH, 1997 apud OLIVEIRA E SILVA, 2009 p.21). Dessa forma, os isoladores poliméricos apresentam algumas vantagens a mais em relação aos isoladores cerâmicos, além do fácil manuseio, tempo de fabricação, fácil instalação e resistência.

3.3.3 Desgastes do Isolador Polimérico

Como qualquer produto em utilização, após alguns anos foram encontrados problemas como tracking, erosão, alteração do estado da camada que levava o aumento de acúmulo de poluição, defeitos e até mesmo desintegração (SOUSA, 2006). Desta forma alguns fabricantes acabaram interrompendo a produção desse tipo de isolador para linhas de transmissão de energia elétrica e produziam apenas para linhas de distribuição. Com o passar dos anos e o aprimoramento do material, os isoladores poliméricos passaram a ser utilizados em todos os níveis de tensão, porém para inferiores a 230kV ela apresenta mais aplicação e para tensões superiores não são tão utilizados (SOUSA, 2006).

Naturalmente, os isoladores em linhas de transmissão de energia elétrica ficam sujeitos a vários tipos de cargas e desgastes por degradação ou fraturas. Quanto ao desgaste dos isoladores poliméricos, seja por ordem natural ou vandalismo, esse tipo de isolador pode suportar alguns atos como tiros, falhas elétricas ou mecânicas, entretanto a fibra de vidro fica exposta podendo provocar fraturas por fragilização. Infelizmente não é muito fácil detectar os defeitos provocados nesse tipo de isolador, pois uma fratura nesse isolador pode ser acompanhada por queda da linha de tensão e por isso é necessário fazer regularmente em inspeções prevenindo assim quedas de linhas (SOUSA, 2006).

Todos esses fatores juntos podem levar os isoladores a terem um tempo de vida abaixo do esperado, causando um fenômeno chamado de “brittle fracture” (fratura frágil) ou “stress corrosion cracking” que na verdade é o

rompimento destes isoladores sob devidas circunstâncias que o diferem do fenômeno da fratura normal (GUIDE, 1992). Normalmente a fratura frágil tem características tais como: a região de fratura possui uma parte lisa e outra referente às fibras quebradas, a resina e a fibra rompem-se no mesmo plano, e a região de fratura é na maioria perpendicular ao eixo do isolador (GUIDE, 2003; CARPENTER; KUMOSA, M., 2000) (OLIVEIRA E SILVA, 2009, p. 27).

No entanto, Oliveira e Silva (2009) também esclarece que já vem sendo investigado o fenômeno da fratura frágil e que apesar disso ainda existem alguns pontos que necessitam de esclarecimento, pois o fenômeno ainda não está totalmente compreendido a ponto de ser evitado.

Por serem considerados frágeis os isoladores compostos são facilmente danificados, se forem mal manuseados e até mesmo durante seu transporte, por isso é necessário que se armazene esses isoladores em caixas totalmente fechadas, prevenindo a entrada de animais e separados por tiras de madeira, impedindo que ele semovimente e quando armazenados fora de caixas devem ser empilhados de forma que não se danifiquem, não podendo ser colocados com outros materiais em cima e apresentando uma capa de revestimento (SOUSA, 2006).

Durante a instalação é bem comum que a vara deste isolador se estilhaçe se for aplicada torção ou carga flutuante, isso “pode deixar problemas na vara, originam tracking ou fracturas por fragilização.” (SOUSA, 2006, p. 59).

Para fixação desse tipo de isolador são necessários três processos:

Colagem — A vara é revestida com uma resina que garante a fixação à peça metálica de forma cônica que permite distribuir a tensão do núcleo ao longo da boca metálica. O ângulo de abertura deve aproximar-se dos 50 para otimização da distribuição de forças;

Compressão — A boca metálica é paralela à vara e assegura a ligação por compressão e uso de resina ou cimento. Este é o processo de fabrico mais comum devido à estabilidade em mudanças de temperaturas e elevada resistência mecânica.

Cunha metálica — O encaixe da vara à boca cônica é alcançada através de uma cunha metálica que a perfura no centro, separando-a axialmente. Este processo é desaconselhável por não garantir um encaixe correto. Além disso, a introdução da cunha provoca o gretamento do núcleo, o que provoca fragilidades mecânicas e elétricas (QUEIRÓS, 2013, p. 19).

Dessa forma, tal como os isoladores cerâmicos, os terminais de ligação apresentam uma função de suporte, como a ligação dos condutores para as torres de transmissões. No entanto, nos isoladores poliméricos, conforme dito anteriormente, os metais devem ser mais dúcteis devido a sua compressão e cravação das varas fibrosas e isso causa grande influência no design dos terminais (QUEIRÓS, 2013).

Os materiais poliméricos também experimentam deterioração nas interações ambientais. Essas degradações são de natureza físico-química e podem

ocorrer de diversas maneiras. Por inchamento e por dissolução; por ruptura de ligações 60 covalentes, como resultado da ação da energia térmica, de reações químicas e da radiação (CALLISTER, 2012, *apud* QUARESMA, 2018, p. 60).

Por mais que os polímeros sejam de maneira mais ampla utilizados, quando comparados com cerâmicas eles apresentam algumas desvantagens devido a sua baixa estabilidade térmica. Sendo assim, a principal característica dos isoladores poliméricos dos outros materiais é a presença de cadeias moleculares constituídas em sua grande extensão por carbono (QUARESMA, 2018).

3.3.4 Tipos de Isoladores Poliméricos

Existem alguns tipos de nomenclaturas para os isoladores poliméricos, sendo eles não cerâmicos, compostos, poliméricos e compósitos. Os não cerâmicos têm esse nome devido a uma classe diferente dos isoladores de porcelana, os poliméricos têm esse nome devido ao seu revestimento externo, os poliméricos se referem ao material que reforça a fibra de vidro dentro do núcleo do isolador e o compósito é o nome dado ao núcleo do isolador, devido ao compósito PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro) (DEUTSCH, 2016).

Os tipos mais comuns de isoladores poliméricos são os isoladores do tipo pilar e do tipo suspensão ou ancoragem. O isolador do tipo pilar, como se vê na figura 22, é utilizado para redes de distribuição urbana e rural com média tensão de até 38 kV. Também podem aparecer em linhas de subtransmissão de alta tensão de até 72kV, porém são em menor frequência (DEUTSCH, 2016).

Figura 22: Isolador polimérico do tipo pilar.



Fonte: Onix.⁵

⁵

Disponível

em:

<<https://onixcd.com.br/produtos/redes-aereas-e->

O isolador de suspensão ou ancoragem, apresentado na figura 23, são utilizados em redes urbanas e rurais de distribuição de média tensão, que tenham tensões elétrica de 15kV a 35kV e em linhas de transmissão de energia elétrica ou subtransmissão de extra alta tensão ou alta tensão que tenham tensões elétrica de 69kV a 1000kV (DEUTSCH, 2016).

Figura 23: Isolador de suspensão ou ancoragem.



Fonte: Kvluz.⁶

Através dos estudos realizados aqui, é importante ressaltar que existem diferenças pontuais entre os materiais cerâmicos e poliméricos usados em isoladores quanto a sua molhabilidade. Além disso, sabe-se que a principal função do isolador polimérico é a de isolar as partes que contenham diferentes potenciais elétricos, agindo em forma de proteção em casos que ocorram o curto circuito da rede elétrica.

Essa reflexão justifica-se pela necessidade de se conhecer e caracterizar cada um dos tipos de isoladores elétricos disponíveis no comércio, para que seja possível realizar um comparativo, o qual será desenvolvido no próximo capítulo.

instalacoes/isoladores/polimerico/isolador-polimerico-pilar-34kv-m20-34-10-8-fe-m20-cinza-70775/>. Acesso em: 25 de jun. 2021

⁶ Disponível em: <<https://www.kvlux.com.br/isolador-de-ancoragem-polimerico-15kv.html>>. Acesso em: 25 de jun. 2021

4. ANÁLISE COMPARATIVA

Este capítulo objetiva apresentar um comparativo entre os tipos de isoladores e conforme estudos realizados, observou-se que o desempenho das linhas de transmissão de energia elétrica está diretamente atrelado ao comportamento dos isoladores presentes na estrutura, visto que, os isolantes possuem a função de sustentar os cabos e mantê-los eletricamente isolados (BRITO, 2018).

De acordo com estudos realizados, Brito (2018) reforça que um ponto importante a ser ressaltado é que os isoladores são instalados em linhas aéreas através de cadeias de isoladores, sendo o número de isoladores por cadeia determinado pela tensão da linha da rede e o conjunto de isoladores deve suportar tensões maiores que a tensão normal de operação, além de suportar surtos de manobra e eventos atmosféricos.

Menezes (2015) aponta que os isoladores de vidro são mais utilizados em linhas de transmissão de extra alta tensão por ter menor custo de manutenção e experiência de funcionamento comprovada. Já os isoladores poliméricos, eles são fabricados em uma única peça para ranquear e classe de tensão e apesar de possuírem menor custo em relação à cadeia completa dos isoladores de vidro, ainda assim possui um custo elevado de manutenção devido às técnicas de inspeção que o material apresenta, por serem caros e pouco confiável.

Corroborando com o exposto, nota-se também que os isoladores poliméricos apresentam o melhor desenvolvimento quanto a níveis de poluição, se mostrando muito mais resistentes do que os de vidro e porcelana, além de também apresentar uma maior resistência a vandalismos.

Quando comparado os isoladores poliméricos com os isoladores de vidro e porcelana, é perceptível que os isoladores cerâmicos possuem uma maior resistência a rupturas mecânicas. No entanto, o que traz desvantagem para o isolador cerâmico, no caso o de porcelana, é referente ao seu peso, pois devido a composição de seu material torna-o muito mais pesado do que o isolador polimérico. O isolador polimérico, além de ser muito mais leve, ele também apresenta uma vantagem quanto ao seu armazenamento e transporte (PEREIRA, 2020).

Tratando-se da manutenção dos isoladores observa-se que os isoladores de vidro proporcionam uma melhor visualização devido ao fato de estilhaçarem quando apresentam falhas ou algum sinal de vandalismo. Esse é outro fato que não pontua o

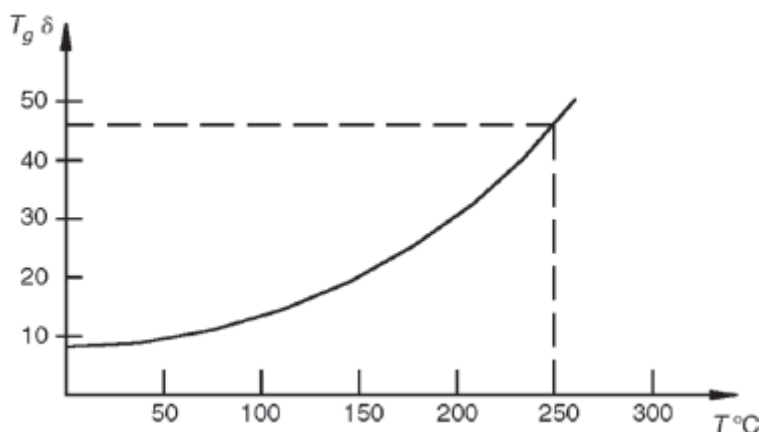
isolador de porcelana, visto que quando acontece trincos seus defeitos não são muitas vezes visíveis e suas possíveis rachaduras e falhas se tornam imperceptíveis.

Comparando em termos de isoladores de vidro e os isoladores de porcelana, com os isoladores poliméricos quanto a sua manutenção, eles apresentam uma certa dificuldade, pois precisa mobilizar uma equipe para a sua manutenção devido ao fato de suas falhas não serem identificadas, no entanto ele ganha um ponto positivo tratando de sua fácil instalação e devido ao seu pouco peso.

No comparativo de Queirós (2013) são expostas algumas diferenças estruturais entre os isoladores cerâmicos e os poliméricos, podendo observar que de maneira geral os isoladores cerâmicos são mais vulneráveis a danos por impacto devido ao seu material dielétrico ser mais quebradiço, porém são mais resistentes a ataques químicos e descargas elétricas, em especial o isolador de porcelana, visto que o de vidro é suscetível a ataques por conta dessas descargas o que ocasiona perdas em seu desempenho dielétrico.

A figura 24 ilustra o gráfico a seguir, sobre o aumento de perdas de desempenho dielétrico, representadas por $T_g \delta$, do vidro de sódio em função do aumento da temperatura, em graus celsius (MAMEDE FILHO, 2019).

Figura 24: Gráfico das perdas dielétricas dos isoladores de vidro.



Fonte: Mamede Filho, 2019

Outro ponto destacado pelo autor Queirós (2013), é que na realização de testes de envelhecimento acelerado em isoladores cerâmicos, foi observado uma taxa de falha de 15 a 30 vezes maior em caso de nevoeiro com partículas de sal, em comparação com nevoeiro livre de contaminantes.

Os isoladores cerâmicos, tem então, uma degradação menor quando comparados com os isoladores poliméricos. No entanto, tal atributo não o torna mais

fiável, já que a sua falha compromete a estabilidade das linhas de transmissão (QUEIRÓS, 2013).

Ao longo dos anos, os isoladores poliméricos foram ganhando vantagens em relação aos demais isoladores, pois conforme explica Queirós (2013), foram realizadas diversas experiências que tornaram capaz de ajustar alguns problemas que ele apresentava, além de serem amplamente utilizados em linhas de teste. As vantagens adquiridas são tanto operacionais como econômicas, quando comparados com os isoladores cerâmicos. Além de sua resistência para condições climáticas e concentração elevada de poluição natural ou de atividade humana. Na questão operacional, a sua constituição química de revestimento traz pontos positivos para esses isoladores, além de seus materiais serem orgânicos o que permite a degradação e o fato de seu revestimento ser de borracha ajuda na reciclagem e reutilização para outros fins (QUEIRÓS, 2013).

No entanto, os isoladores cerâmicos, em especial o de porcelana, apresenta uma vantagem que os poliméricos não têm, sua flexibilidade de comprimento, o que faz com que eles sejam facilmente ajustados ao tamanho das cadeias de isoladores das linhas de transmissão de energia. Possuem também linhas de fugas externas que aumenta a distância que a corrente de fugas tem que percorrer, além de sua longa duração devido ao material inorgânico utilizado em sua composição, que faz com que ele não desgaste nem envelheça ao longo dos anos, mantendo suas características dielétricas (QUEIRÓS, 2013).

Os autores Lima, Silva e Dantas (2017) relatam que os isoladores poliméricos são amplamente utilizados na Europa, América do Norte e Austrália, devido ao fato de diminuição dos custos dos projetos de linhas de transmissão de energia elétrica. Devido ao seu desempenho ser o muito positivo sob contaminação quando comparado aos demais isoladores, além de sua fácil instalação, os isoladores poliméricos vêm amplamente sendo utilizados nas linhas de transmissão, subestação e rede de distribuição. Dentre suas qualidades, está a hidrofobicidade tanto a névoa e a chuva, peso inferior quando comparado aos demais isoladores, sem alterar suas dimensões e proporcionando o aumento da sua capacidade de transmissão das torres e baixo custo.

De forma resumida, apresenta-se abaixo a figura 25 em forma de quadro com as vantagens e desvantagens de cada isolador, sendo desenvolvida pelo autor Lima, Silva e Dantas (2017)

Figura 25: Vantagens e desvantagens entre isoladores.

VANTAGENS E DESVANTAGENS ENTRE ISOLADORES		
MATERIAL	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
CERÂMICOS	<ul style="list-style-type: none"> - LONGO HISTÓRICO DE USO - PERFORMANCE CONHECIDA - FÁCIL INTERCAMBIABILIDADE - VIDA ÚTIL LONGA 	<ul style="list-style-type: none"> - PESO - CORROSÃO NAS FERRAGENS - SUSCEPTÍVEL AO VANDALISMO - TRINCAS POR DILATAÇÃO DA COMPOSIÇÃO - SUPERFÍCIE HIDROFÍLICA - DIFÍCIL SUBSTITUIÇÃO
VIDRO	<ul style="list-style-type: none"> - LONGO HISTÓRICO DE USO - VIDA ÚTIL LONGA - PERFORMANCE QUANTIFICADA - TECNOLOGIA AMADURECIDA - FLEXIBILIDADE NO AJUSTE DO COMPRIMENTO - FÁCIL IDENTIFICAÇÃO QUANDO DANIFICADO 	<ul style="list-style-type: none"> - PESO - SUPERFÍCIE HIDROFÍLICA - ATRATIVIDADE AO VANDALISMO - CORROSÃO NAS FERRAGENS - CONCENTRAÇÃO DE USO EM ISOLADORES TIPO DISCO
POLIMÉRICOS	<ul style="list-style-type: none"> - HIDROFOBICIDADE - PESO - CARGA MECÂNICA - FACILIDADE DE MANUSEIO - FÁCIL SUBSTITUIÇÃO - GRANDE GAMA DE APLICAÇÃO - UTILIZAÇÃO EM LT's COMPACTAS - PREÇO - MENOS ATRATIVO AO VANDALISMO - MATERIAL LIVRE DE CORROSÃO SUPERFICIAL 	<ul style="list-style-type: none"> - TECNOLOGIA MAIS RECENTE - REQUER INSPEÇÕES MAIS COMPLEXAS - DIFICULDADE NA VERIFICAÇÃO DE DEFEITO - MAIS CUIDADO COM O MANUSEIO

Fonte:Lima, Silva e Dantas, 2017.

Pela figura então, somos capazes de observar que os isoladores cerâmicos e de vidro apresentam um longo histórico de utilização, tendo uma performance muito mais conhecida e qualificada quando comparado com os isoladores poliméricos, pois são teoricamente ditos como “novos” no mercado. Quando observados os isoladores poliméricos, percebe-se que suas vantagens são muito maiores quando comparados com os isoladores cerâmicos e de vidro, sem falar de suas limitações que também são relativamente baixas quando comparados com os outros isoladores.

Lima, Silva e Dantas (2017) apontam que além de tudo isso, os materiais cerâmicos também apresentam algumas propriedades úteis de acordo com os lugares em que podem ser aplicados, como fácil modelagem em diversas formas, baixa perda dielétrica, baixo coeficiente de dilatação térmica, ótima resistência a choques térmicos e alta flexibilidade.

Portanto a utilização de materiais cerâmicos possui um campo vasto, algumas das áreas de aplicação podem ser, as indústrias petrolíferas, na área

de telecomunicações, agricultura, e, sem dúvidas, como estamos percebendo no decorrer do artigo, a sua tamanha importância e utilização no sistema elétrico de potência (SEP). (LIMA; SILVA; DANTAS, 2017, p. 17)

Nesse sentido, podemos observar que por mais que o isolador de porcelana seja utilizado em grandes áreas, ela está perdendo espaço devido aos isoladores de vidro e poliméricos por serem mais leves e mais resistentes a corrosões.

Já os isoladores de vidro também apresentam em sua maioria propriedades semelhantes, às quais podemos citar baixa dilatação térmica, alta viscosidade, durabilidade quanto a atividade elétrica baixa, ótima resistência à água, possui elasticidade para suportar grandes pesos, devido ao seu processo de fabricação ser realizada com a têmpera eles ganham maior dureza, suportam maior pressão do que tração (LIMA; SILVA; DANTAS; 2017).

De maneira geral, a tabela 1 abaixo exposta por Pereira (2020), apresenta de maneira abrangente a comparação entre os isoladores, trazendo as principais características e suas utilizações, além de quesitos importantíssimos de serem analisados.

Tabela 1: Comparação entre os diferentes tipos de isoladores.

	Isolador de Vidro	Isolador de Porcelana	Isolador Compósito
Utilização histórica	Intermediário	Alto	Baixo
Grau de liberdade de design do perfil	Intermediário	Baixo	Alto
Tolerância a esforços mecânicos	Intermediária	Alta	Baixa
Peso	Intermediário	Alto	Baixo
Hidrofobicidade	Intermediária	Baixa	Alta
Visibilidade das falhas	Alta	Intermediária	Baixo
Grau de dificuldade de manutenção	Alto	Alto	Baixo
Custo relativo	Intermediário	Alto	Baixo

Fonte: Pereira, 2020.

Garcia e Santos Filho (2003) também apresentam algumas tabelas com informações referente aos isoladores e suas utilizações. Foi realizado um estudo pelos autores, visando coletar dados informativos sobre os isoladores, através de empresas

de energia elétrica que atuaram no mercado nos anos de 1997 a 2000. A pesquisa foi respondida pela CTEEP que é a ex-cesp, copel e eletrosul, com dados atualizados até 1998, as empresas CEMIG Chesf COELBA CPFL ELETRONORTE furnas e light com dados atualizados até outubro de 2000.

Os autores apontam em seus resultados que cerca de 16 milhões de isoladores, corresponde a 71,3% estão instalados sob tensão igual ou superior a 230kV. Conforme tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Quantidade aproximada de isoladores instalados.

QUANTIDADE DE ISOLADORES INSTALADOS	
Tensões < 230 kV	Tensões ≥ 230 kV
5.401.765 unidades	10.820.346 unidades
TOTAL GERAL: 16.222.111 unidades	

Fonte: Garcia e Santos Filho, 2003.

Observou-se que há a predominância na utilização dos isoladores de vidro em todas as empresas que participaram da pesquisa, exceto pela Light que utiliza os de porcelana. A figura 26 que apresenta a porcentagem aproximada de utilização de isoladores por linha de transmissão.

Figura 26: Porcentagem aproximada de cada tipo de isolador nas LT's.

<i>TENSÕES INFERIORES A 230 KV</i>		
80 kN	Porcelana	24,3%
	Vidro	50,3%
	Polimérico	0,5%
120 kN	Porcelana	3,8%
	Vidro	18,9%
	Polimérico	2%
12,5 kN	Line-post porcelana	0,2%
110,7 kN	Line-post polimérico	0,2%
<i>TENSÕES SUPERIORES OU IGUAIS A 230 KV</i>		
80 kN	Porcelana	15,4%
	Vidro	24%
	Polimérico	0,1%
120 kN	Porcelana	8,2%
	Vidro	48%
	Polimérico	0,8%
160 kN	Vidro	3,8%
	Porcelana	1,7%
	Polimérico	0,2%

Fonte: Garcia e Santos Filho, 2003.

Os demais dados apresentados pelos autores, dispõe sobre a média anual de

desligamentos por km de linha, bem como as falhas que eles apresentam. Observe na figura 27 referentes as falhas dos isoladores por nível de importância, e na figura 28 a média anual de desligamentos.

Figura 27: Falhas por tipo de isolador.

ISOLADORES DE PORCELANA TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
Descarga atmosférica	Vandalismo	Poluição	Defeito de fabricação	Corrosão	Outras
1ª (3) 2ª (1)	2ª (2) 3ª (1) 1ª (1)	3ª (1)	2ª (1) 4ª (1)	2ª (1) 3ª (3)	4ª (1)
TENSÕES SUPERIOR OU IGUAL A 230 KV					
Descarga atmosférica	Vandalismo	Poluição	Defeito de fabricação	Corrosão	Outras
3ª (1)	1ª (1)	4ª (1)	4ª (1)	4ª (1)	2ª (1) Queimadas
ISOLADORES DE VIDRO TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
Descarga atmosférica	Vandalismo	Poluição	Defeito de fabricação	Corrosão	Outras
1ª (4) 3ª (2) 2ª (2)	2ª (2) 1ª (4) 3ª (1)	4ª (1) 2ª (2) 3ª (1)	4ª (2)	2ª (2) 4ª (2) 3ª (1)	3ª (2) Outros
TENSÕES SUPERIOR OU IGUAL A 230 KV					
Descarga atmosférica	Vandalismo	Poluição	Defeito de fabricação	Corrosão	Outras
2ª (2) 3ª (1)	1ª (3) 3ª (0)	2ª (1) 4ª (1)	3ª (1) 4ª (1)	2ª (1) 4ª (1)	3ª (1) Queimadas
ISOLADORES POLIMÉRICOS TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
Descarga atmosférica	Vandalismo	Poluição	Defeito de fabricação	Corrosão	Outras
3ª (1)		3ª (1)			

OBS.: Os níveis 1ª, 2ª, 3ª, etc referem-se à importância relativa de cada causa. Os valores entre parênteses referem-se ao número de empresas que selecionou a opção.

Fonte: Garcia e Santos Filho, 2003.

Figura 28: Média anual dos desligamentos permanentes por Km de linha.

EMPRESA	PERÍODO DE APURAÇÃO	TENSÃO DO SISTEMA		PERÍODO DE APURAÇÃO – 62 ANOS TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
		< 230 kV	≥ 230 kV	Isolador	Cabos condutores	Cabos pára-raios	Estrutura	Ferragens	Outros
CEMIG	1998 a 2000	0,00105	0,00228	46,4%	19,6%	3,6%	16,3%	0,8%	13,2%
CTEEP	1993 a 1995	0,0018	0,0007						
CHESF	1992 a 1996	0,0210	0,00075	PERÍODO DE APURAÇÃO – 51 ANOS TENSÕES SUPERIORES OU IGUAIS A 230 kV					
COPEL	1994 a 1996	0,00342	0,00156						
CPFL	1992 a 1997	0,00709	-	63,2%	9,7%	7,4%	10,1%	1,8%	7,8%
COELBA	1998 a 2000	0,006	0,005						
ELETRONORTE	1997 a 2000	0,0004	0,0003	PERÍODO DE APURAÇÃO – 51 ANOS TENSÕES SUPERIORES OU IGUAIS A 230 kV					
ELETROSUL	1995 a 1996	0,00045	0,00045						
FURNAS	1992 a 1996	0,0015	0,00053	63,2%	9,7%	7,4%	10,1%	1,8%	7,8%
LIGHT	1996 a 2000	0,03	0,01						

Fonte: Garcia e Santos Filho, 2003.

A figura 29 apresenta a incidência dos tipos de defeitos que os isoladores apresentam e que conseqüentemente causa suas falhas.

Figura 29: Incidência de tipos de defeito do isolador que causam falhas.

ISOLADORES DE PORCELANA TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
Quebra do dielétrico	Perfuração	Soltura do pino	Soltura da campânula	Rompimento do pino ou campânula	Fusão do pino ou da campânula
1ª (3) 2ª (2)	1ª (2) 3ª (1)			2ª (2) 3ª (1)	3ª (1)
TENSÕES SUPERIOR OU IGUAL A 230 kV					
Quebra do dielétrico	Perfuração	Soltura do pino	Soltura da campânula	Rompimento do pino ou campânula	Fusão do pino ou da campânula
1ª (2)	2ª (2)			3ª (2)	
ISOLADORES DE VIDRO TENSÕES INFERIORES A 230 kV					
Quebra do dielétrico	Perfuração	Soltura do pino	Soltura da campânula	Rompimento do pino ou campânula	Fusão do pino ou da campânula
1ª (8)	2ª (1) 3ª (1)		3ª (1)	2ª (4)	3ª (1)
TENSÕES SUPERIOR OU IGUAL A 230 kV					
Quebra do dielétrico	Perfuração	Soltura do pino	Soltura da campânula	Rompimento do pino ou campânula	Fusão do pino ou da campânula
1ª (6)	2ª (2)	2ª (1)		3ª (1) 2ª (2)	

OBS.: Os níveis 1ª, 2ª, 3ª, etc referem-se à importância relativa de cada causa. Os valores entre parênteses referem-se ao número de empresas que selecionou a opção.

Fonte: Garcia e Santos Filho, 2003.

A tabela 3 é representada por Garcia e Santos Filho (2003) com o número de isoladores instalados por nível de tensão.

Tabela 3: Número de isoladores instalados de acordo com a tensão.

Nível de Tensão	Suspensão	Ancoragem	Line-post não Ancorado	TOTAL
69 kV	48987	6340	0	55.327
138 kV	2.683	464	180	3.377
161 kV	0	203	0	203
230 kV	7.524	1078	0	8.602
345 kV	24	0	0	24
440 kV	1	1	0	1
500 kV	6.182	75	0	6.257
600 kV CC	2	0	0	2
750 kV	1	0	0	1
Totais	51330	7054	180	73.794

Fonte: Garcia e Santos Filho (2003)

Zeitoune (2019) realizou um estudo de caso apresentando a pesquisa de Mustafa et al (2012) sobre a aplicação do isolante RTV (*Room Temperature Vulcanizing*) em isoladores de vidro e cerâmicos na subestação de Camaquã (CAM) e Presidente Médici (UPME) no Rio Grande do Sul, com o objetivo de apresentar a eficácia de sua aplicação nos isoladores da linha de transmissão, visando a diminuição de desligamentos de sistemas de potência em relação a umidade impregnada. Como resultado obtido deste estudo do autor, apresenta-se uma tabela que entre os anos de 2012 e 2016 mostram o total de desarmes de proteção dos isoladores. A figura 30 demonstra o resultado obtido.

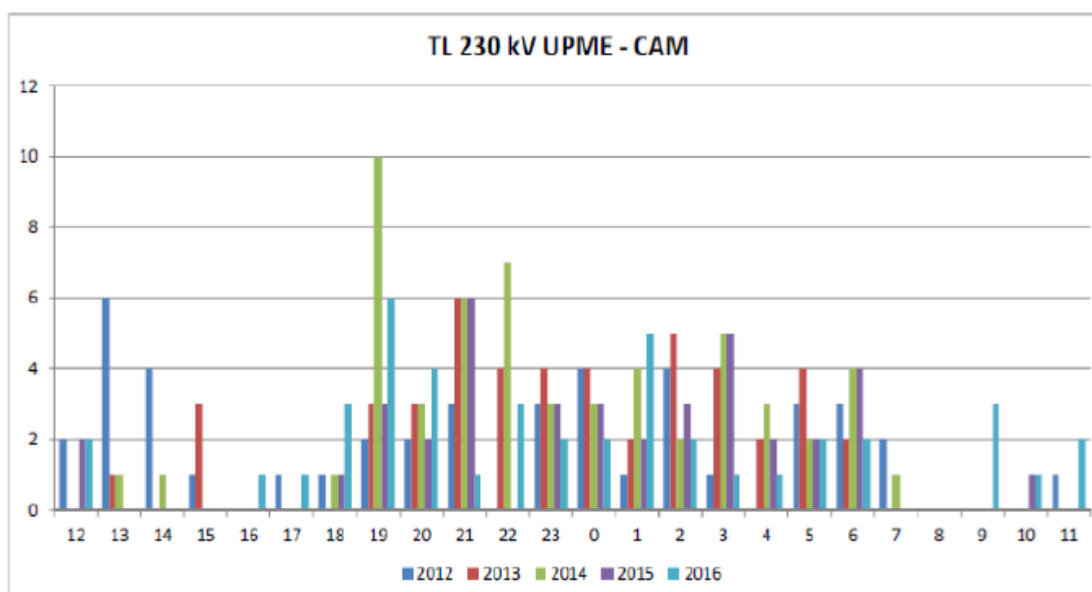
Figura 30: Número de desarmes da proteção entre 2012 e 2016.

Months	2012	2013	2014	2015	2016
1	1	1	1	1	4
2	1	1	1	1	1
3	2	2	1	1	1
4	1	1	1	2	5
5	8	5	9	5	5
6	2	12	16	10	4
7	11	10	15	11	14
8	1	5	4	0	5
9	2	1	1	3	2
10	2	1	0	3	1
11	0	3	5	1	0
12	0	5	2	1	1
Total Protection Trips Under Good Weather	31	47	56	39	43

Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

Em um gráfico também exposto pelo autor, demonstra o período do dia e horário que ocorreram os desarmes de proteção entre os anos de 2012 e 2016. A figura 31 que demonstra o resultado:

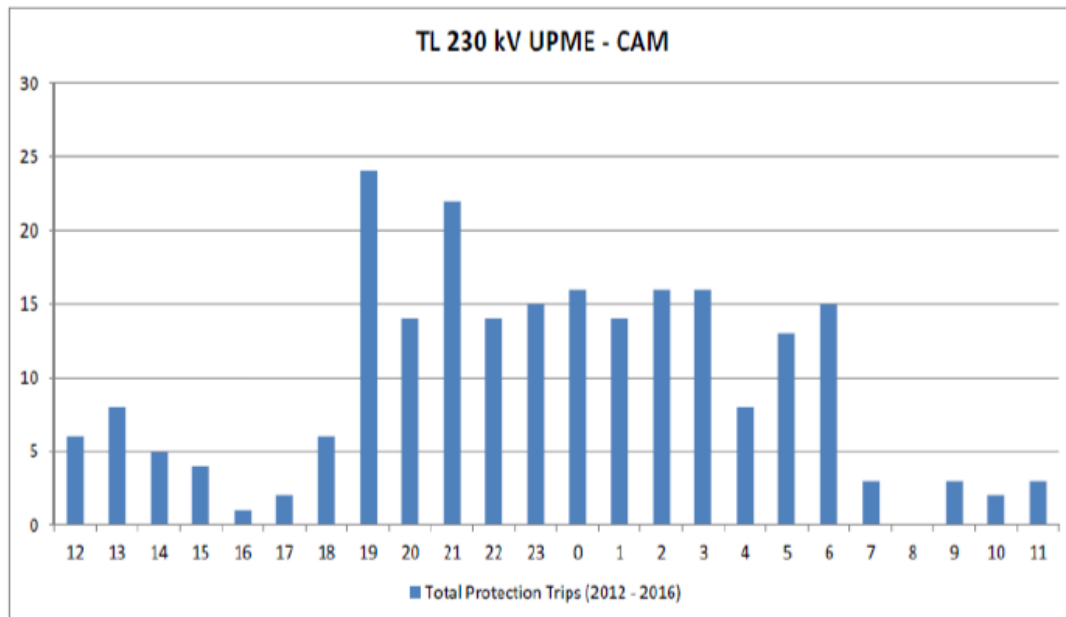
Figura 31: Número total de desarmes de proteção ao longo do dia (2012 e 2016).



Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

Na figura 32 é possível observar que o número de desarmes ocorreu em sua maioria, em eventos noturnos e matinais em que a umidade era relativamente alta e a temperatura relativamente baixa, visto que foi realizado especificamente nos meses de maio e julho em que ocorre o inverno de forma muito mais intensa no sul do Brasil.

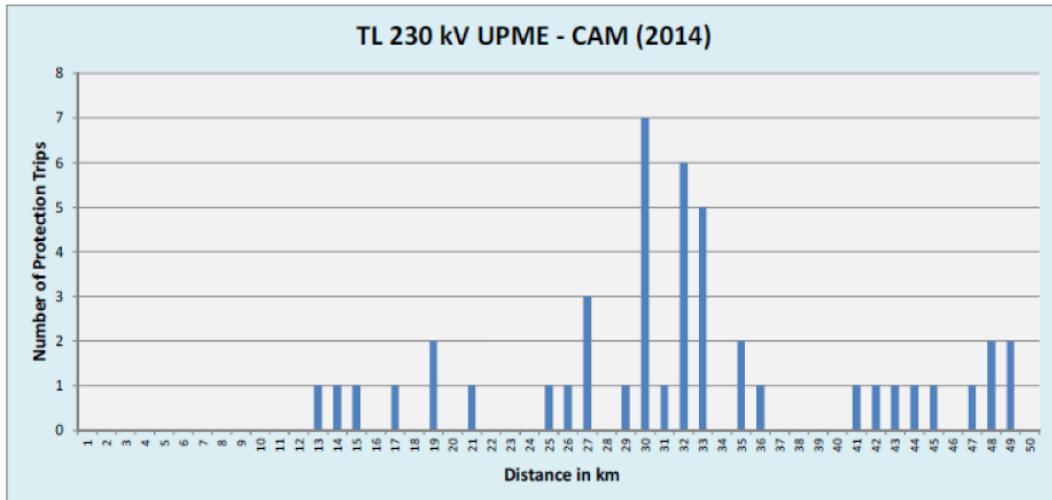
Figura 32: Número de desarmes de proteção ao longo do dia.



Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

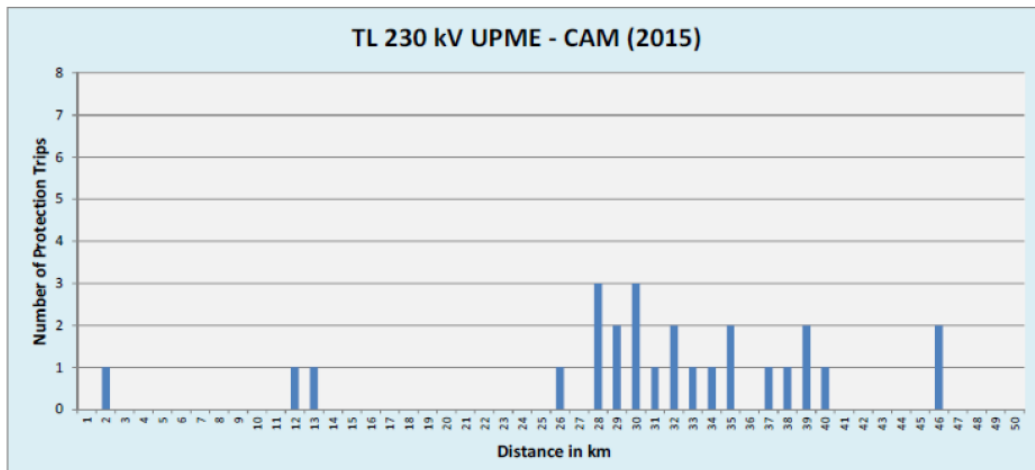
Com a utilização desse isolante RTV nos isoladores, ao longo do ano de 2014 foi perceptível os resultados positivos quando ao uso dessas cadeias completas ente os km 21 e o km 25. Nesse caso Zeitoune (2019, p. 94) fala que “a utilização de apenas um único isolador com RTV no topo das cordas nas seções adjacentes da linha de transmissão, proporcionou uma redução substancial do número de desarmes de proteção”. Abaixo as figuras 33, 34 e 35 representam isso:

Figura 33: Número total de desarmes de proteção em 2014 ao longo de 50 km da subestação UPME.



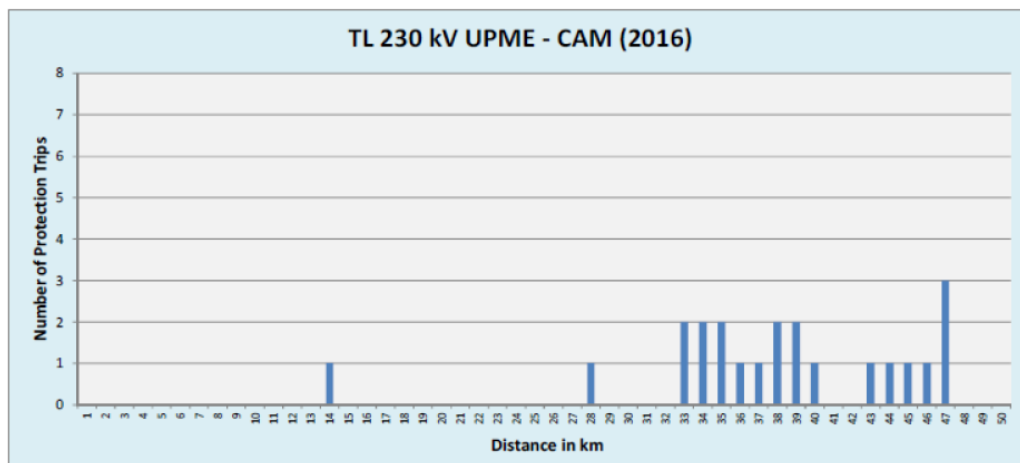
Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

Figura 34: Número total de desarmes de proteção em 2015 ao longo de 50 km da subestação UPME.



Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

Figura 35: Número total de desarmes de proteção em 2016 ao longo de 50 km da subestação UPME.



Fonte: Mustafa et al, 2012 apud Zeitoune, 2019.

Visivelmente se vê que houve uma redução considerável no número de desarmes de proteção de 2016 em relação a 2014, conforme afirma Zeitouné (2019), uma redução de mais de 50% do número de eventos.

Tratando do quesito orçamentário, para que seja possível obter os valores do custo de uma linha de transmissão de energia, Menezes (2015) explica que para a composição do cálculo serão necessárias premissas básicas: as quantidades e custos unitários dos materiais e serviços que são especificados. Dessa forma são organizados os itens e relacionados de acordo com o tipo de atividade que será realizada, para que através de operações algébricas simples chegue-se a custos parciais e posteriormente custos totais do projeto.

Dessa forma, compreende-se que todos os elementos influenciam no valor final e por isso devem ser incluídos. Várias premissas são analisadas para que se tenha uma estimativa de custos, como alternativas econômicas para os cabos condutores, variações de traçado, redução ou aumento no tempo da obra, quantidade da equipe, entre outros. Outro ponto importante que ajuda na variável quanto aos custos da obra é a localização (MENEZES, 2015).

Além disso, a tensão da linha de transmissão também é um fator determinante para o orçamento, pois quanto maior a potência transmitida maior é o módulo da tensão e a capacidade para transmitir a corrente elétrica, o que conseqüentemente aumenta o diâmetro da bitola do cabo condutor e o número de sub condutores por fase, o que acaba influenciando no peso da estrutura e no quantitativo das fundações. A mão de obra também é relevante para os custos, uma vez que é necessário pagar salários e condições mínimas de trabalho para que as equipes possam atuar no projeto e os valores dos materiais equipamentos, serviços e encargos também contam nesses custos (MENEZES, 2015).

Questionando-se sobre os valores dos isoladores para o projeto da linha de transmissão de energia elétrica, Pereira (2020, p. 30) explica que

No aspecto financeiro, os custos relacionados às cadeias de isoladores podem variar de acordo com a classe de tensão do sistema, que auxilia na determinação de quantos isoladores de vidro ou porcelana configurarão a cadeia, para efeitos de melhor compreensão, são comumente utilizados 5 isoladores cerâmicos em cadeias de 69 kV, contra um isolador polimérico, assim como em cadeias de 500 kV são frequentemente utilizados 26 isoladores de vidro ou porcelana, para montagem simples, e apenas 1 isolador polimérico. Assim compreende-se a variação em torno de 60% mais baratos na aquisição de isoladores poliméricos em linhas de 69 kV e 138 kV comparando-os aos isoladores de vidro e acerca de 70% mais baratos aos

fabricados com porcelana. A partir de 230 kV até 500 kV os custos estabilizam-se em 50% mais vantajosos para os isoladores poliméricos.

Diante de todo esse exposto para se saber o valor para a construção de uma linha de transmissão de energia elétrica, Menezes (2015) coloca disposto em uma planilha resumida, a cotação referente aos materiais utilizados para a obra além de constar o peso que cada item atribui ao valor final. Abaixo a figura 36 apresenta a planilha criada pelo autor:

Figura 36: Resumo dos custos dos componentes de uma linha de Transmissão.

RESUMO DOS CUSTOS DOS COMPONENTES DE UMA LT							
Tipos de LTs	Percentual do		Custo percentual dos materiais				
	Mat. (i)	Constr. (ii)	Cond.	Para-raios	Isolad.	Estrut.	Fund.
LTs entre 150 kV e 300 kV	65.0	35.0	31.0	3.5	9.3	36.0	19.7
LTs acima de 300 kV	62.6	37.4	34.1	3.9	6.9	36.4	18.7
LTs circuito simples	63.6	36.4	33.1	4.2	8.2	35.6	18.8
LTs circuito duplo	63.8	36.2	32.0	3.3	8.1	36.6	19.6
LTs com torres autoportantes	64.1	35.9	31.9	3.9	8.1	36.6	19.6
LTs com torres estaiadas	59.6	40.4	32.8	3.2	8.3	36.0	19.8
LT c/ 1 cond. por fase	64.4	35.6	32.2	4.2	8.5	36.3	18.8
LT c/ 2 cond. por fase	64.6	35.4	32.3	4.0	8.1	36.2	19.4
LT c/ 3 cond. por fase	60.8	39.2	35.1	3.7	7.0	40.3	13.8
LT c/ 4 cond. por fase	61.4	38.6	33.4	2.7	7.6	33.4	22.9
LT c/ cond. CAA 150 kV a	65.1	34.9	31.5	3.7	9.3	35.7	19.8
LT c/ cond. CAL 150 kV a	62.7	37.3	30.9	0.5	10.1	41.3	17.2
LT c/ cond. CAA acima 300 kV	64.3	35.3	34.1	4.0	7.2	35.3	19.3
LT c/ cond. CAL acima 300 kV	57.0	43.0	34.0	3.2	6.0	40.0	16.7

(i) Material / (ii) Construção

Fonte: Menezes, 2015.

Nota-se, entretanto, que a figura 36 apresentada pelo referido autor, que os isoladores compõem um percentual de custo ínfimo se comparado aos demais materiais e componentes utilizados para a obra. Podemos então constatar que não há como mensurar o valor de um isolador para obra de uma linha de transmissão de energia, visto que ele depende única e exclusivamente de suas quantidades e tensões. Tratando-se da linha de transmissão aérea, os isoladores são utilizados em formas de cadeias e o que determina a sua quantidade é a tensão da linha, dessa forma então fica ainda mais difícil de saber o valor exato do custo de um isolador.

4.1 NORMAS EXISTENTES E APLICAÇÕES

Em relação a normatização, a ABNT NBR 5472, Isoladores para Eletrotécnica,

define os principais termos relacionados a isoladores aplicados a sistema de potência, a partir da qual são derivadas as demais normas relevantes ao tema.

A ABNT NBR 15121, trata especificamente de ensaios de medição para avaliação de rádio interferência. Essa norma especifica os procedimentos de ensaio para os isoladores e como principais parâmetros, pode-se citar que são realizados em isoladores limpos e secos, com aplicações de tensões de testes entre 0,5 e 2 MHz, as quais representam as faixas para avaliação de interferência por rádio frequência.

Além disso, deve-se citar que as características de um isolador, em relação a imunidade contra rádio interferência, podem ser variáveis em função das condições ambientais, como chuva, umidade e poluição. Apesar de que a ABNT NBR 15121 trata apenas de isoladores limpos e secos, os efeitos das condições adversas sobre a superfície do isolador são apresentados na IEC/CISPR 18-2.

Na ABNT NBR 10621, são tratados dos ensaios de poluição, para isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada. Essa norma é utilizada para determinar as características dos isoladores em relação a aplicações industriais, portanto está relacionada a faixas de frequência muito inferiores as citadas na ABNT NBR 15121. Essa norma inclui isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada com tensão máxima entre 1 kV e 1,2 kV.

Similarmente, a ABNT NBR 15123 trata de isoladores para linhas aéreas com tensão acima de 1 kV. Esta norma está relacionada com as cadeias ou arranjos de isoladores em linhas aéreas. Portanto, enquanto a ABNT NBR 10621 trata dos procedimentos de ensaio, a ABNT NBR 15123 trata das cadeias e arranjos dos isoladores, incluindo isoladores de vidro e porcelana.

A ABNT 15124 descreve o ensaio de perfuração, para avaliação dos isoladores sob condições de impulsos, incluindo isoladores do tipo disco, pino, bastão ou pilar de classe B.

Para isoladores de porcelana e vidro, em linhas aéreas com tensões acima de 1kV, é aplicada a ABNT NBR 5032. Desta forma, pode-se dizer que a ABNT NBR 5032 é uma norma complementar a ABNT NBR 15123, que trata das cadeias e arranjos de isoladores.

Além de normas gerais para isoladores, tais quais as normas citadas até aqui, existem uma série de normas específicas para cada tipo de isolador, incluindo a ABNT NBR 6249, ABNT NBR 7109, ABNT NBR 7110, ABNT NBR 10510 e ABNT NBR 12459. Todas essas normas estão relacionadas com as características mínimas exigíveis

para cada tipo de isolador, incluindo dimensões, procedimentos de ensaios, entre outras especificidades voltadas para sistemas de até 1 kV, que operam com frequência abaixo de 100 Hz. Na sequência, estão listadas cada norma e suas aplicações:

- I. ABNT NBR 6249: Isolador tipo roldana de porcelana ou vidro -Dimensões, características e procedimento de ensaio;
- II. ABNT NBR 7109: Isolador de disco de porcelana ou vidro - Dimensões e características;
- III. ABNT NBR 7110: Isolador de pino de porcelana ou vidro - Padronização de dimensões e características;
- IV. ABNT NBR 10510: Isolador bastão de porcelana - Padronização de dimensões e características;
- V. ABNT NBR 12459: Isolador tipo pilar de porcelana - Dimensões e características. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de toda a pesquisa realizada, foi possível apresentar uma análise comparativa entre os isoladores de vidro, porcelana e poliméricos, podendo destacar alguns aspectos importantes, como a utilização dos isoladores na estrutura de linhas de transmissão aéreas, verificando-se sua importância para a confiabilidade e funcionamento do sistema. Além disso, foi possível identificar algumas das possíveis falhas e defeitos que os isoladores apresentam de acordo com o local da instalação e o material utilizado.

Entretanto, ficou uma brecha ao não ser possível identificar o real valor dos isoladores perante os projetos das linhas de transmissão de energia elétrica, devido ao fato de depender de uma determinada quantidade para poder ser avaliado seu custo. Portanto, pode-se afirmar que é necessário avaliar as vantagens e desvantagens conhecidas de cada tipo de isolador ao definir um equipamento, além de levar em consideração as características de degradação, manutenção e durabilidade, para que a linha de transmissão de energia apresente um bom desempenho e assim poder mensurar o seu valor perante o projeto.

Quanto a viabilidade do uso dos isoladores, constatou-se que o melhor isolador para se utilizar é o isolador polimérico devido as grandes vantagens que ele apresenta, principalmente por sua hidrofobicidade e maior resistência perante a poluição. Além disso, foi observado também que os isoladores poliméricos apresentam uma maior capacidade para suportar tensões elétricas e serem mais resistentes ao vandalismo, bem como sua manutenção ser de baixo custo e ser mais leve. Um ponto negativo observado no isolador polimérico é o fato de suas falhas não serem perceptíveis, sendo necessário deslocar uma equipe para fazer uma inspeção minuciosa de manutenção e verificação dos desgastes.

Quanto aos isoladores de vidro e cerâmicos, foi identificado que são mais suscetíveis ao vandalismo e são totalmente hidrofílicos. Entretanto, foram apresentados estudos que constataram que o revestimento dos isoladores cerâmicos com silicone aumentou consideravelmente sua hidrofobicidade impactando na confiabilidade do sistema. Além disso, observou-se que eles apresentam mais degradação quando sujeitos à poluição. A vantagem desses isoladores está em suas falhas serem mais visíveis quando comparado com o isolador polimérico, principalmente o isolador de vidro que estilhaça totalmente.

Dessa forma, conclui-se que o real impacto da utilização dos isoladores nas linhas de transmissão de energia elétrica, está relacionado ao tipo de isolador selecionado para utilização, visto que quando empregado o isolador incompatível com empregabilidade no projeto da linha de transmissão, os desligamentos de potência podem ocorrer com mais frequência, conforme observado no estudo de Zeitoune (2019), que apontou altos índices de desligamentos nas linhas com os isoladores de vidro e porcelana, no inverno, período em que havia mais umidade.

Sendo assim, sabe-se que no Brasil o órgão responsável pela fiscalização da energia elétrica é a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Dentre todos os objetivos, ela tem como o principal entregar energia elétrica de qualidade e fiscalizar as concessionárias de transmissão de energia, sendo capaz de aplicar multas e punições para os que não cumprirem as normas. Compreende-se dessa forma, que caso as companhias não se adequem ao padrão conforme as normas regulatórias, não utilizando equipamentos de qualidade e os isoladores adequados para cada situação poderão causar prejuízos, além de receber multas e punições dos órgãos reguladores.

Portanto, conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados. Com a análise de utilização de cada tipo de isolador estudado, foi possível apresentar um comparativo de suas características, auxiliando na escolha do melhor componente a ser utilizado. Pode-se dizer que, esse é apenas o início de pesquisa de um tema que pode continuar a ser estudado, ficando então, para proposta de trabalhos futuros, um estudo de caso mais detalhado quanto a utilização de um isolador específico, entre os apresentados nesta pesquisa, em linhas de transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Serviços**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/orgaos/agencia-nacional-de-energia-eletrica> Acesso em: 15 março 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5472: Isoladores e buchas para eletrotécnica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15121: Isoladores para alta tensão - Ensaio de medição da radio interferência**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10621: Isoladores utilizados em sistema de alta tensão em corrente alternada - Ensaio de poluição artificial**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15123: Isoladores para linhas aéreas com tensões nominais acima de 1 000 V – Cadeias e arranjos de isoladores para sistemas de corrente alternada**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15124: Isolador de porcelana ou vidro para tensões acima de 1 000 V – Ensaio de perfuração sob impulso**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 5032 Isoladores para linhas aéreas com tensão acima de 1 000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6249: Isolador tipo roldana de porcelana ou de vidro – Dimensões, características e procedimentos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7109: Isolador de disco de porcelana ou vidro – Dimensões e características**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 10510: Isolador-bastão de porcelana – Padronização de dimensões e características**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 12459: Isolador tipo pilar de porcelana – Dimensões e características**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 7110: Isolador de pino de porcelana ou vidro - Padronização de dimensões e características**. Rio de Janeiro, 2019.

BONETTI, Alan Neves. TOMELIN, Jony C. ALARCON, Orestes E. OLIVEIRA. Antonio Pedro N. de. HORTZA, Dachamir. **Desenvolvimento de porcelana quartzosa para isoladores elétricos de alta tensão**. Exacta, São Paulo, v.7, n. 2, p. 187-194, 2009.

BRITO, Murilo Augusto de Araújo. **Relatório de estágio integrado**. Relatório de estágio integrado da Universidade Federal de Campina Grande para o curso de Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2018.

CAPELINI, Renato Massoni. **Inspeção remota de isoladores em linhas de transmissão a partir de sinais de descargas parciais externas**. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

DEUTSCH, Nicolay Massing. **Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos**. Projeto (Graduação) – Universidade Federal do Rio grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2016.

FERREIRA, Luiz Fernando P. **Curso de Isoladores: Processo de fabricação de isoladores de vidro temperado**. Cigre Brasil, Rio de Janeiro, 20 e 21 de Junho de 2017.

FONTANELLA, C.A. OLIVEIRA, A. P. N. HOTZA, D. **Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana**. Revista Matéria, v. 13, n. 4, pp. 624 – 635, 2008.

FUCHS, Rubens D. **Transmissão de energia elétrica: Linhas aéreas**. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1977

GARCIA, R. W. S. SANTOS FILHO, N. **Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 2: avaliação de desempenho**. Décimo Encuentro Regional Latino americano de la Cigré, 2003.

GERMER ISOLADORES. Catálogo 2018/2019. Disponível em: <http://www.germerisoladores.com.br/produto/> Acesso em: 09 jul. 2021.

GIANELLI, Bruno F. et al. **Materiais poliméricos do setor elétrico: o caso dos isoladores**. Anais do 10 o Congresso Brasileiro de Polímeros – Foz do Iguaçu, PR – Outubro/2009.

LIMA, Railson Sousa de. SILVA, Victor Hugo Gomes da. DANTAS, Flavio Gonçalves. **Viabilidade técnica da substituição de isoladores de vidro por poliméricos**. Artigo (Graduação) Universidade Potiguar - UNP, 2017.

LIRA, Helio L.; NEVES, Gelmires A. **Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8, n. 3, p. 110-117, 2013.

LOPES, DIEGO SOARES, **Modelo de elementos finitos aplicado na avaliação de desempenho de isolantes em ambientes contaminados**. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2019.

MELLO, Darcy R. de. **Dimensionamento de isoladores sob condições de poluição. Curso de isoladores**. Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. CIGRÉ - Brasil. Rio de Janeiro, 20 e 21 jun. 2017.

MENDONÇA, Phillip Luiz de. **Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em isoladores compostos de classe de tensão de 69kv através de radiografia computadorizada.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pernambuco, 2013.

MENEZES, Victor Prangiel. **Linhas de transmissão de energia elétrica aspectos técnicos, orçamentários e construtivos.** Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA E SILVA, Pietro Paolo J. C. G. P. de. **Inspeção da degradação nos isoladores de composto de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco CTG, Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Recife, 2009.

PEREIRA, Alessandro Albini. **Estudo da aplicação de isoladores elétricos em linhas de transmissão e subestações de acordo com o grau de poluição do ambiente.** Monografia (Especialização) Curso de Especialização em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2020.

PEREIRA, Eduardo. **Transmissão de Energia Elétrica.** Apostila, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Formiga, Formiga - MG, 2012.

QUARESMA, Giovanni Helbert. **Avaliação do desempenho de isoladores elétricos de porcelana através do uso de recobrimentos poliméricos hidrofóbicos.** Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.

QUEIRÓS, José Pedro Martinho. **Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compostos com isoladores em materiais convencionais.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

SANTA FÉ TRANSFORMADORES. Catálogo 2019. Disponível em: <https://santafetransformadores.com.br/isolador-bastao-porcelana-15-kv/> Acesso em 09 de jul. 2021.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais elétricos. Isolantes e magnéticos Volume 2.** São Paulo: Ed. Blucher, 2019.

SILVA, G.C. et al. **Validação de desempenho de isoladores cerâmicos e poliméricos no nordeste brasileiro por meio de medidas on line de corrente de fuga e classificação da severidade da contaminação local.** ANEEL, COELBA e LACTEC. G. C. Silva: LACTEC, BR 116 – km 98 – s/n, Curitiba – 2017.

SILVA, L. C. da. **Recuperação dos isoladores de vidro das linhas de transmissão condenados por corrosão e avaliação da aplicação de nanotecnologia na redução de acúmulo de poluentes.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2008

SOUSA, Pedro Emanuel Simões de Sousa. **Problemática do Isolamento nas Linhas de Muito Alta Tensão nas Zonas Poluídas**. Relatório de Estágio Curricular da LEEC 2005/06, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Porto, 2006.

TEXPI Equipamentos. **Isoladores de vidro**. Site. Disponível em: <https://www.texpi.com.br/isoladores-de-vidro.html>

THOMAZINI, Daniel. **Classificação da hidrofobicidade em isoladores elétricos poliméricos de alta tensão**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

TR, IEC CISPR. **18-1 Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High-Voltage Equipment—Part 1: Description of Phenomena**. IEC: Geneva, Switzerland, 2017.

YOSHIMURA, H. N.; GUEDES, S.; FREDECICCI, C. **Dielétrico de vidro de elevada confiabilidade mecânica e termomecânica produzido por têmpera de dois estágios (têmpera térmica + troca iônica)**. Revista Matéria, Rio de Janeiro. V. 4, n. 2, p. 845- 860, Jul. 2009. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo1105>. Acesso em 15 Jul. 2021.

XAVIER, JOSÉ ALEXANDRO RAMOS. **Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em Cadeias de isoladores a partir de aferições laboratorial**. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

ZEITOUNE, Rony Jacques. **O uso do isolante room temperature vulcanizing na mitigação do problema de desligamento de energia em linhas de transmissão de sistemas de potência**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ANEXOS

Links:

Isoladores: <https://youtu.be/bgWWcYYS37U>

Isoladores cerâmicos: <https://youtu.be/G7etM2ndrNQ>

Isoladores de vidro em cadeia: <https://youtu.be/HALVrSoHLNg>

Isolador tipo pilar em porcelana: <https://youtu.be/vxzGm4Vzjnl>

Isolador tipo pino: <https://youtu.be/CxuG62cMIM4>

Materiais Condutores e isolantes elétricos: <https://youtu.be/x5j19Dd5jWU>

Tipos de isoladores: <https://youtu.be/EiNAvWUwfcQ>

Transmissão de energia Elétrica: Avaliação dos Isoladores:

<https://youtu.be/SOp3H8kdMK8>