

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

ALESSANDRO ALBINI PEREIRA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES DE ACORDO COM O
GRAU DE POLUIÇÃO DO AMBIENTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2020

ALESSANDRO ALBINI PEREIRA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES DE ACORDO COM O
GRAU DE POLUIÇÃO DO AMBIENTE**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel

CURITIBA
2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Automação Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES DE ACORDO COM O GRAU DE POLUIÇÃO
DO AMBIENTE**

por

ALESSANDRO ALBINI PEREIRA

Esta monografia foi apresentada em 21 de fevereiro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Automação Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel
Orientador

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho ao meu irmão e meus pais que me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de alguma maneira fizeram parte dessa etapa da minha vida, nela incluindo todos os professores do curso juntamente com todos os colegas e amigos que ao longo da especialização colaboraram com essa conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sergio Stebel, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Julgue seu sucesso pelas coisas que
você teve que renunciar para conseguir.

(Dalai Lama)

RESUMO

PEREIRA, Alessandro Albini. **Estudo da aplicação de isoladores elétricos em linhas de transmissão e subestações de acordo com o grau de poluição do ambiente**. 2020. 35 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os diferentes tipos de isoladores elétricos disponíveis no mercado para utilização em sistemas elétrica de alta tensão, e caracterizá-los pelos materiais dielétricos com que são fabricados, particularidades, vantagens e desvantagens, as consequências causadas pelas falhas de desempenho durante a sua atividade e como essas são originadas. Foram levantados diversos parâmetros para uma análise teórica completa dos isoladores elétricos sob ambientes com diferentes níveis de poluição, os fatores que podem elevar ou reduzir a severidade dessa condição nas linhas de transmissão e subestações, tratados pela norma ABNT IEC TS 60815-1:2014, com diferentes abordagens e parâmetros de entrada.

Palavras-chave: Isoladores. Distribuição. Transmissão.

ABSTRACT

PEREIRA, Alessandro Albini. **Application study of electrical insulators in transmission lines and substations according to the degree of environmental pollution**. 2020. 35 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

This paper aims to present the different types of electrical insulators available on the market for use in high voltage electrical systems and to characterize by the dielectric materials with which they are manufactured, particularities, advantages and disadvantages, such as the consequences caused by the performance failures during the activity and how they originate. Several methods will be raised for a complete theoretical analysis of electrical insulators in environments with different levels of pollution, factors that can increase or reduce the severity of this condition in transmission lines and substations, according to ABNT IEC TS 60815-1:2014 , with different approaches and input parameters.

Keywords: Insulators. Distribution. Transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Isolador disco de vidro	16
Figura 2 – Isoladores de porcelana	17
Figura 3 – Isoladores poliméricos.....	19
Figura 4 – Distância de escoamento em isoladores de vidro	20
Figura 5 – Corrosão em isoladores de vidro	24
Figura 6 – Determinação da DEEU pela SPL.....	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Precisão das abordagens estabelecidas na ABNT IEC TS 60815-1:2014	27
Quadro 2 – Parâmetros de entrada para seleção e dimensionamento do isolador...28	
Quadro 3 – Comparação entre os diferentes tipos de isoladores em LTs.....	29

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DDNS	Densidade Superficial de Depósito Não Solúvel
DDSE	Densidade Superficial de Depósito de Sal Equivalente
DEEU	Distância de Escoamento Específica Unificada
HTV	<i>High Temperature Vulcanizing</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
kN	Quilo-Newton
kV	Quilo-Volt
mm	Milímetros
NaCl	Cloreto de Sódio
NBI	Nível Básico de Isolamento
PRFV	Polímero Reforçado Com Fibras de Vidro
RTV	<i>Room Temperature Vulcanizing</i>
SEL	Salinidade Equivalente Local
SPL	Severidade da Poluição Local
TS	<i>Technical Specifications</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 PROBLEMA	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 JUSTIFICATIVA	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE ISOLADORES ELÉTRICOS	15
2.1.1 Isoladores de Vidro	15
2.1.2 Isoladores de Porcelana	17
2.1.3 Isoladores Poliméricos	18
2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS	20
2.3 POLUIÇÃO NOS ISOLADORES ELÉTRICOS	22
2.3.1 Efeito Corona em Isoladores	23
2.3.2 Corrosão nos Isoladores	23
3 POLUIÇÃO EM ISOLADORES SEGUNDA A NORMA ABNT IEC TS 60815-1:2014	25
3.1 A ANTIGA NORMA IEC 60815 - 1986	25
3.2 ABORDAGENS PARA SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO ISOLADOR	26
3.3 PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A ESCOLHA E DIMENSIONAMENTO DE UM ISOLADOR	27
4 CONCLUSÃO	31
4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	31
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica até chegar ao consumidor, percorre diversas etapas, após a geração, esta precisa ser transmitida, e são as linhas de transmissão que realizam este processo, em sua maioria, as linhas são aéreas, e utilizam o ar que circundam os condutores e os isoladores elétricos como isolantes do sistema. A crescente demanda por energia elétrica é correspondente ao avanço tecnológico e do crescimento populacional, novos materiais têm sido implementados na sociedade, como na transmissão e distribuição da energia elétrica, com a finalidade de suprir o aumento do consumo em todo o Brasil. Tendo em vista que os isoladores de tensão estão presentes em ambos os sistemas, a utilização destes dispositivos tem sofrido enorme expansão, assim, muitas novas práticas têm sido desenvolvidas por parte das fábricas, fornecedores de matérias-primas, concessionárias, centros de pesquisas e universidades, pois visam a maior confiabilidade dos sistemas energéticos (DEUTSCH, 2016).

Diversos fatores externos podem influenciar no desempenho da suportabilidade elétrica dos isoladores nas linhas de transmissão, como a chuva, neblina, o vento e a ação da poluição depositada sobre os isoladores (XAVIER, 2017). Determinadas regiões do país possuem maior grau de severidade quanto ao nível de poluição na aplicação de materiais dielétricos em sistemas de alta tensão, decorrente do ambiente em que são instalados.

Os isoladores quando montados em conjunto compõem uma cadeia, e são componentes fundamentais nos sistemas elétricos de transmissão e distribuição. As cadeias localizam-se entre elementos condutores (como cabos e barramentos) e a estrutura de suporte, ao mesmo tempo em que servem para isolar eletricamente elementos com diferentes potenciais. Normalmente inúmeras falhas ocorrem nas cadeias das linhas de transmissão, e quando a falha provoca danos aos isoladores, deve-se substituí-los o mais breve possível, de modo a voltar às condições normais do projeto das cadeias, porém estas estão sujeitas a problemas que podem gerar perda nos índices de confiabilidade do sistema e grande tempo é dispensado para a manutenção, problemas como os atos de vandalismo, corrosão nas ferragens e a poluição dos isoladores. Quando se atinge um grau de poluição intenso, tem-se uma

condição favorável para gerar um arco elétrico com energia considerável para provocar a falha do isolador e o resultante desligamento da linha de transmissão.

1.2 PROBLEMA

Os isoladores são equipamentos indispensáveis do sistema de distribuição e transmissão de energia. O estudo dos eventos que recaem sobre ele é essencial para prosseguir com sua correta atuação no transcorrer do tempo. A poluição nos isoladores acontece através de contaminantes que podem ter sido gerados por indústrias, regiões ambientais e/ou marítimas. Os depósitos, se aliados à umidade, propiciam o surgimento de descargas superficiais, e podem progredir para a ocorrência de arcos de potência ao longo da cadeia de isoladores, ocasionando em interrupções no fornecimento de energia. No qual são aplicadas penalidades pela ANEEL às empresas transmissoras de energia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar uma análise teórica do uso dos isoladores elétricos em linhas de transmissão e subestações de acordo com a região em que são aplicados, considerando o material dielétrico utilizado em sua fabricação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral neste trabalho de conclusão de curso de especialização os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Realizar uma análise detalhada dos isoladores elétricos de vidro, porcelana e polimérico aplicados em linhas de transmissão e subestações;
- Indicar as características e funcionalidades dos isoladores elétricos;
- Avaliar os diferentes critérios de antipoluição dos isoladores elétricos para diferentes ambientes;
- Classificar os isoladores elétricos em função dos aspectos ambientais e do material dielétrico.

1.4 JUSTIFICATIVA

A extrema competitividade, necessidade de segurança, possibilidade de altas penalidades e a redução de custos exigem isoladores elétricos de tensão com o maior custo-benefício plausível. Embora o percentual financeiro envolvido na participação dos isoladores no custo total da instalação de uma linha de transmissão seja relativamente reduzido (até 5% do custo total), quando se conferem os custos da operação e manutenção, a presença destes dispositivos tem uma parcela de cerca de aproximadamente 70% do custo total (MENDONÇA, 2013). Além dos pontos levantados, segundo Yoshimura, Guedes e Fredecicci (2009) o Brasil é o país em que há a maior ocorrência de raios e distúrbios gerados por descargas atmosféricas, e se tornaram um grande problema para a alimentação de energia, esses surtos são capazes de provocar avarias aos isoladores através dos elevados esforços elétricos, pelas altas correntes dos raios ou pelos arcos resultantes da disrupção (início de centelhas) do equipamento. Desta forma, se faz necessária a coleta de informações em relação aos diferentes tipos de isoladores utilizados nas linhas de transmissão, com o propósito de ser realizada a melhor escolha, considerando-se pausas para manutenção, confiabilidade no sistema, preço, disponibilidade no mercado, entre demais aspectos, visto que essas informações são escassas, e comumente é afirmado que determinados tipos de isoladores são melhores que outros, sem bases técnicas, e poucos estudos comparativos realizados entre os diferentes tipos de isoladores.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia de especialização está dividida em 4 (quatro) seções. Nesta primeira seção foi introduzido o assunto tema do trabalho e também foram abordados a motivação e os objetivos geral e específicos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

Na segunda seção: “Desenvolvimento”, está a fundamentação teórica sobre os isoladores elétricos. Estão apresentados os tipos de isoladores utilizados no país e as diferenças construtivas entre eles, além das características dimensionais, elétricas e mecânicas que são consideradas para o projeto do isolador. Como o

efeito da poluição é originada e afeta as linhas de transmissão e por consequência o fornecimento de energia elétrica ao consumidor.

Já a terceira seção: “Poluição em isoladores segundo a norma ABNT IEC TS 60815-1:2014”, aborda a norma ABNT IEC TS 60815-1:2014 que determina parâmetros de poluição nos isoladores, e auxilia na escolha e definição dos isoladores apropriados de acordo com o ambiente onde serão instalados.

Por último na quarta seção: “Conclusão”, estão as questões referentes a cada tipo de isolador disponível no mercado, as consequências da especificação rasa desses e a importância da seleção e dimensionamento considerando os parâmetros abordados pela norma em ambientes com diferentes níveis de poluição. Finalizando com a apresentação de sugestões para trabalhos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE ISOLADORES ELÉTRICOS

Os principais tipos de materiais dielétricos utilizados nos isoladores são a porcelana vitrificada, vidro temperado, e poliméricos. A utilização e dimensionamento das cadeias de isoladores deve satisfazer a diversas condições impostas, em função do material, como aplicação, tensão de operação, ambiente em que será instalado. Em Mello (2017), “A redução do desempenho de isoladores ocorre principalmente devido à poluição depositada sobre as superfícies isolantes, e pode formar uma superfície parcial ou totalmente condutora quando umidificada”. De acordo ainda com esses autores, pode-se considerar como os 3 principais agentes responsáveis por essa umidificação da camada poluente, respectivamente o chuvisco, a névoa, e o orvalho, nos quais causam um aumento considerável no percentual de descargas disruptivas ocorridas nos isoladores (MELLO, 2017). Para contribuir então com a redução na formação da camada condutora, muitas vezes inevitável, deve-se projetar os isoladores de forma a dificultar a ocorrências das descargas disruptivas.

2.1.1 Isoladores de Vidro

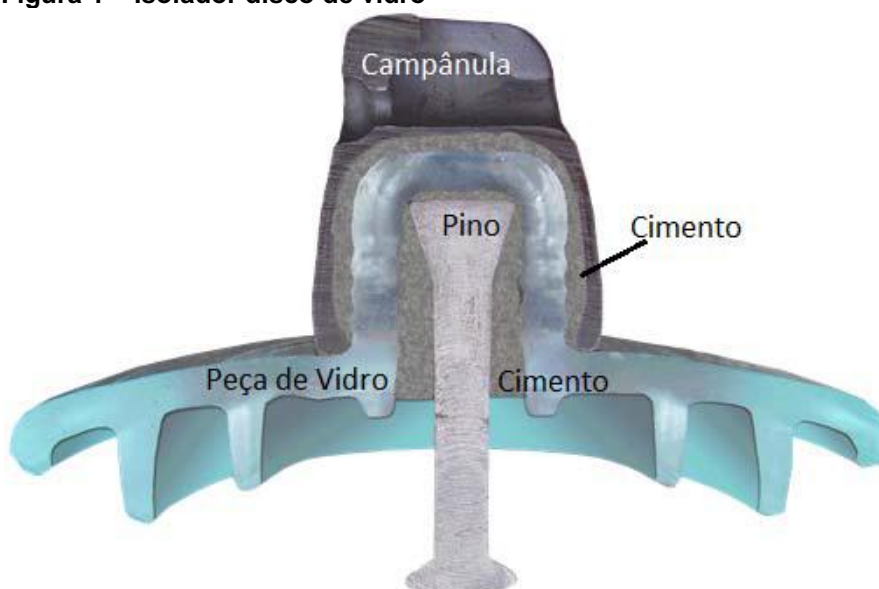
Segundo Pinheiro (2007), o vidro submetido a um tratamento térmico de têmpera, no qual foi aquecido de forma controlada, sua temperatura elevada a aproximadamente 700°C e, após, resfriado abruptamente, ocasiona em tensões internas que elevam sua resistência a choques térmicos, a impactos e o torna mais resistente em até cinco vezes a choques mecânicos, guardando suas características de aparência, transmissão luminosa e composição química.

Os isoladores fabricados com o dielétrico vidro temperado são equipamentos empregados em linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica e têm de denotar confiabilidade da operação para resistir ao clima e grau de poluição decorrente da região em que é instalado. Esses isoladores de vidro temperado protegem eletricamente a linha da parte não energizada e contribuem na sustentação mecânica dos cabos aéreos estabelecidos em postes e torres de transmissão. Yoshimura, Guedes e Fredecicci (2009) afirmaram que a situação de

falhas nos isoladores de vidro não são frequentes, porém é uma questão preocupante quando se abordam as linhas de alta tensão, visto que a falha de um único componente pode comprometer gravemente o fornecimento de energia.

As partes integrantes do isolador de vidro são mostradas na Figura 1. Compõe-se em: o vidro temperado, cimento, campânula, cupilha e o pino. Esses isoladores têm como aspectos básicos serem constituídos de um corpo dielétrico e ferragens de suspensão, através delas, cada isolador pode ser acoplado entre si, estruturando cadeias, e o nível de tensão suportável utilizado pode aumentar de acordo com o aumento da quantidade de unidades isolantes (FUCHS, 1977).

Figura 1 – Isolador disco de vidro



Fonte: Ferreira (2017).

Além das características anteriormente apontadas, 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). 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.

2.1.2 Isoladores de Porcelana

Caracteriza-se um material cerâmico como sendo inorgânico com ponto de fusão elevado e que resulta de uma fabricação a frio que é submetida a um longo processo de secagem a temperaturas elevadas. Apenas após a secagem total da peça esculpida é que o material se encontra pronto para usos técnicos (QUEIRÓS, 2013). Os isoladores de porcelana, apresentados na Figura 2, apresentam grande solidez, resistência a esforços de compressão, resistência a ataques químicos, e normalmente são sensíveis a quebras. Eles possuem grande energia superficial devido à quantidade de minerais ionizados, o que ocasiona numa elevada aderência de água e contaminantes presentes na atmosfera.

Figura 2 – Isoladores de porcelana



Fonte: Autoria própria.

A superfície dos mesmos deve ser cuidadosamente vitrificada a fim de vedar os seus poros, impedindo a absorção da água e evitando a redução de sua resistência dielétrica. A vitrificação deve ser resistente a temperaturas elevadas, devendo resistir ao calor oriundo de eventuais arcos elétricos, sem se danificar. Contudo, a grande dificuldade da eletrocerâmica, consiste na obtenção de peças espessas e de grandes dimensões capazes de satisfazer tais exigências (FUCHS, 1977). Os materiais cerâmicos são conhecidos pelo seu uso como isolantes elétricos. Como resultado de suas altas constantes dielétricas e seu comportamento

dielétrico, os materiais cerâmicos atendem os fundamentos dos circuitos eletromagnéticos (VAN VLACK, 1984).

A rigidez dielétrica do isolador é examinada de forma significativa em situações de alto índice de poluição sem grande ocorrência de chuvas ou ventos que contribuam para a limpeza do isolador. Este tipo de solução tem sido adotado por várias companhias elétricas, em detrimento dos isoladores compósitos, justificada pela falta de experiência ou receios face ao comportamento mecânico destes últimos. Apesar de apurar o comportamento frente à poluição, estes equipamentos continuam a apresentar inferioridades quanto ao seu elevado peso, e fragilidade da estrutura, diferentemente dos compósitos, além de que o processo de pintura necessário geralmente impacta em um maior custo financeiro (QUEIRÓS, 2013).

Apesar de apresentarem diversos proveitos, os isoladores de porcelana são largamente utilizados em redes de distribuição, e subestações e não são comumente encontrados em linhas de transmissão.

2.1.3 Isoladores Poliméricos

A ampla gama de propriedades físicas da borracha de silicone permite seu uso em praticamente todas as indústrias, incluindo a aeroespacial de energia renovável, eletrônica, de construção e de revestimentos. Cabot (2017) afirma que há dois tipos de borracha de silicone utilizadas em maior escala juntamente aos isoladores elétricos, a vulcanizável a quente ou HTV (*High Temperature Vulcanizing*) e a vulcanizável a frio ou RTV (*Room Temperature Vulcanizing*). A grande diferença da aplicação destas é que, o silicone HTV está contemplado no processo de fabricação do isolador polimérico, sendo seu material de revestimento principal. Já o silicone RTV é sobreposto como revestimento dos isoladores de vidro e porcelana após sua fabricação, quando seus locais de instalação possuem índices de poluição significativos, podendo a alterar o desempenho dos mesmos.

A borracha de silicone vulcanizada de alta temperatura (HTV) possui fortes propriedades mecânicas no espaço de produtos de elastômero para uso em moldagem por compressão, extrusão e moldagem por injeção.

Segundo Buontempo (2017), os polímeros de uma forma geral são materiais com características dielétricas muito acentuadas e por isso se tornaram uma importante matéria-prima da indústria como isolantes elétricos para qualquer nível

de tensão. Por ser um material facilmente manipulável é possível aumentar ou reduzir o comportamento dielétrico dos polímeros podendo torná-los isolantes mais eficientes ou mesmo transformando-os em materiais semicondutores ou condutores.

O núcleo dos isoladores poliméricos, apresentados na Figura 3, é formado por uma haste (ou bastão) de fibra de vidro reforçada por um polímero do tipo epóxi, poliéster ou vinil. Desta forma, esse núcleo é um Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV). Este núcleo deve suportar os esforços mecânicos impostos pelo peso do cabo ou por vibrações eólicas sem afetar suas propriedades isolantes (MENDONÇA, 2013). As dimensões do bastão são função das características elétricas e mecânicas necessárias (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 3 – Isoladores poliméricos



Fonte: Autoria própria.

Foram dadas diversas nomenclaturas a esses isoladores, como: não cerâmicos, compostos por referir-se ao revestimento externo, poliméricos devido ao material que reforça a fibra de vidro constituinte do núcleo do isolador e compósitos por referir-se ao núcleo do isolador, o compósito PRFV (Polímero Reforçado com Fibras de Vidro). Estes isoladores são conhecidos por sua hidrofobicidade, significa que o material possui resistência ao molhamento, e é avaliado quantitativamente analisando sua superfície, sendo considerado o ângulo de contato formado entre as gotas de água e sua superfície. Como exemplo de baixo grau de hidrofobicidade têm-se os isoladores de porcelana, que favorecem a formação de gotículas d'água originando mais ocorrências de correntes de fuga durante atividade.

Apesar de uma longa utilização com equipamentos desse tipo de material, aproxima-se de cinco décadas, a confiança no decorrer dos anos em serviço e vida útil não são totalmente conhecidas, causando muitas vezes controvérsia. Como

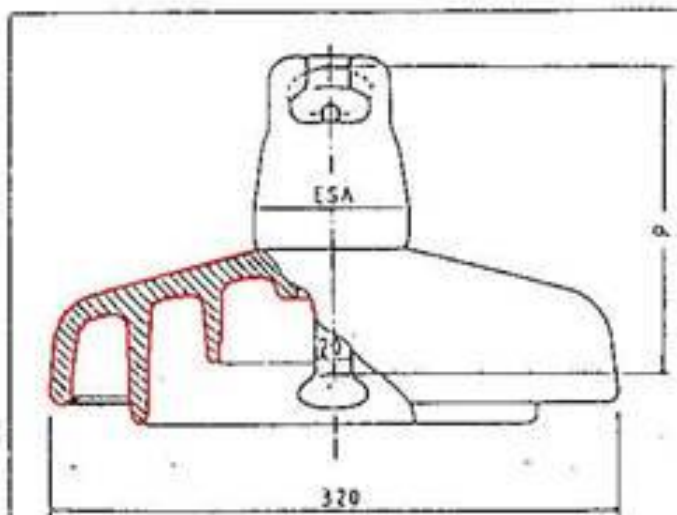
outros tipos de isoladores, o desempenho está propriamente relacionado com seu dimensionamento, dos requisitos mecânicos e elétricos, assim como a poluição a que está exposto. É de conhecimento que este tipo de isoladores, enquanto sujeitos às combinações de ações elétricas fortes e altos níveis de poluição, sofrem alterações físicas e moleculares que levam à diminuição do seu comportamento dielétrico, conhecido como envelhecimento do isolador.

2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS

Segundo Silva (2011), para avaliação dos isoladores são estabelecidas características mínimas, são elas:

- Distância de escoamento: Segundo a Celesc, é a menor distância, ou a soma das menores distâncias ao longo do contorno da superfície externado isolador, entre duas partes condutivas que normalmente são submetidas tensão de operação do sistema. Pode-se observar na Figura 4 o percurso, destacado em vermelho, formado pela distância de escoamento.

Figura 4 – Distância de escoamento em isoladores de vidro



Fonte: Amorim, Moura e Figueiredo (2010).

- Distância de passo do isolador ou da cadeia de isoladores: é a distância entre os engates metálicos dos terminais com o engate de outro isolador ou da estrutura em que será suspenso.
- Tensão suportável a impulso atmosférico: Segundo a revista “O Setor Elétrico”, neste ensaio o objetivo é testar a suportabilidade da isolação do

conjunto de manobra e controle de média tensão enquanto o equipamento é submetido às sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas ou manobras de circuitos, nas diversas condições exigidas pela configuração do conjunto de manobra e controle. Os valores de tensão (NBI) devem ser escolhidos de acordo com os dispositivos de proteção contra descarga atmosférica, utilizados na rede e com o nível de exposição a que esta rede está submetida. Para que o equipamento seja considerado aprovado neste ensaio, não devem ocorrer do que duas descargas disruptivas, nem perfuração do material isolante, em séries de 15 aplicações por polaridades positiva e negativa. Quando se cita a coordenação de isolação, a definição do NBI é o fator que possui relevância superior em determinações das linhas de transmissão e dispositivos utilizados em alta tensão.

- Tensão disruptiva em frequência industrial: Conhecida como tensão de contorno, corresponde ao valor eficaz da tensão, para qual se produz a descarga disruptiva ou descarga de contorno no isolador à frequência nominal do sistema, podem ser realizados ensaios com o isolador sob chuva ou a seco em temperatura ambiente, expressada em kV.
- Tensão suportável em frequência industrial: é o valor eficaz especificado da tensão, a frequência industrial, que um equipamento deve suportar em condições de ensaio especificadas e durante um período de tempo, geralmente, não superior a 1 minuto.
- Tensão de impulso de manobra: A tensão suportável de impulso de manobra (ou atmosférico) é definido pelo valor da grandeza especificado de uma tensão de impulso para o qual não deve ocorrer descarga disruptiva num isolamento submetido a um número especificado de aplicações, em condições especificadas.
- Tensão de perfuração: É o valor eficaz da tensão, o qual tem objetivo perfurar o dielétrico. Contempla a destruição localizada do material produzida por uma descarga que atravessa o corpo do isolador. A escolha dos isoladores adequados para cada fim deve levar em conta, além da frequência, tensão de serviço e esforços, para suportar a peça, o grau de contaminação ambiental e de condensação de umidade. A perfuração nos isoladores de vidro ocorre nos afastamentos mínimos entre o dielétrico e as partes metálicas, expressa em quilovolts (kV).

- Carga mecânica de ruptura nominal: expresso em quilonewton (kN), é a capacidade que um equipamento tem de absorver energia até seu rompimento. Pode ser definida como a energia mecânica necessária para levar um material a ruptura.

2.3 POLUIÇÃO NOS ISOLADORES ELÉTRICOS

Um das causas principais de interrupções e de diminuição de desempenho nas linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica são as correntes de fuga nos isoladores, que se tornam intensificadas em ambientes próximos a regiões com alto grau de sal e poluição industrial. Estas contaminações geralmente ocorrem devido aos depósitos de poeira, minerais como o carbono e óxidos metálicos, e as soluções de água e sal, tornando-os instáveis na presença de campos elétricos. Esta corrente de fuga acaba originando calor, produto resultante da eletrólise e descargas elétricas. É perceptível, que com todas as falhas que podem ser originadas, ocasionando em interrupções de fornecimento de energia, para as empresas transmissoras e distribuidoras de energia elétrica, consequentes manutenções e multas indenizações pelos clientes que de alguma forma foram prejudicados pela falta de energia, há uma enorme necessidade de diminuir estas circunstâncias e reduzir os prejuízos causados.

Como citado anteriormente por este autor, a diminuição da performance de isoladores acontece sobretudo devido à poluição aplicada sobre a superfície do dielétrico, podendo constituir uma área parcial ou totalmente condutora quando sujeita à umidade. A presença desta camada condutora apontará a performance do isolador que pode levar ao episódio de uma descarga elétrica. É inexecutável, em diversas situações, impossibilitar a formação desta camada condutiva cabendo principalmente ao projeto do isolador impossibilitar a formação de descargas disruptivas. Por este fato, é inquestionável que o parâmetro principal a se considerar o isolador é o ambiente, que apontará o grau da camada de poluição sobre o mesmo. O extenso intervalo de condições prováveis do ambiente, com relação à poluição, apresenta as maiores dificuldades para se projetar o isolamento adequado para o projeto, devido à quantidade de regiões desérticas, com gelo e neve, grandes altitudes, regiões costeiras e industriais, estas duas últimas principais no Brasil. Mesmo com todos esses aspectos levantados, deve-se considerar a presença

humana, também precisa ser relevado o elemento humano, visto que o acréscimo da disponibilidade da energia elétrica a um certo território, devido a implantação de uma subestação, possibilita o surgimento de parques industriais, e amplia a poluição na localidade em consequência pela superfície dos dispositivos da subestação (MELLO *et al.*, 2001).

2.3.1 Efeito Corona em Isoladores

Para o fenômeno responsável pela origem de descargas disruptivas denomina-se efeito corona, este inicia-se quando há uma diferença de potencial aplicada entre eletrodos separados por um material dielétrico, acarretando em um campo elétrico. À medida que este potencial aumenta, o campo elétrico por consequência aumenta, podendo de acordo com sua intensidade ultrapassar a rigidez dielétrica do isolante, e causando sua ruptura, ou disrupção. Esta ruptura ocorre, normalmente no ar, devido à ação de um campo elétrico não uniforme, ou a não uniformidade presente na região do equipamento, e por fim dando o surgimento de descargas próximas ao intenso campo elétrico. Tecnicamente, em campo, as descargas ocorridas são arcos voltaicos entre condutores, ou partes energizadas, e partes aterradas da estrutura de sustentação das linhas de energia elétrica. Os estudos mostram que a energia da descarga elétrica necessária para causar a falha do isolador é diretamente proporcional ao grau de poluição em sua superfície, quando ocorre um arco voltaico. Ainda os arcos gerados formam o ozônio (agente oxidante) sendo um dos causadores da corrosão elétrica nas unidades isolantes (SILVA, 2011).

2.3.2 Corrosão nos Isoladores

Pode haver então dois tipos principais de corrosão nesses equipamentos:

- Corrosão eletrolítica: quando há poluição e umidade nos isoladores, na superfície do dielétrico (entre os terminais metálicos) aparece uma corrente de fuga em cada isolador, e esses efeitos são elevados à medida da quantidade de sais (poluição) presente, além da tensão elétrica aplicada sobre o dielétrico.
- Corrosão por arcos: estes arcos na extensão das partes com maior resistividade da superfície úmida surgem através da condensação. Os arcos

são mais frequentes nos locais da cadeia de isoladores no qual a densidade de corrente e o campo elétrico são mais acentuados. Por isso, muitas descargas têm frequentemente sua origem sobre as ferragens (a campânula e o pino) dos isoladores do lado energizado da cadeia. Estes arcos acarretam na geração de ozônio, que conforme comentado anteriormente podem intensificar a corrosão (Figura 5). Segundo Mello *et al.* (2001) a prática tem mostrado efetivamente a ocorrência de corrosão precoce em isoladores instalados em sistemas com tensão maior ou igual a 345 kV.

Figura 5 – Corrosão em isoladores de vidro



Fonte: Albuquerque (2014).

3 POLUIÇÃO EM ISOLADORES SEGUNDA A NORMA ABNT IEC TS 60815-1:2014

3.1 A ANTIGA NORMA IEC 60815 - 1986

A antiga norma IEC 60815 era um guia de poluição que foi publicado em 1986, baseado nos princípios estabelecidos durante a década anterior. Esta norma não relevava vários parâmetros que se consideram importantes hoje em dia para uma precisa especificação dos equipamentos a serem utilizados. Como exemplos, segundo Mello (2017) têm-se:

- Orientação da montagem dos isoladores;
- Considerava a classe de tensão até 525 kV;
- Ignorava-se o efeito da altitude nos isoladores;
- Não se aplicava a equipamentos em corrente contínua nem isoladores poliméricos;
- Um dos principais fatores para dimensionamento do isolador, a distância de escoamento, não abordava informações como o perfil da saia dos isoladores, condições climáticas e a poluição.

A norma ABNT IEC TS 60815-1:2014 atualizada é uma especificação técnica que determina e auxilia com parâmetros para a seleção e dimensionamento dos isoladores em alta tensão sob condição de poluição, instalados em linhas de transmissão ou subestações (ABNT, 2014). Apresenta algumas definições importantes para os isoladores, como:

- Distância de escoamento específica unificada (DEEU): distância de escoamento de um isolador dividida pelo valor eficaz da máxima tensão de operação (fase-terra) ao longo do isolador;
- Densidade superficial de depósito de sal equivalente (DDSE): quantidade de cloreto de sódio (NaCl) que, quando dissolvida em água desmineralizada, fornece a mesma condutividade volumétrica do depósito natural de poluente removido de uma dada superfície do isolador dividida pela área dessa superfície, sendo geralmente expressa em mg/cm²;

- Densidade superficial de depósito não solúvel (DDNS): quantidade de resíduos não solúveis removidos de uma dada superfície do isolador dividida pela área dessa superfície, sendo geralmente expressa em mg/cm²;
- Severidade da poluição local (SPL): máximo valor ou da relação DDSE/DDNS ou da SEL, registrado durante um certo período de tempo;
- Salinidade equivalente local (SEL): valor da salinidade de um ensaio de névoa salina, que fornece valores de pico de corrente de fuga comparáveis com os valores obtidos com um isolador semelhante, poluído naturalmente, energizado com a mesma tensão. Geralmente expressa em kg/m³.

3.2 ABORDAGENS PARA SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO ISOLADOR

A norma ABNT IEC TS 60815-1:2014 determina que caso a seleção dos isoladores seja determinada a partir de um catálogo de fabricantes, deve-se levar em consideração as necessidades do sistema e as condições ambientais (ABNT, 2014). Para uma avaliação mais profunda esta norma apresenta três abordagens possíveis para a determinação dos isoladores a serem utilizados, a primeira utilizando experiências passadas, como dados de campo em locais similares ou próximos ao novo projeto. A segunda abordagem é através de medições da poluição no ambiente que serão instalados, após essa avaliação determinar os isoladores candidatos relevando o perfil das saias dos equipamentos, e a distância de escoamento dos mesmos. Assim que definidos, ensaiar os isoladores e selecionar de acordo com os resultados. A terceira e última é através de medições e projeto, a medição se dá da mesma forma da segunda abordagem, e o projeto através dos níveis de poluição e fatores de correção, definindo o perfil das saias e o material dielétrico a ser utilizado. O grau de confiabilidade de que o tipo e dimensões do isolador tenham sido corretamente selecionados depende dos dados disponíveis, tempo e recursos envolvidos no projeto e varia de acordo com as decisões tomadas durante o processo de seleção, no Quadro 1 é apresentado um guia da precisão de cada uma das abordagens.

Quadro 1 – Precisão das abordagens estabelecidas na ABNT IEC TS 60815-1:2014

	Abordagem 1 (Usar experiências passadas)	Abordagem 2 (Medida e ensaio)	Abordagem 3 (Medida e projeto)
Precisão	Uma definição com precisão adequada.	Uma definição com um grau de acerto que varia conforme com a taxa de imprecisões e atalhos na verificação da severidade da poluição no ambiente, com pressupostos e deficiências do ensaio realizado no laboratório selecionado.	Possibilidade de subdimensionar ou sobredimensionar a solução comparando com as Abordagens 1 e 2. Uma definição com um grau de acerto que varia conforme com a taxa de imprecisões e atalhos na verificação da severidade da poluição no ambiente, com pressupostos e deficiências do ensaio realizado no laboratório selecionado.

Fonte: ABNT (2014).

O tempo estimado para um resultado satisfatório na Abordagem 1, é de cinco a dez anos, para a estimativa da SPL deve-se realizar pesquisas referente às condições climáticas e ambientais, e analisar as fontes de poluição possíveis. Esta atividade pode variar entre semanas e meses. Para a determinação da severidade de poluição local nas Abordagens 2 e 3, o período de no mínimo um ano é necessário. Para os ensaios laboratoriais da Abordagem 2, o tempo necessário se aproxima de semanas ou meses, pois pode variar com o tipo de ensaio, escala do ensaio, e a disponibilidade laboratorial.

Na continuação da melhor especificação do isolador, deve-se considerar o modo como a poluição deposita-se sob a superfície do isolador, o modo que esta poluição é lavada naturalmente, e a natureza do poluente, ou seja, se há camadas grassas próprias do material depositado, ou se é condutivo e solúvel, porém facilmente lavado.

3.3 PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A ESCOLHA E DIMENSIONAMENTO DE UM ISOLADOR

Um grande número de parâmetros precisa ser considerado para se obter um resultado satisfatório, além dos já apresentado neste trabalho, tornando esta determinação mais complexa, os dados de entrada que devem ser analisados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de entrada para seleção e dimensionamento do isolador

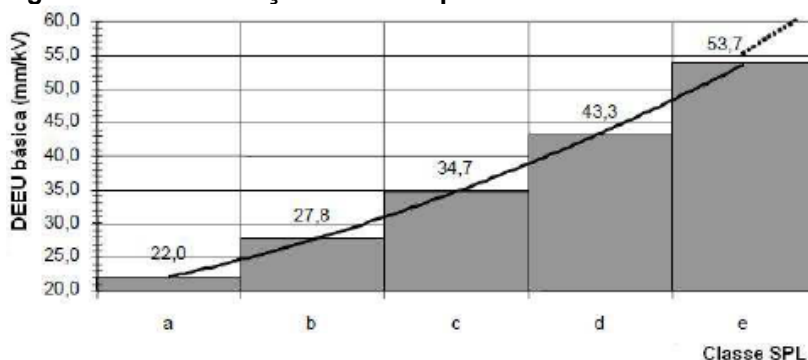
Solicitações do sistema	Condições ambientais	Parâmetros do isolador
- Tipo do sistema: CA ou CC; - Tensão máxima de operação; - Sobretensões transitórias em CA e CC; - Solicitações de desempenho impostas; - Distância de isolamento, geometria imposta, dimensões; - Trabalho em linha viva e manutenção.	- Tipo de poluição e níveis; - Chuva, névoa, neblina, neve e gelo; - Vento, tempestades; - Temperatura, umidade; - Altitude; - Descargas atmosféricas; terremotos; - Vandalismo, animais; - Crescimento biológico.	- Comprimento do isolador; - Tipo; - Material; - Perfil; - Distância de escoamento; - Diâmetro; - Distância de arco; - Projeto mecânico e elétrico.

Fonte: Autoria própria.

Há dois tipos de poluição, que podem originar uma descarga, chamadas de Tipo A e Tipo B:

- Tipo A: poluição sólida com um componente não solúvel é depositada sobre a superfície do isolador. Esse depósito se torna condutivo quando úmido, geralmente encontrada em regiões industriais, desérticas ou de interior;
- Tipo B: comumente encontrada em áreas litorâneas e costeiras, onde a água salgada se deposita sob o isolador.

Já a avaliação da severidade da poluição (SPL) no local, é calculada diferentemente para os tipos de poluição A e B, são utilizados os valores encontrados de DDSE e DDNS para o primeiro tipo, e SEL para o tipo B, em alguns casos também é utilizado o fator DDSE. Já a avaliação qualitativa da SPL é dividida em cinco definições, muito leve, leve, média, pesada e muito pesada. Na Figura 6 é mostrada relação calculada entre DDEU e SPL, com as classes de poluição, esta razão é definida pela distância de escoamento do isolador pela tensão máxima de operação do sistema.

Figura 6 – Determinação da DEEU pela SPL

Fonte: Mello (2017).

Algumas considerações importantes quanto às dimensões do isolador devem sempre ser consideradas e avaliadas, como a distância de escoamento do isolador em conjunto com o comprimento do isolador. Normalmente é considerada apenas a distância de escoamento necessária para suportar a tensão de operação do sistema sob poluição, a seleção levando em conta a distância de escoamento sozinha desconsidera outros fatores, como a distância de passo do isolador, que é padronizada em 146 mm e 170 mm nos isoladores de vidro, no qual uma cadeia de isoladores com a distância de passo maior, mas com o escoamento menor, gera resultados similares à cadeia com 146 mm de passo em cada isolador, pois esta última permite um maior número de isoladores com o mesmo comprimento da cadeia entre as duas, deve-se então atentar ao projeto que apresente o melhor custo sem a possibilidade de superdimensioná-lo.

Após as informações e pontos levantados, foram consultados fabricantes e distribuidores de isoladores elétricos que possuem grandes fornecimentos a obras e empreendimentos no Brasil, além de engenheiros de campo e projetistas que atuam com este tema corriqueiramente. O Quadro 3 apresenta um resumo unificado dos diferentes tipos de isoladores utilizados no sistema elétrico brasileiro de alta tensão, com conhecimentos teóricos abordados neste trabalho e conhecimentos práticos de profissionais do setor.

Quadro 3 – Comparação entre os diferentes tipos de isoladores em LTs

	Isolador Vidro	Isolador Porcelana	Isolador Polimérico
Tradição no sistema elétrico brasileiro	Intermediário	Vantajoso	Desvantajoso
Perfil das saias	Intermediário	Desvantajoso	Vantajoso
Hidrofobicidade	Intermediário	Desvantajoso	Vantajoso
Resistência a esforços mecânicos	Intermediário	Vantajoso	Desvantajoso
Peso	Intermediário	Desvantajoso	Vantajoso
Identificação de falhas	Vantajoso	Intermediário	Desvantajoso
Dificuldade para manutenção	Desvantajoso	Desvantajoso	Vantajoso
Custo aproximado percentual de uma cadeia de isoladores	Intermediário	Desvantajoso	Vantajoso

Fonte: Autoria própria.

No Quadro 3 são mostradas diferentes características relevantes para a especificação dos isoladores em projetos, quando considerados os diversos anos que os isoladores de porcelana, os mais antigos, são utilizados, representam uma

maior confiança às mais novas tecnologias, como o silicone HTV. Já os isoladores poliméricos possuem maior liberdade na moldagem da fabricação quanto ao corpo dos isoladores, pela própria natureza do material de que é constituído e contribuindo assim com a distância de escoamento, e possui ótima hidrofobicidade, devido ao material dielétrico evitar acúmulo de depósitos sobre sua superfície e ainda facilitar a lavagem do mesmo. Porém os materiais cerâmicos, como o vidro e a porcelana, possuem maior resistência à ruptura mecânica e na grande maioria dos esforços mecânicos que são realizados durante o funcionamento. O peso do isolador polimérico apresenta vantagens, pelo silicone ser mais leve junto do bastão de fibra de vidro, o que apresenta ganhos também em relação a transporte e armazenamento, e o isolador de porcelana é o mais pesado considerando isoladores para mesma classe de tensão. Para a manutenção, seja por vandalismo ou falhas nos isoladores, o vidro facilita esta verificação pelo material estilhaçar e ser mais facilmente encontrada a cadeia com algum problema, os isoladores de porcelana trincam, já os isoladores poliméricos há maior dificuldade de realização desta atividade, o que prejudica os profissionais da área para realização de reparação e manutenção, por vezes várias equipes são deslocadas para encontrar este(s) equipamento(s) danificado(s). Porém para a troca e/ou substituição estes últimos são os selecionados como mais fáceis de se instalar, principalmente por não precisarem ser içados em cadeias já montadas e pelo baixo peso.

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.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os tipos de isoladores elétricos em linhas de transmissão e subestações disponíveis no mercado, como especificá-los e dimensioná-los considerando-se as regiões que sofrem mais severamente com o efeito da poluição ambiente. Com uma série de vantagens e desvantagens que os isoladores constituídos por cada dielétrico apresentam, foi apontada a criticidade que as falhas em isoladores causam em todos os níveis, desde as paradas para equipes de manutenção, como para as transmissoras e distribuidoras que ficam passíveis a sofrerem penalidades, até por fim a falta de fornecimento de energia para a população.

Sob o ponto de vista da poluição abrangida pela norma ABNT IEC TS 60815-1:2014 no ambiente em que os isoladores são instalados, foram apresentados os diversos parâmetros a serem considerados durante o dimensionamento e seleção dos mesmos, e a complexidade que este processo envolve, pois diversas características ambientais devem ser levantadas, medidas por certos períodos de tempo e os dados quando obtidos, serem tratados. Diferentemente do que é visto durante rotinas práticas de campo, em que são poucos os fatores relevados, e assim correndo sério risco das consequências apresentadas surgirem no sistema elétrico.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de modelo matemático para análise da viabilidade de implantação/substituição de isoladores de vidro, porcelana ou poliméricos, de acordo com o nível de poluição encontrado nas localidades em que serão instalados.
- Estudo a respeito do impacto econômico a longo e curto prazo baseado na utilização dos isoladores elétricos em subestações e linhas de transmissão.
- Pesquisa nas concessionárias elétricas brasileiras, transmissoras e distribuidoras de como tem sido realizada a escolha por tipos de isoladores e o impacto financeiro por diferentes classes de tensão.

- Estudo técnico e financeiro comparativo entre isoladores cerâmicos revestidos por camadas de silicone RTV e isoladores poliméricos fabricados com silicone HTV.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição: Definições, informações e princípios gerais.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), código ABNT IEC/TS 60815-1:2014. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=326592>>. Acesso em: 11 dez. 2019.

ALBUQUERQUE, Eduardo L. de. **Análise e tomada de decisão utilizando sistema de monitoramento via satélite para poluição em cadeia de isoladores de alta tensão.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

AMORIM, Paulo Sérgio C. M.; MOURA, António Carlos S. M.; FIGUEIREDO, José Carlos da C. **Cadeias de isoladores.** Projeto de Final de Curso. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (FEUP). 2010. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee98096/cadeiasdeisolad.htm>>. Acesso em: 23 dez. 2019.

BUONTEMPO, Rodolfo C. **Isoladores poliméricos.** Curso de isoladores. Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. CIGRÉ - Brasil. Rio de Janeiro, 20 e 21 jun. 2017.

CABOT. **Borrachas de silicone (HTV e LSR).** Copyright© 1995-2019 Cabot Corporation. Disponível em: <<https://www.cabotcorp.com.br/solutions/applications/industrial-rubber-products/silicone-rubbers>>. Acesso em: 17 dez. 2019.

DEUTSCH, Nicolay M. **Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos.** Projeto de diplomação. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/157865>>. Acesso em: 23 dez. 2019.

DIAS, B. A. **Simulação computacional da poluição biológica em isoladores de vidro.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

FERREIRA, Luiz Fernando P. **Processo de fabricação de isoladores de vidro temperado.** Curso de isoladores. Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. CIGRÉ - Brasil. Rio de Janeiro, 20 e 21 jun. 2017.

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

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

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.

MELLO, Darcy R. de; *et al.* **Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição**. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL 2001). Brasília, 2001. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/trabalhos/33.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2019.

MENDONÇA, Philip L. de. **Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em isoladores compósitos de classe de tensão de 69KV através de radiografia computadorizada**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/13178>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

PINHEIRO, Fábio C. **Evolução do uso do vidro como material de construção civil**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco. Itatiba, 2007.

QUEIRÓS, José Pedro M. **Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2013.

SILVA, Roberval L. **Lavagem de isoladores em linhas de transmissão e subestações**. Material de treinamento. Coluna: consultoria, desenvolvimento & treinamento. 2011. Disponível em: <<https://irp-cdn.multiscreensite.com/3e619e2f/pdf/LAVAGEMDEISOLADORESEMLINHASDETRAN%E2%80%A6.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais**. 4. ed., Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

XAVIER, José A. R. **Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. Disponível em:

<<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/28405/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Jos%c3%a9%20Alexandro%20Ramos%20Xavier.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

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, v.14, n. 2. Rio de Janeiro, ago. 2009. p. 845-860.