

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Viero Ramos

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ISOLADORES ELÉTRICOS
VÍTREOS, CERÂMICOS E POLIMÉRICOS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Santa Maria, RS
2022

Leonardo Viero Ramos

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ISOLADORES ELÉTRICOS VÍTREOS,
CERÂMICOS E POLIMÉRICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

ORIENTADOR: Prof. Mauricio Sperandio

Santa Maria, RS
2022

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Viero Ramos . A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Pedro Santini, 180

Fone (0xx) 55 98433-6111; End. Eletr.: leo8150@hotmail.com

Leonardo Viero Ramos

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ISOLADORES ELÉTRICOS VÍTREOS,
CERÂMICOS E POLIMÉRICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 25 de agosto de 2022:

Mauricio Sperandio, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Criciéle Castro Martins, Dra. (UFSM)

Gustavo Mores de Lazari, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todos que me auxiliaram nessa caminhada, dentre eles, em especial a:
Margareth Maria Viero. E ainda a todos os amigos que fizeram parte desta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, principalmente a minha mãe Margareth por todo apoio e suporte durante toda minha jornada estudantil.

Agradeço também aos meus amigos faculdade, Flávio Tschoepke de Medeiros Zandonatto, João Paulo Duranti, e Leonardo Stringini, pelas vivências e risadas que compartilhamos nesses mais de 5 anos. Além disso, agradeço a todos os meus colegas de turma da engenharia elétrica pelo companheirismo durante o curso e superação das dificuldades que passamos juntos.

Por fim, agradeço ao professor Mauricio pela oportunidade e pelo tempo disposto no decorrer da construção deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ISOLADORES ELÉTRICOS VÍTREOS, CERÂMICOS E POLIMÉRICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: Leonardo Viero Ramos
ORIENTADOR: Mauricio Sperandio

Na grande maioria dos casos, quando os consumidores pensam em um sistema elétrico de potência, negligencia-se, em grande parte das vezes, a importância que os isoladores elétricos desempenham no processo de transmissão e de distribuição de energia. Contudo, as cadeias de isoladores elétricos são de extrema importância neste processo, não só por isolar os condutores de eletricidade da terra como suportá-los mecanicamente nas torres de transmissão de energia. Entretanto, tais isoladores, dependendo do material e de como foram feitos, sofrem quebras parciais ou totais de suas partes, por vandalismo ou fenômenos da natureza, com isso suas capacidades de suportabilidade à tensão elétrica são comprometidas, podendo levar a problemas ao sistema elétrico. Diante disso, a utilização de isoladores poliméricos nos sistemas de transmissão e distribuição vem sendo cada vez mais difundida devido às suas vantagens em relação aos isoladores feitos de vidro e de cerâmica. Diante disso, este trabalho apresenta a análise, características e comparações acerca da substituição dos materiais cerâmicos e vítreos por isoladores elétricos poliméricos e compósitos. Além disso, faz-se comparações entre isoladores de porcelana e poliméricos, onde os isoladores poliméricos tem seus núcleos formados por compósitos e, desta forma, apresentam um menor peso, diâmetro, ao mesmo tempo que podem suportar maiores cargas mecânicas nominais. A metodologia usada neste trabalho se resumiu na revisão bibliográfica e na análise de experiências práticas de campo e em laboratório acerca das diferenças no comportamento dos isoladores quando submetidos a intensa poluição, umidade e neve. No momento em que foram substituídos isoladores tipo disco de vidro temperado por poliméricos na linha de transmissão Xingó-Angelim II no nordeste brasileiro, solucionou-se o problema de interrupção no fornecimento de energia para os consumidores naquela região, assim como, reduziu-se em 4 vezes o peso da cadeia de isoladores instalada, facilitando assim, os futuros reparos e manutenções na linha de transmissão. Assim como, em situações de neve intensa, recomendou-se a instalação de isoladores elétricos posicionados na horizontal, pois assim o depósito de neve na superfície do isolador é dificultado.

Palavras-chave: Isoladores de Vidro. Isoladores Cerâmicos. Isoladores Poliméricos. Linhas de Transmissão. Poluição.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN VITREOUS, CERAMIC AND POLYMERIC ELECTRICAL INSULATORS IN POWER TRANSMISSION LINES

AUTHOR: Leonardo Viero Ramos

ADVISOR: Mauricio Sperandio

In the vast majority of cases, when consumers think of an electrical power system, the importance that electrical insulators play in the process of transmission and distribution of energy is often overlooked. However, chains of electrical insulators are extremely important in this process, not only for insulating the electrical conductors from the ground but also for supporting them mechanically in transmission towers. However, such insulators, depending on the material and how they were made, suffer partial or total breakage of their parts, by vandalism or natural phenomena, with that their electrical voltage capabilities are reduced to a point that cause problems into the electrical system. Therefore, the use of polymeric insulators in transmission and distribution systems has been increasingly widespread due to their advantages over insulators made of glass and ceramics. Therefore, this work presents the analysis, characteristics and comparisons about the replacement of ceramic and glassy materials by polymeric and composite electrical insulators. In addition, comparisons are made between porcelain and polymeric insulators, where polymeric insulators have their cores formed by composites and, thus, have a lower weight, diameter, at the same time that they can withstand higher nominal mechanical loads. The methodology used in this work was summarized in the literature review and in the analysis of practical experiences in the field and in the laboratory about the differences in the behavior of insulators under intense pollution, moisture and snow. At the time when tempered glass disc insulators were replaced by polymeric ones in the transmission line Xingó-Angelim II in northeastern Brazil, the problem of interruption in the supply of energy to consumers in that region was solved, as well as the weight of the installed insulator chain was reduced by 4 times, thus facilitating future repairs and maintenance on the transmission line. As well as, in situations of intense snow, the installation of electrical insulators positioned horizontally was recommended, as this way the deposit of snow on the surface of the insulator is hampered.

Keywords: Glass Insulators. Ceramic Insulators. Polymeric Insulators. Transmission lines. Pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Isoladores Telegráficos utilizados no século XIX.....	17
Figura 2.2 – Isolador U-937 de Fred M. Locke, <i>The Helmet</i>	18
Figura 3.1 – Características físicas do isolador roldana de porcelana.....	23
Figura 3.2 – Ferragem de suporte para o isolador roldana de porcelana.....	23
Figura 3.3 – Isolador castanha marrom de porcelana.....	24
Figura 3.4 – Características físicas do isolador castanha de porcelana	24
Figura 3.5 – Isoladores tipo pino de porcelana	25
Figura 3.6 – Características Eletromecânicas dos Isoladores Pilar de porcelana.....	26
Figura 3.7 – Dimensional do Isolador pilar de porcelana	27
Figura 3.8 – Isolador tipo bastão de porcelana.....	28
Figura 3.9 – Isoladores tipo disco de porcelana em série.....	29
Figura 3.10 – Isolador de vidro comprometido com a corrosão.....	30
Figura 3.11 – Pino e Campânula do Isolador tipo disco de vidro	31
Figura 3.12 – Cadeia de isoladores do tipo disco de vidro conectadas em paralelo.....	32
Figura 3.13 – Variantes dos isoladores de vidro produzidos pela Sediver	33
Figura 3.14 – Níveis de poluição para a escolha do perfil de isolador	34
Figura 3.15 – Isoladores <i>Sedicoat</i> em operação	35
Figura 3.16 – Partes que compõe o isolador polimérico	36
Figura 3.17 – Dano de pássaro em isoladores poliméricos de uma linha de 110 kV	37
Figura 3.18 – Isoladores tipo pino polimérico para tensões de 15 e 35 kV	38
Figura 3.19 – Representação gráfica de um isolador pino polimérico.	39
Figura 3.20 – Características eletromecânicas dos isoladores tipo pino polimérico.	39
Figura 3.21 – Isoladores tipo pilar polimérico de 15, 25 e 35 kV	40
Figura 3.22 – Isoladores poliméricos de suspensão para diferentes níveis de tensão	41
Figura 4.1 – Linha de transmissão Xingó-Angelim II.....	43
Figura 4.2 – Distribuição das torres da linha Xingó-Angelim II e suas altitudes.....	44
Figura 4.3 – Isoladores de vidro sendo retirados da linha	46
Figura 4.4 – Isoladores poliméricos sendo instalados na linha de transmissão.....	47
Figura 4.5 – Isoladores em linhas de transmissão contaminados com neve.....	49
Figura 4.6 – Comparação entre isoladores tipo disco e isoladores de haste longa.....	50
Figura 4.7 – Isoladores polimérico e de haste longa de porcelana sob a condição de neve por 10 minutos.	51
Figura 4.8 – Isoladores polimérico e de haste longa de porcelana sob a condição de neve por 50 minutos.	52
Figura 4.9 – Esquema de Classificação Climática de Köppen	54
Figura 4.10 – Mapa do tipo climático Köppen-Geiger.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações técnicas dos isoladores substituídos	45
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>Ah</i>	Ampère-Hora
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC	<i>Constant Current</i>
CV	<i>Constant Voltage</i>
DC	<i>Direct Current</i>
LT	Linha de Transmissão
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
daN	DekaNewton
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
RTV	<i>Room temperature vulcanizing silicone</i>
LWC	<i>Measure the Liquid Water Content of snow</i>
BS	<i>British Standard</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência Elétrica
ρ	Resistividade Elétrica
I	Corrente elétrica
J	Densidade de corrente
P	Potência
T_a	Temperatura ambiente
t	Tempo
H	Altura
D	Diâmetro
kV	Kilovolt
kA	Kiloampére
kN	KiloNewton
V_{max}	Valor máximo de tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÕES	13
1.1.1	Objetivos do estudo	13
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.1.3	Conteúdo dos capítulos	14
2	ISOLADORES ELÉTRICOS	15
2.1	ESTRUTURA DA MATÉRIA DOS ISOLADORES.....	15
2.2	ISOLADORES ELÉTRICOS EM SEUS PRIMÓRDIOS.....	16
2.2.1	Os Primeiros Isoladores para Média e Alta Tensão	18
3	ISOLADORES ELÉTRICOS NOS TEMPOS ATUAIS	20
3.1	ISOLADORES CERÂMICOS/PORCELANATOS	20
3.1.1	Isoladores Cerâmicos mais utilizados	22
3.1.1.1	<i>Isoladores Roldana</i>	23
3.1.1.2	<i>Isoladores Castanha</i>	24
3.1.1.3	<i>Isoladores tipo Pino</i>	25
3.1.1.4	<i>Isoladores tipo Pilar</i>	26
3.1.1.5	<i>Isoladores Bastão</i>	27
3.1.1.6	<i>Isoladores de Suspensão ou Disco</i>	28
3.2	ISOLADORES DE VIDRO.....	29
3.2.1	Variantes dos isoladores tipo disco de vidro	32
3.3	ISOLADORES POLIMÉRICOS.....	35
3.3.1	Tipos de Isoladores Poliméricos	37
3.3.1.1	<i>Isoladores poliméricos tipo pino</i>	38
3.3.1.2	<i>Isoladores poliméricos tipo pilar</i>	39
3.3.1.3	<i>Isoladores poliméricos de suspensão ou ancoragem</i>	40
4	ESTUDOS DE CASO	42
4.1	SUBSTITUIÇÃO DE ISOLADORES DE VIDRO POR ISOLADORES POLIMÉRICOS NA LINHA DE TRANSMISSÃO XINGÓ-ANGELIM II DE 500 KV.....	42
4.2	IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO POR <i>WET SNOW</i> EM ISOLADORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA.....	48
4.3	INFLUÊNCIA DAS FONTES DE POLUIÇÃO NO DESEMPENHO DO ISOLAMENTO ELÉTRICO.....	53
5	CONCLUSÃO	56
5.1	TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

De forma geral, os sistemas elétricos de potência têm por objetivo primordial, o fornecimento de energia elétrica aos consumidores de forma segura, com qualidade e com previsibilidade. Entretanto, devido a grandiosidade e complexidade do sistema, pode-se dividi-lo em três grupos principais: O da geração de energia, o grupo da transmissão e o grupo da distribuição de energia elétrica aos consumidores finais. E para que esses três grandes blocos do sistema funcionem adequadamente, é imprescindível o uso de isoladores elétricos.

A história da utilização de isoladores elétricos começou por volta de 1840 com a invenção do telégrafo, quando foi utilizada uma placa de madeira plana sob o aparelho como isolante para segurar os fios e para isolar os condutores energizados. A aplicação em alta tensão teve início com a construção das primeiras linhas de transmissão no final do século XIX, operando no sistema de energia da usina hidrelétrica das cataratas do Niágara com tensão nominal de 60 kV e 110 kV. Nesta época, diversos materiais disponíveis foram utilizados, como madeira, vidro, mica, ebonite (borracha endurecida), entre outros (SENSU; REIS,).

A segurança e previsibilidade do fornecimento de energia elétrica de boa qualidade aos consumidores, está ligada diretamente ao bom desempenho e emprego dos isoladores elétricos no sistema elétrico de potência. Caso seus estudos forem negligenciados, existe uma grande chance de ocorrerem problemas que podem facilmente provocar o desligamento das linhas e com isso, gerar enormes prejuízos ao sistema. Como foi citado anteriormente, vários materiais já foram utilizados como isolantes no sistema elétrico, entretando, com o passar dos anos e com a evolução da engenharia de materiais, a modificação na composição de novos materiais passaram a serem alvos de estudos, uma vez que, quanto mais eficientes e mais leves se tornam um material isolante, maior sua empregabilidade, e com isso, mais confiável e seguro se torna o sistema elétrico em sua totalidade. Com isso, os isoladores poliméricos e compósitos foram sendo desenvolvidos e passaram a ser empregados gradativamente nos sistemas elétricos de potência.

1.1 MOTIVAÇÕES

Facilmente observável nos dias de hoje, a demanda sobre o setor elétrico é muito maior do que quando comparada a alguns anos atrás. Da mesma forma, quanto maior a demanda sobre o sistema elétrico, maior será também a responsabilidade sobre o mesmo, uma vez que a quantidade de consumidores que passam a depender do sistema vêm aumentando consideravelmente.

Diante disso, sabendo que os isoladores de tensão estão presentes na totalidade do sistema e sabendo também da enorme importância que uma boa isolação garante ao setor, muitas ações têm sido desenvolvidas por parte das concessionárias, desenvolvedores de matérias primas e centros de pesquisas visando sempre a uma maior confiabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, existe uma "corrida" com o objetivo de obter novos materiais, mais leves, mais robustos, mais baratos e mais eficientes, que podem ser empregados em linhas de transmissão e de distribuição que acarretarão em um sistema elétrico mais seguro, mais previsível e com um menor número de interrupções possível. Pode-se destacar também como motivação, a dificuldade de encontrar trabalhos que relacionem essas comparações, ou até mesmo métodos que avaliem a longo prazo os isoladores elétricos.

Em vista disso, este trabalho faz um estudo comparativo entre os isoladores de tensão feitos de cerâmica, vítreos, poliméricos e compostos, objetivando a apresentação de suas diferenças, vantagens, desvantagens, características e a viabilidade das suas substituições. Além disso, a metodologia adotada se dá através de uma vasta pesquisa bibliográfica onde demonstram-se estudos de casos de experiências práticas da substituição de isoladores de vidro temperado por isoladores poliméricos em linhas de transmissão no Nordeste Brasileiro, uma breve análise do desempenho de 3 tipos de isoladores diferentes em regiões de neve no Japão e em regiões de elevada poluição. Por fim, também é abordado o fato de como o conhecimento climático e geográfico de uma região fornece informações valiosas para a escolha do material e do tipo de isolador elétrico que melhor se ajusta a intempéries locais.

1.1.1 Objetivos do estudo

Este trabalho visa o estudo comparativo entre isoladores elétricos utilizados em linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, mais especificamente na análise entre os isoladores cerâmicos, vítreos e poliméricos. Pretendendo-se apontar suas diferenças, vantagens,

desvantagens e identificar de maneira sugestiva, de acordo com as análises técnicas e os estudos comparativos realizados, qual seria o melhor isolador a ser utilizado pelas empresas de energia elétrica em locais específicos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Análise das características técnicas e operacionais dos isoladores elétricos cerâmicos, vítreos e poliméricos disponíveis no mercado;
- Apresentar aspectos positivos e negativos no emprego de cada tipo de isolador em linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como enfatizar os principais problemas que o mau funcionamento dos mesmos podem acarretar;
- Apresentar, a partir da revisão bibliográfica de estudos de casos práticos, a viabilidade técnica e, de forma sugestiva, indicar qual seria o melhor isolador a ser utilizado pelas empresas de energia elétrica em situações de elevada poluição tropical e em locais com alta incidência de neve.

1.1.3 Conteúdo dos capítulos

O Capítulo 1 aborda uma introdução ao conteúdo apresentado no trabalho, juntamente com justificativas e motivações do trabalho desenvolvido.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam a análise de uma extensa revisão bibliográfica, desde os aspectos históricos até os atuais dos objetos de estudo, como também as características e comparações entre os mesmos.

O Capítulo 4 apresenta estudos de caso, bem como análises sobre esses mesmos resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências que foram utilizados para a construção desse trabalho.

2 ISOLADORES ELÉTRICOS

No presente capítulo, primeiramente serão descritas as propriedades fundamentais e as estruturas de matérias que caracterizam um material isolante, temas relevantes para o entendimento do funcionamento de isoladores elétricos. Por conseguinte, poderá ser encontrada uma revisão referente a evolução dos isoladores elétricos desde seus primórdios até os dias atuais, assim como serão apresentados os modelos mais utilizados no sistema elétrico de potência e suas características.

2.1 ESTRUTURA DA MATÉRIA DOS ISOLADORES

Materiais isolantes, também chamados de materiais dielétricos, se caracterizam pela elevada resistência elétrica à passagem de corrente em comparação aos materiais condutores. A propriedade fundamental desses materiais é a chamada polarização de suas partículas elementares (polarização dielétrica). A polarização dielétrica é o fenômeno de deslocamento reversível das nuvens eletrônicas nos átomos ou moléculas de um material isolante (seja um sólido, líquido ou gás) à exposição de um campo elétrico externo, no qual as nuvens eletrônicas (de carga negativa) são puxadas contra o campo elétrico e os núcleos (de carga positiva) são empurrados na direção deste por forças elétricas. No regime de campo elétrico externo forte, isto é, grande em comparação à energia de ligação do átomo ou molécula, é possível gerar ionização, e nesse caso a deformação passa a ser irreversível, e o material, outrora isolante, passa a se comportar como um condutor de eletricidade, a então chamada, ruptura dielétrica (DEUTSCH, 2016).

Os materiais isolantes, além de suas propriedades dielétricas, são caracterizados por outras propriedades, as quais dependem das condições físicas do meio em que se encontram (como, por exemplo, variações de temperatura, umidade, tensão elétrica aplicada e pelo grau de limpeza do material). Entre essas condições, existe também, a influência da água, em condições de chuva, por exemplo, constata-se a redução da resistividade do isolante, reduzindo, assim, a chamada resistência superficial de descarga.

Como consequência, os isoladores elétricos buscam ser projetados com perfis que assegurem a proteção contra umidade e deposição de resíduos sólidos para assim garantir a sua confiabilidade. Além disso, ensaios para a determinação da capacidade isolante dos materiais é

feita a seco e sob chuva, uma vez que a umidade relativa passa a ter influência considerável, mais uma vez que a condutividade será tanto menor quanto menos polar for o isolante, quanto mais liso for o acabamento superficial e quanto mais limpa a for a superfície do material (DEUTSCH, 2016).

Diante disso, os isoladores são componentes amplamente utilizados em todos os setores do sistema elétrico de potência, desde a geração até a distribuição em seus consumidores finais e possuem duas funções principais: garantir o isolamento elétrico entre dois pontos com potenciais elétricos diferentes e proporcionar o suporte mecânico dos cabos condutores às estruturas fixas. Portanto, seu comportamento tem um papel de grande importância para a operação segura e confiável do sistema elétrico de potência (LUNA, 2006).

Como citado suas funções e aplicações acima, os isoladores elétricos existem atualmente nos mais variáveis, tipos, tamanhos, arranjos e materiais, dotados juntamente de propriedades mecânicas quanto elétricas. Os tipos mais usados nos dias de hoje são os isoladores cerâmicos (porcelanatos), vítreos e poliméricos ou compósitos, onde neste último suas aplicações estão ganhando cada vez mais espaço por serem feitos de materiais mais leves, robustos, eficientes e com uma tendência de serem mais econômicos a longo prazo.

2.2 ISOLADORES ELÉTRICOS EM SEUS PRIMÓDIOS

Nos primórdios da geração e da distribuição de energia, os materiais e métodos de isolamento eram bastante rudimentares e se limitavam basicamente no emprego de materiais cerâmicos. Os primeiros isoladores cerâmicos utilizados como materiais elétricos surgiram a partir de 1830, quando as linhas telegráficas foram ganhando espaço e passaram a demandar uma necessidade crescente por isoladores elétricos e, com isso, a porcelana passou a ser empregada (JANSSEN, 2005).

Para o funcionamento adequado e seguro de uma linha de transmissão, os fios condutores devem ser mantidos eletricamente isolados entre si e do poste de sustentação. Com esse intuito, diversos materiais disponíveis na época foram empregados, como a mica, ebonite, vidro, entre outros, como ilustra a Figura 2.1. Além do mais, todos esses materiais empregados apresentavam características distintas entre si de resistência elétrica, mecânica e às intempéries, assim como custo e disponibilidade no mercado, visto que na época esses materiais não eram padronizados.

Entre esses materiais, o vidro foi o que apresentava as melhores características, porém maiores dificuldades de produção. Em 1849, Werner von Siemens (1816-1892) adotou a mesma porcelana utilizada na louça doméstica para a produção dos isoladores a serem utilizados na linha telegráfica entre Frankfurt e Berlim, na Alemanha. Apesar de na época ser considerada inferior ao vidro no que se refere às características físicas, a porcelana era mais econômica e fácil de produzir no formato desejado, entretanto, exigia um controle muito rígido do processo de produção, pois era bastante comum encontrar inclusões de ar, rachaduras e trincas no isolador, que reduziam a capacidade de suportar as exigências elétricas e mecânicas sujeitas no trabalho (JANSSEN, 2005).

Figura 2.1 – Isoladores Telegráficos utilizados no século XIX.



Fonte: JANSSEN, 2005

Conforme o avanço da instalação das primeiras linhas de transmissão de energia elétrica no final do século XIX, surgiu a necessidade do emprego de isoladores elétricos capazes de suportar tensões mais elevadas. Diante disso, o formato dos isoladores teve que sofrer grandes modificações para evitar que a água e a poluição depositada na superfície do isolador não permitissem a presença de corrente elétrica e danificassem o sistema. Assim, o tamanho das peças aumentou com o objetivo de suportar a tensão elétrica maior, e como a produção de grandes peças de vidro temperado em larga escala com desenho intrincado era um processo complexo, as cerâmicas, especificamente a porcelana, passaram a substituir gradativamente o emprego do vidro nos isoladores de alta e média tensão.

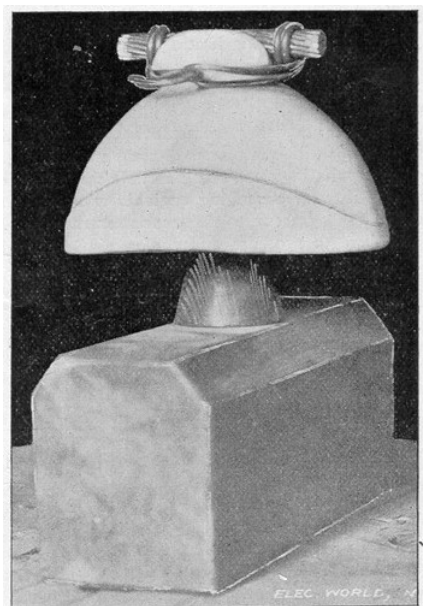
2.2.1 Os Primeiros Isoladores para Média e Alta Tensão

Além dos problemas relacionados com defeitos de produção, bastante rudimentar na época, as primeiras porcelanas eram produzidas por um processo onde a mistura de matérias primas era prensada a seco e queimada, resultando em um material poroso, que absorvia água e deixava de ser bom isolante (JANSSEN, 2005). Um processo úmido foi desenvolvido por Fred M. Locke, na empresa *Imperial Porcelain Works* de Trenton, *New Jersey*, em que os componentes eram misturados com água, moldados a vácuo, torneados, secos e então queimados, resultava em um material isento de bolhas de ar e suporta bem as intempéries e tensões elevadas.

Em 1896 a cerâmica produzida por Fred M. Locke foi utilizada pela primeira vez na linha de transmissão de 40 kV entre a hidrelétrica de Niagara Falls e a cidade de *Buffalo*, ambas no estado norte americano de *New York*, conforme a Figura 2.2. Foi a partir deste momento que isoladores cerâmicos ganharam notoriedade e passaram a substituir os isoladores de vidro.

Foi apenas por volta de 1950, que a empresa *General Electric* apresentou os primeiros isoladores elétricos feitos a partir de materiais poliméricos, na época percebeu-se que eles representavam uma notável redução no peso, e, por conta disso, forneciam uma maior facilidade de instalação, foi aí que os isoladores poliméricos passaram a ser lentamente empregados em linhas de transmissão que eram construídas.

Figura 2.2 – Isolador U-937 de Fred M. Locke, *The Helmet*.



Fonte: *Niagara Falls to Buffalo Power Transmission*, 2006

Com o passar do tempo, os isoladores cerâmicos, principalmente feitos de porcelana,

e os vítreos ainda eram os mais utilizados no sistema elétrico, ganhando diversos modelos, formatos e arranjos, os quais foram se aperfeiçoando. Entretanto, foi a partir da década de 80, que isoladores poliméricos passaram a ser utilizados em uma larga escala, competindo, assim, com os isoladores já presentes em linhas de transmissão e distribuição mais antigas. Foi a partir desse momento que se tornou oportuno o surgimento de estudos comparativos e de viabilidade entre os isoladores elétricos para se determinar os melhores modelos a serem empregados nas novas linhas que surgirão, uma vez que, escolhido da forma certa, acarreta em uma significativa redução de custo a longo prazo.

3 ISOLADORES ELÉTRICOS NOS TEMPOS ATUAIS

Os isoladores elétricos utilizados em linhas de transmissão e distribuição normalmente são produzidos a partir do vidro, da cerâmica (porcelana) e de materiais poliméricos. Sendo também classificados quanto à forma em três grupos principais, isoladores tipo pino, pilar e suspensão.

Além disso, de acordo com (MORA et al., 2010), os isoladores são submetidos a ensaios, com o objetivo principal de garantir que os mesmos possam desempenhar a sua função sem que ocorram inconvenientes. Os ensaios diferem quanto a natureza, pode-se ter:

- Ensaio elétrico: Têm como objetivo testar quais os níveis de tensão que o isolador suporta nas mais variadas condições (tempo seco, chuvoso, etc) sem que os mesmos apresentem avarias. Esse tipo de ensaio é de extrema relevância, pois em condições de trabalho, o isolador pode receber sobretensões devido ao fechamento ou abertura das linhas e ainda devido a descargas atmosféricas, por exemplo.
- Ensaio térmico: Neste ensaio, verifica-se a resistência do isolador as variações de temperatura, devendo o isolador se comportar de maneira satisfatória após os testes, sem qualquer fissura ou fenda.
- Ensaio mecânico: Verifica-se a resistência do isolador de acordo com os testes mecânicos, simulando as condições normais ou excepcionais de trabalho, como a tração, torção e compressão.

3.1 ISOLADORES CERÂMICOS/PORCELANATOS

Os primeiros isoladores que apareceram nos sistemas elétricos de linhas de telégrafos foram os isoladores cerâmicos, uma das primeiras empresas que os produziram estava no Reino Unido. No Brasil, em 11 de maio de 1852, Guilherme Schuch, nascido na mesma época que o segundo imperador brasileiro, formado em engenharia na escola politécnica de Viena, fundou uma repartição chamada Telégrafo Nacional, portanto, instalando os primeiros fios telegráficos

no país, inicialmente nas cidades de Rio de Janeiro e Petrópolis e mais tarde espalhando-se por todo o território nacional (MORA et al., 2010).

Contudo, devido ao clima úmido e quente nos trópicos, os isoladores foram se deteriorando, com isso, o barão de Capanema, assim chamado, Guilherme Schuch, inventou um novo tipo de isolador para linhas telegráficas terrestres, composto integralmente de vidro, porcelana e ebonite, seu diferencial estava no fato de que ele não havia nenhuma peça metálica.

Atualmente, existem uma grande quantidade de materiais cerâmicos e todos os anos surgem novas composições. Em 1956, o comitê alemão de normas propôs a norma DIN 40.685 (*Deutsch Industrie Norm*), que classifica os materiais cerâmicos dielétricos em 9 grupos. A norma IEC 60.672, internacionalmente aceita, é fundamentada na norma alemã e usa a mesma classificação. Conforme (JANSSEN, 2005) os grupos são divididos em:

- Grupo C100: Aluminossilicatos. Nesse grupo estão presente os materiais mais usados quando trata-se de Isoladores Cerâmicos, como a porcelana de quartzo (C110), a porcelana de alumina (C120), a porcelana de alta alumina (C130) e a porcelana de dissilicato de lítio (SiO_2 LiO₂) (C140). Em geral, os materiais desse grupo têm boas características elétricas e mecânicas e são utilizados como isoladores elétricos de alta e baixa tensão.
- Grupo C200: Silicato de magnésio. Além de possuir boas características elétricas e mecânicas, esses materiais possuem boa estabilidade dimensional durante o processo de fabricação, o que permite a obtenção de peças com dimensões precisas. Além disso, possui baixo fator de perdas em altas frequências, tornando-os ideal para isoladores e capacitores em equipamentos de alta frequência, como transmissores e antenas de rádio.
- Grupo C300: Titanatos e outras cerâmicas de alta permissividade. Esse grupo reúne as cerâmicas especialmente desenvolvidas para uso como dielétrico em capacitores de alta frequência.
- Grupo C400: Silicato de magnésio e alumínio. O representante mais conhecido desse grupo é a cordierita (C410). caracteriza-se principalmente por seu pequeno coeficiente de expansão térmico e a elevada resistência a choques térmicos.
- Grupo C500: Silicato de magnésio e alumínio poroso. Materiais do grupo C400 produzidos por métodos que tornam o produto final poroso. É possível controlar precisamente o tamanho e a distribuição dos poros, o que permite a obtenção de bons substratos para sensores e transdutores.

- Grupo C600: Mulita. As cerâmicas produzidas com base na mulita apresentam bom desempenho em altas temperaturas, são refratárias e apresentam boa condutividade térmica, sendo então utilizadas em peças para fornos de alta temperatura, como por exemplo tubos para proteção de termopares.
- Grupo 700: Alumina. Nesse grupo são classificadas as cerâmicas compostas praticamente por alumina pura. Materiais de excelentes características térmicas, mecânicas e elétricas, porém bastante custoso, empregada apenas em aplicações que exigem materiais de alto desempenho.
- Grupo C800: Outros materiais óxidos. Esse grupo é reservado para óxidos de metais não classificados nos grupos anteriores, como o óxido de berílio (C810) e Óxido de Magnésio (C820), caracterizados por serem bons condutores térmicos e isolantes elétricos.
- Grupo C900: Outros materiais não óxidos. Esse grupo é reservado para as cerâmicas que não são óxidos metálicos, especialmente os nitretos. Os quais são estudados como substitutos dos óxidos em aplicações de alta performance.

Tratando especificamente de isoladores elétricos cerâmicos, eles se destacam por terem alta resistência mecânica, podem facilmente ser modelados em vários formatos, possuem alta capacidade de isolação, além do fato de serem quimicamente inertes e possuírem uma ótima resistência a choques térmicos (BONETTI et al., 2009). Um bom exemplo de material cerâmico que é comumente utilizado é a porcelana, isoladores vítreos com aditivos também podem ser classificados como isoladores cerâmicos.

De forma geral, a cerâmica já teve muita importância para a isolação do SEP. Entretanto, ela perdeu espaço, inicialmente para o vidro e, atualmente, para materiais poliméricos, que tomam esse espaço devido a serem mais leves, mais resistente à corrosão, terem menor custo de manutenção, entre outras propriedades que também serão verificadas através da revisão bibliográfica de experimentos práticos estudados durante a confecção deste trabalho.

3.1.1 Isoladores Cerâmicos mais utilizados

Os tipos de isoladores cerâmicos mais utilizados em linhas de distribuição são listados de 3.1.1.1 a 3.1.1.6.

3.1.1.1 Isoladores Roldana

Os isoladores roldana de porcelana são utilizados em montagem vertical, vide Figura 3.2, ou horizontal, fixados por parafuso nos postes para entrada em residências e indústrias. São fabricados conforme as normas técnicas NBR 6249, ANSI C29.3, BS (*British Standard*) ou especiais, aplicados desde 1350 daN até 2670 daN de resistência mecânica a flexão, na tensão nominal de 1,2 kV. Utilizado predominantemente em redes de distribuição urbana e rural secundária (baixa tensão, de 127 V a 1 kV) (ENERGISA/GTD-NRM/N.º27/2020, 2006). São também encontrados em diversos tamanhos, conforme o fabricante, e em cores normalmente preta e marrom.

A Figura 3.1 faz alusão as informações que são fornecidas pelo fabricante, como tensão nominal de operação, carga de ruptura mínima e tensões máximas suportáveis em frequência industrial sob chuva.

Figura 3.1 – Características físicas do isolador roldana de porcelana

Código Energisa	Formato ABNT	Tensão Nominal	Tensão suportável nominal em frequência industrial, sob chuva		Carga de ruptura mínima
			Eixo horizontal	Eixo vertical kV	
		(kV)	(kV)		(daN)
90295	R 1350-2	1,2	13,5	10	1.350

Fonte: ENERGISA/GTD-NRM/N.º27/2020.

Figura 3.2 – Ferragem de suporte para o isolador roldana de porcelana



Fonte: UNICASERV.

3.1.1.2 Isoladores Castanha

Os isoladores castanha de porcelana são utilizados em estais (tirantes) de postes de distribuição e ancoragem (fim de linha) de distribuição, normalmente em tensões de 127 V a 440 V. São fabricados conforme as normas NBR, ANSI ou BS, desde 1800 daN até 8200 daN de resistência mecânica a tração, nas tensões de 7 kV até 21 kV de tensão elétrica suportável sob chuva em frequência industrial, exemplo Figura 3.4. São fabricados principalmente nas cores marrom e cinza no formato conforme a Figura 3.3 (DEUTSCH, 2016).

Figura 3.3 – Isolador castanha marrom de porcelana



Fonte: Normas Técnicas Energisa

Figura 3.4 – Características físicas do isolador castanha de porcelana

Código Energisa	Formato ABNT	Distância de escoamento	Carga de ruptura mínima	Tensão suportável nominal em frequência industrial, sob chuva
		(mm)	(daN)	(kV)
90894	C 3400-1	60	3.400	14
91234	C 8200-2	90	8.200	21

Fonte: Normas Técnicas Energisa

3.1.1.3 Isoladores tipo Pino

Os isoladores elétricos tipo pino de porcelana, são usados para montagem rígida vertical ou horizontal em cruzeta ou diretamente no poste. Estes apresentam entalhe superior e gola lateral para fixação dos cabos aéreos, sendo normalmente amarrados aos cabos com laços preformados (Gerson Tertuliano, 2015).

São fabricados conforme as normas NBR, ANSI ou BS, desde 7,2 kV até 72 kV nas cores marrom ou cinza, em rosca ISO de 25 mm e de 35 mm para pinos metálicos padronizados. Utilizado predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38 kV). Com menor frequência são utilizados em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72 kV) (DEUTSCH, 2016).

Analisando a Figura 3.5, pode-se notar que há diferentes tipos de isoladores do tipo pino no que se refere ao nível de poluição do meio de utilização. Aqueles do tipo antipoluição apresentam maior distância de escoamento e são usados em ambientes cuja atmosfera é carregada de poluentes, como no caso da orla marítima, neste caso o isolador mais à esquerda apresenta uma maior distância de escoamento quando comparado ao isolador ao centro, facilitando a dispersão da poluição sobre o corpo do isolador.

Figura 3.5 – Isoladores tipo pino de porcelana



Fonte: PowerProjetosEletricos

3.1.1.4 Isoladores tipo Pilar

Os isoladores elétricos do tipo pilar de porcelana constituem uma alternativa para os isoladores tipo pino de porcelana, com a vantagem de sua imperfurabilidade, tensão de rádio interferência reduzida, melhor desempenho a poluição e maior resistência mecânica á flexão para pinos curtos (Gerson Tertuliano, 2015).

É utilizado predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38 kV). Com menor frequência são utilizados em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72 kV) (FILHO, 2000).

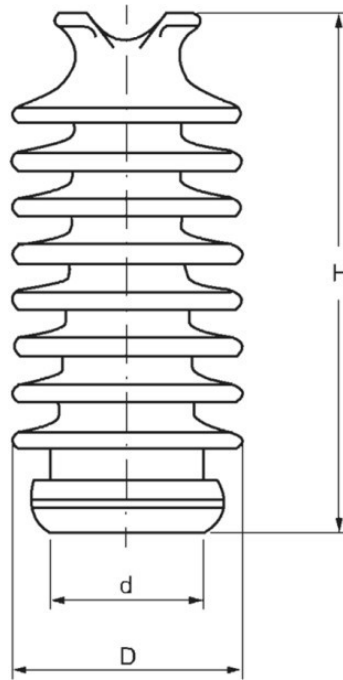
As Figuras 3.6 e 3.7 mostram as diferentes dimensões dos isoladores tipo pilar conforme a classe de tensão de operação (kV). Onde "H" é a altura do isolador (mm), "D" o diâmetro nominal da saia e "d" o diâmetro da base de fixação (mm).

Figura 3.6 – Características Eletromecânicas dos Isoladores Pilar de porcelana

Código Energisa	Classe de Tensão de Operação	Formato ABNT	Dimensões						Característica mecânica	Características Elétricas	
			Altura máxima do isolador "H"	Diâmetro nominal da saia "D"	Distância de escoamento mínima	Diâmetro máximo da base de fixação "d"	Tipo de rosca da base de fixação	Tipo cabeça	Carga mínima de ruptura à flexão	Tensão suportável nominal em frequência industrial, sob chuva	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico a seco (NBI)
	(mm)						(kN)				
90253	15,0	PL8CC110	220	140	300	90	C - M20	C	8,0	38	110
90254	24,2	PL8CC150	330	150	530	90	C - M20	C		50	150
90580	36,2	PL8CC170	400	160	720	90	C - M20	C		70	170
91304	46,0	PL12,5CF250	550	200	1.140	140	C - M20	C		12,5	85

Fonte: Normas Técnicas Energisa

Figura 3.7 – Dimensional do Isolador pilar de porcelana



Fonte: Normas Técnicas Energisa

3.1.1.5 Isoladores Bastão

Os isoladores elétricos do tipo bastão de porcelana, exemplificado na Figura 3.8, são alternativas válidas em montagem rígida com engates garfo e olhal redondo (pino), para cadeias de isoladores de ancoragem assim como isolador de suspensão monocorpo. Isoladores bastão são utilizados principalmente em linhas de transmissão de até 35 kV, entretanto, atualmente, eles vem sendo substituído de forma cada vez mais frequente por isoladores poliméricos, os quais apresentam grandes vantagens técnicas e logísticas (Gerson Tertuliano, 2015).

Figura 3.8 – Isolador tipo bastão de porcelana



Fonte: Santa Fé Transformadores

3.1.1.6 *Isoladores de Suspensão ou Disco*

Utilizados em redes de distribuição urbana e rural primária (média tensão até 38 kV) e em linhas de transmissão. Os isoladores de disco podem ser utilizados em qualquer tensão elétrica, dependendo apenas do número de isoladores instalados em série. Isoladores de disco podem ser instalados tanto em estruturas de ancoragem quanto em estruturas de suspensão, sendo que a força é aplicada sempre axialmente ao isolador (DEUTSCH, 2016).

Torna-se importante salientar também, que o potencial não distribui-se uniformemente entre os discos, tendendo a acumular-se nos discos mais próximos da linha. Esse efeito pode ser atenuado com o uso de anéis equalizadores ou anti-corona. Em regiões de poluição intensa, próximo a parques industriais ou ao litoral, pode-se utilizar discos especiais anti-poluição, com saias maiores (JANSSEN, 2005).

Na Figura 3.9 percebe-se a presença de 3 isoladores tipo disco de porcelana na cor marrom conectados em série. Entretanto, assim como os isoladores bastão de porcelana, os isoladores de disco de porcelana estão cada vez mais sendo substituídos por isoladores compostos de polímeros, por serem mais leves, mais fáceis de obter matéria prima, mais resistente à corrosão, e a poluição.

Figura 3.9 – Isoladores tipo disco de porcelana em série



Fonte: Isotrafo

3.2 ISOLADORES DE VIDRO

Atualmente, os isoladores elétricos feitos de vidro são largamente utilizados em linhas de transmissão de alta e extra alta tensão, por conta de sua confiabilidade e facilidade na manutenção. O vidro, utilizado em isoladores elétricos, de acordo com (LIMA; SILVA, 2017) possui propriedades físicas semelhantes, dentre as quais podem-se destacar:

- Alta durabilidade e boa resistência a umidade;
- Condutividade elétrica baixa;
- Baixa dilatação térmica;
- Boa elasticidade;
- Elevada confiabilidade.

No Brasil, o uso de isoladores elétricos feitos de vidro em linhas de transmissão acima de 230 kV é amplamente difundida, tendo em vista que estes componentes garantem boa confiabilidade ao sistema e um bom desempenho. Além disso, os isoladores de vidro possuem uma

tecnologia amadurecida, possuem uma vida útil longa e têm uma facilidade em ser intercambiáveis. Entretanto, os isoladores de vidro utilizados em linhas de distribuição e transmissão apresentam algumas desvantagens e aspectos negativos, de acordo com (LIMA; SILVA, 2017), como:

- Peso elevado em relação aos poliméricos;
- Atratividade ao vandalismo;
- Corrosão nas ferragens, caso não possua isolamento galvânica;
- Suscetíveis a danos causados por choque térmico devido a raios/flashover.

Tendo em vista a longa vida útil, os isoladores permanecem muito tempo expostos à intempéries como umidade, variações de temperatura e maresia, fatores que ocasionam o acúmulo de poluentes e a corrosão dos mesmos. De um modo geral, tanto os isoladores quanto os seus componentes devem apresentar superfícies lisas e sem defeitos, assim como, conforme a Figura 3.11, o pino deve ser fabricado em aço forjado zincado para evitar a corrosão como o ocorrido mostrado na Figura 3.10.

Na parte a ser cimentada dentro da campânula, é revestido com verniz especial para modificar o estado da sua superfície. Este processo aumenta a resistência aos esforços de compressão e cisalhamento do cimento quando o isolador é submetido à tração (QUEIROZ; VILAR; OLIVEIRA, 2015), e em caso de avaria ou corrosão nas ferragens, o isolador deve ser substituído integralmente o mais rapidamente possível para mitigar efeitos negativos aos sistema.

Figura 3.10 – Isolador de vidro comprometido com a corrosão

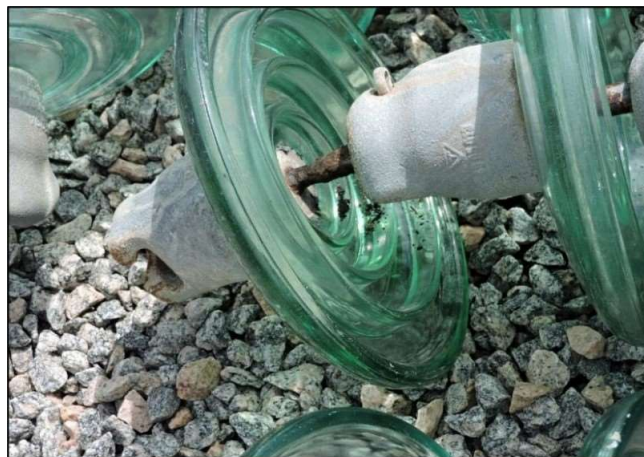
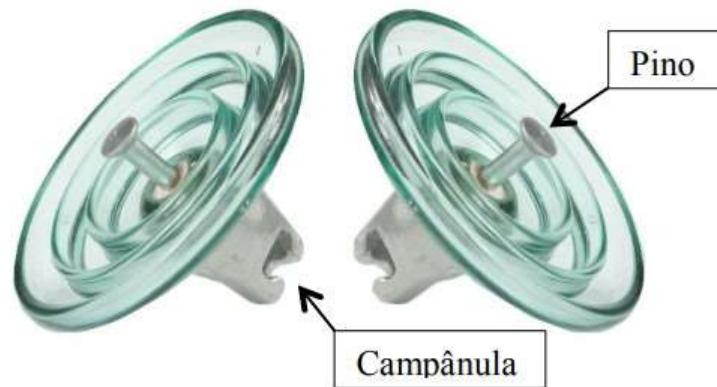


Figura 3.11 – Pino e Campânula do Isolador tipo disco de vidro

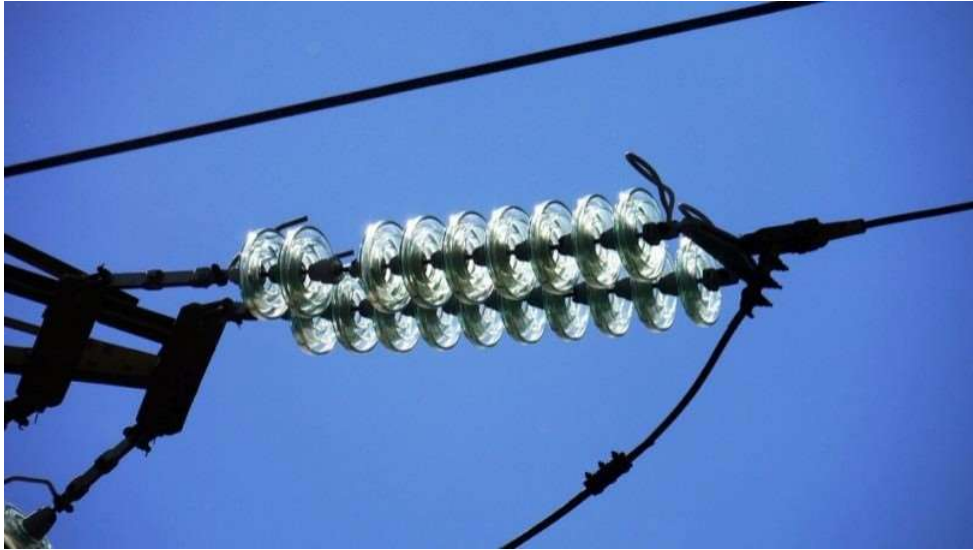


Fonte: QUEIROZ; VILAR; OLIVEIRA, 2015

O isolador de vidro mais utilizado é o disco, esse tipo de isolador, assim como o disco de porcelana, pode ser utilizado em qualquer tensão, variando apenas o número de isoladores que serão ligados em série, onde quanto maior o número de isoladores em série, maior a suportabilidade elétrica. É possível também a montagem de duas ou mais cadeias em paralelo, para aumentar a capacidade mecânica, vide Figura 3.12.

Pode-se citar também que, devido ao seu custo baixo, alta confiabilidade, simplicidade e bom desempenho ao longo dos anos, os isoladores de vidro dominaram o mercado por muito tempo. Contudo, com o surgimento de novos materiais e tecnologias, os isoladores de vidro vêm ao longo do tempo perdendo o seu espaço para os isoladores poliméricos, tendendo-se a uma alta substituição desse tipo de material.

Figura 3.12 – Cadeia de isoladores do tipo disco de vidro conectadas em paralelo



Fonte: Revista AdNormas

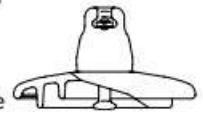
3.2.1 Variantes dos isoladores tipo disco de vidro

Dada a versatilidade e facilidade de produção do vidro em larga escala, a Sediver, empresa líder-técnica mundial na pesquisa, projeto, fabricação de isoladores de vidro para linhas de média ou alta tensão e distribuição, produz atualmente diversas variantes de isoladores de vidro, instalados em mais de 150 países. Como os isoladores ficam sujeitos as mais diversas intempéries climáticas, a Sediver projetou e desenvolveu diferentes perfis de isoladores adaptados a todos os tipos de climas e ambientes, exemplificados na Figura 3.13, tal como descrito no padrão IEC 60815-1 (Sediver, 2019).

Figura 3.13 – Variantes dos isoladores de vidro produzidos pela Sediver

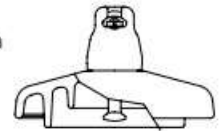
Perfil padrão:

O perfil padrão é caracterizado por uma distância de escoamento superior aos valores indicados na IEC 60305 para isoladores padrão e por nervuras inferiores rasas e bem espaçadas que permitem uma ação auto-limpante eficaz, por vento ou chuva. Possui uma relação de distância de escoamento/passo de aproximadamente 2,2 e é particularmente eficaz em aplicações de suspensão e ancoragem em áreas de poluição muito leve a média, onde normalmente o nível de poluição (ESDD) é inferior a 0,1 mg/cm². (Exemplos: zonas E1 a E4).



Perfil anti-poluição:

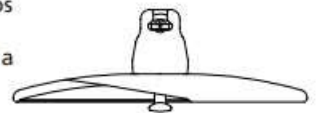
O perfil anti-poluição é caracterizado por nervuras inferiores longas e amplamente espaçadas de modo a evitar a ponte de arco entre as nervuras adjacentes. Possui uma relação de distância de escoamento/passo de aproximadamente 3,2 e é particularmente eficaz nas áreas costeiras (neblina salgada), bem como em áreas poluídas onde é necessária uma maior distância de escoamento específica. (Exemplos: áreas E5 a E7).



Perfil aberto (plano):

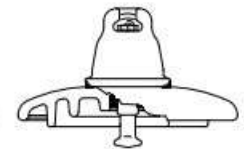
O perfil de tipo aberto (plano) apresenta uma relação de distância de escoamento/passo de aproximadamente 2,4 sem nervuras inferiores, de modo a evitar a acumulação de depósitos de poluição sólida (poeira, areia) na sua superfície inferior. É particularmente adaptado às aplicações de suspensão e ancoragem em áreas desérticas onde o vento é predominante e a chuva é pouco frequente. (Exemplo: áreas E1 a E4).

Também é eficaz para cadeias de fim de linha em casos de poluição industrial extrema e pode resolver problemas de formação de gelo quando é alternado com outros perfis na cadeia.



Perfil ELECTROPIC®:

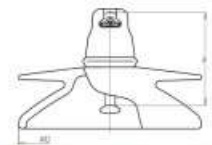
Projeto desenvolvido para regiões tropicais, apresentando excelente resistência à corrosão. Processo especial de montagem e exclusivos perfis de campânula e dielétrico, associados ao benefício oferecido pela luva de zinco, conferem ao ELECTROPIC® a garantia de redução do campo elétrico e limitação da ação de arcos entre suas interfaces, protegendo eficazmente o isolador durante o período de condensação, efeito frequente em ambientes tropicais.



Perfil Outerib (aletas externas):

Este perfil oferece uma distância de escoamento equivalente ao perfil anti-poluição e está adaptado aos casos mais extremos de poluição sólida.

A eliminação das nervuras inferiores reduz o acúmulo de poluição, promove a limpeza e facilita a limpeza manual quando necessário.



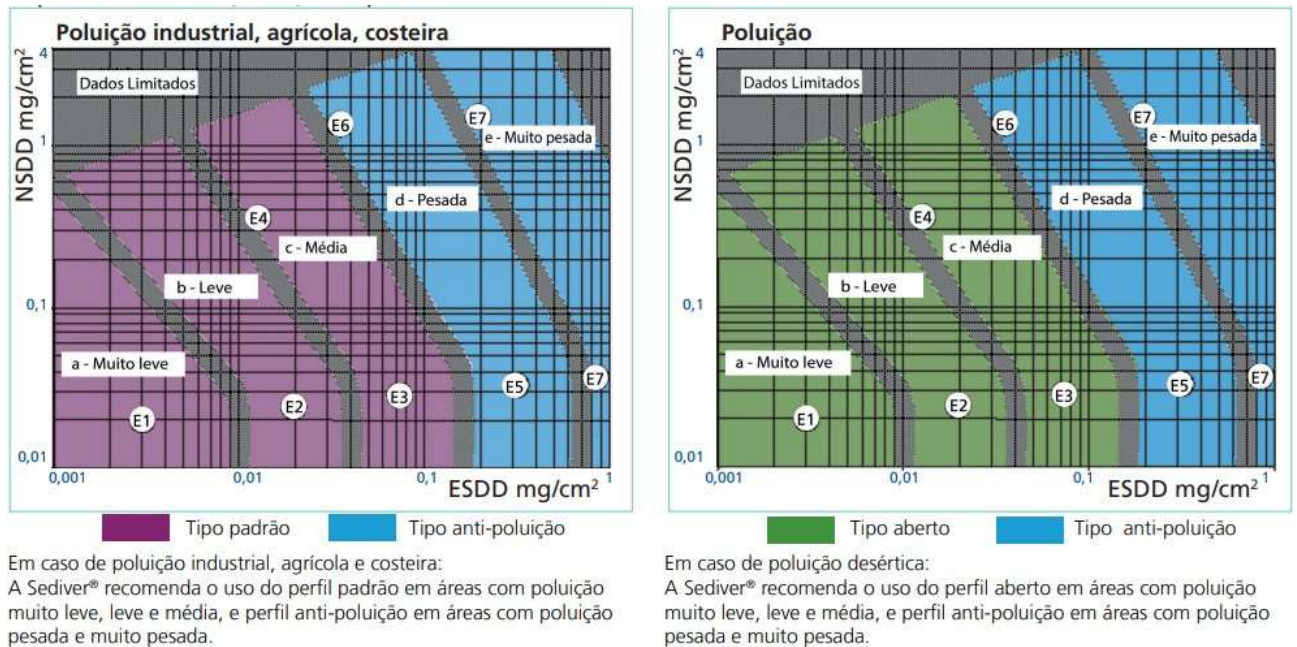
Fonte: Sediver, 2019

E quanto aos critérios de seleção, com o intuito de definir o perfil do isolador a ser instalado, analisa-se a Figura 3.14. O padrão IEC 60815-1 define cinco níveis de poluição, de acordo com a severidade da poluição: Muito leve, leve, média, pesada e muito pesada. Os níveis de poluição são definidos conforme a Densidade de Depósito em Equivalente de Sal (ESDD) e a Densidade de Depósitos Insolúveis (NSDD) na superfície do isolador. Na Figura 3.14 é possível analisar 2 gráficos distintos, um quando o isolador está sujeito a poluição industrial, agrícola e costeira e o outro quando está sujeito a poluição desértica, em cada caso, de acordo com a severidade da poluição, recomenda-se diferentes perfis de isolamento.

Por exemplo, em caso de poluição desértica leve, recomenda-se o uso do isolador com

Perfil aberto, já o Perfil anti-polição é aconselhado para situações e locais de poluição pesada e muito pesada.

Figura 3.14 – Níveis de poluição para a escolha do perfil de isolador



Fonte: Sediver, 2019

Entretanto, para casos de poluição extrema ou excepcional (áreas desérticas, costeiras, etc), pode se tornar necessário lavar os isoladores de vidro e porcelana convencionais, de modo a reduzir o risco de surtos elétricos superficiais devido ao depósito crítico de poluição. Diante disso, a Sediver desenvolveu o *Sedicoat*, que são isoladores de vidro temperado revestidos com silicone, os quais podem ser aplicados em linhas de alta tensão de corrente contínua e linhas de alta tensão de corrente alternada. O revestimento de silicone cria propriedades hidrofóbicas na superfície do dielétrico de vidro e, assim, melhora significativamente o seu desempenho elétrico sob poluição extrema, reduzindo as correntes de fuga. Os isoladores *Sedicoat* oferecem uma solução que elimina a necessidade de lavagem regular em condições de extremas poluições, reduz o custo de manutenção e pode ser aplicado em todos os perfis de vidro, conforme a Figura 3.15 (Sediver, 2019).

Figura 3.15 – Isoladores *Sedicoat* em operação



Fonte: Sediver, 2019

3.3 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Como visto na abordagem histórica dos materiais isoladores empregados no sistema elétrico de potência, o emprego de materiais poliméricos começou lentamente a ser introduzido por volta de 1950. Contudo, foi na década de 1980 que esses materiais começaram a ganhar espaço de forma cada vez mais intensa e destacada no estudo das linhas de transmissão de energia.

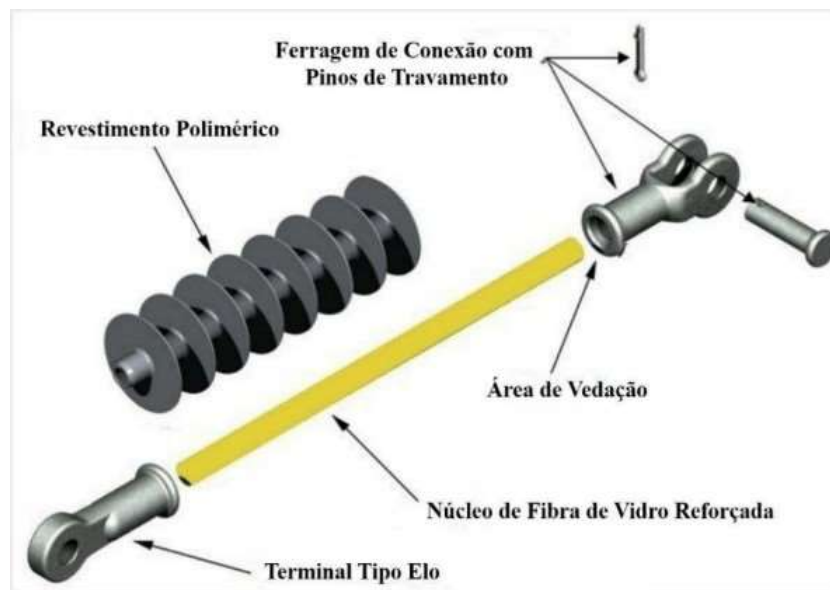
Em geral, o núcleo de isoladores poliméricos é constituído por uma haste de fibra de vidro, a qual é reforçada por um polímero do tipo epóxi, poliéster ou vinil. Este núcleo, deve, não só, suportar os esforços mecânicos impostos pelo peso dos condutores, mas também suportar, em situações excepcionais, tempestades, ventos e vibrações.

O comprimento e a dimensão do núcleo depende de quais esforços pontuais o isolador está sujeito. Além disso, um composto especial é aplicado com o intuito de fazer o revestimento do núcleo e protegê-lo contra agentes externos (umidade, contaminadores químicos, radiação ultravioleta, etc). Este revestimento pode ser de vários tipos, como: SR (silicone rubber), teflon,

resina epóxi, borracha de silicone vulcanizada à alta temperatura (HTV), borracha de silicone vulcanizada a temperatura ambiente (RTV), EPM (etileno-propileno-metileno), EPDM (etileno-propileno-dieno-metileno) ou PTFE (politetrafluoretileno) (DEUTSCH, 2016).

Nas extremidades da haste do núcleo são fixadas, geralmente por compressão, as ferragens de conexão com pinos de travamento na torre e os terminais para a fixação do cabo condutor no isolador, conforme ilustra a Figura 3.16.

Figura 3.16 – Partes que compõe o isolador polimérico



Fonte: *ResearchGate*

Como foi mencionado, os isoladores formados por polímeros apresentam enormes vantagens quando comparados aos isoladores de vidro e porcelana, entre as quais, conforme (BEZERRA et al., 2010) podem-se destacar:

- Resistência a impactos mecânicos e melhor desempenho em áreas de vandalismo;
- Peso inferior aos isoladores cerâmicos e vítreos;
- Melhor desempenho em áreas sob poluição industrial e marinha;
- Facilidade em executar tarefas de manutenção;
- Apresenta baixo custo no mercado de isoladores;
- Hidrofobicidade elevada.

Entretanto, em algumas instalações horizontais, os isoladores poliméricos de linhas de transmissão sofrem danos de pássaros, normalmente pela bicagem, conforme a Figura 3.17. Portanto, em regiões com grande migração de pássaros, torna-se conveniente a instalação de uma cadeia de isoladores poliméricos verticais, ou, manter, naquela região, cadeias de isoladores feitos de vidro. Assim como o tempo de vida útil desses isoladores é de difícil determinação, uma vez que não faz muito tempo que eles começaram a ser empregados em uma larga escala no sistema elétrico.

Figura 3.17 – Dano de pássaro em isoladores poliméricos de uma linha de 110 kV



Fonte: INMR

3.3.1 Tipos de Isoladores Poliméricos

As variantes de isoladores poliméricos mais utilizados no sistema elétrico contemporâneo são os tipos: Pino, pilar e isoladores de suspensão ou ancoragem. Contudo, hoje é possível encontrar no mercado todos os tipos de isoladores elétricos feitos a partir de polímeros, como os isoladores do tipo castanha, roldana, buchas de transformadores, entre outras variedades.

3.3.1.1 Isoladores poliméricos tipo pino

Os isoladores poliméricos tipo pino são comumente utilizados em linhas de distribuição e subtransmissão, possuindo em sua composição interna um furo rosqueado, que por sua vez é fixado a uma estrutura, normalmente na cruzeta dos postes por meio de pinos de aço.

Na Figura 3.18 verifica-se dois isoladores elétricos do tipo pino polimérico que são empregados em tensões diferentes, onde, o isolador empregado sobre tensões maiores apresentam maiores comprimentos, diâmetros e, por consequência, distâncias de escoamento também maior.

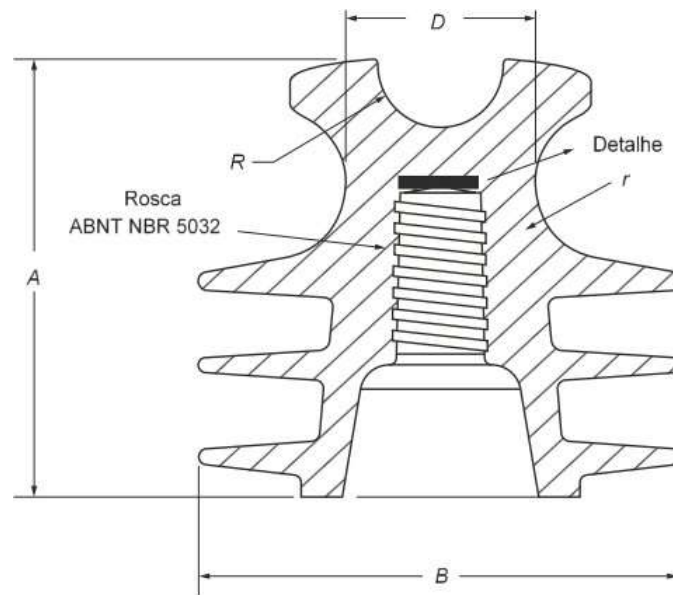
Também, nas Figuras 3.19 e 3.20, é possível ver o padrão dos isoladores tipo pino polimérico empregados no setor elétrico pelo Grupo Energisa, assim como suas características eletromecânicas e dimensões.

Figura 3.18 – Isoladores tipo pino polimérico para tensões de 15 e 35 kV.



Fonte: ASW Brasil

Figura 3.19 – Representação gráfica de um isolador pino polimérico.



Fonte: Energisa

Figura 3.20 – Características eletromecânicas dos isoladores tipo pino polimérico.

Tensão máxima de operação	Dimensões					Rosca (ABNT NBR 5032)
	A	B	D	R	r	
(kV)	(mm)					(mm)
15,0	135	140 ± 5	60 ± 5	19 ± 3	19 ± 3	25
36,2	180	190 ± 5	70 ± 5	25 ± 3	25 ± 3	35

Fonte: Energisa

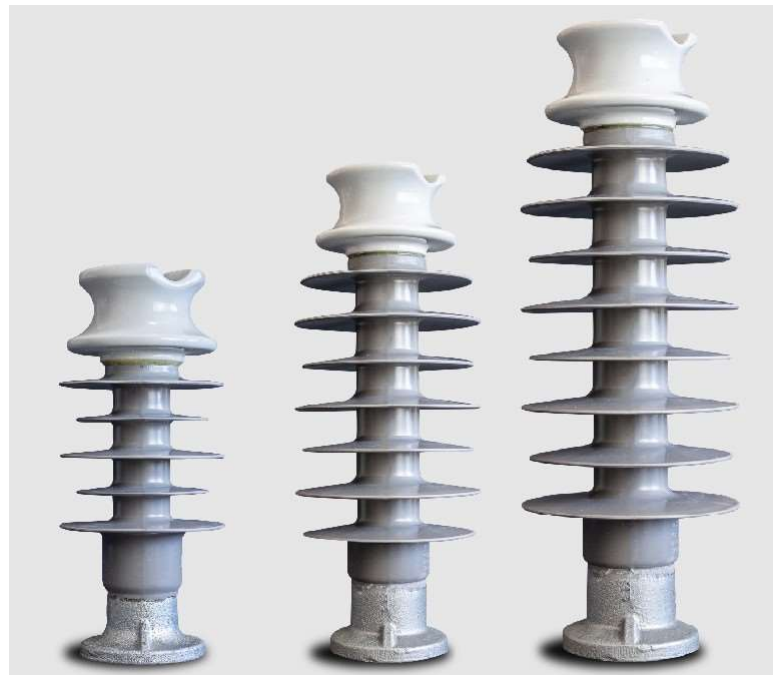
3.3.1.2 Isoladores poliméricos tipo pilar

Assim como ocorre com os isoladores cerâmicos, o isolador tipo pilar polimérico é uma alternativa para isoladores tipo pino, tendo, como vantagem, o seu corpo imperfurável. Por meio do seu sistema de fixação, os isoladores tipo pilar resistem a esforços mecânicos mais elevados, tanto de compressão como de flexão, o que torna sua aplicação eficiente em linhas de distribuição.

Embora raramente são empregados para fazerem a isolação de linhas com tensões maiores, seu uso é bastante difundido em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão

até 38 kV).

Figura 3.21 – Isoladores tipo pilar polimérico de 15, 25 e 35 kV



Fonte: Balestro

A Figura 3.21 mostra 3 isoladores do tipo pilar polimérico que são empregados em diferentes níveis de tensão, esses isoladores são conhecidos por utilizar, normalmente, o processo de injeção em peça única, o que garante uma ótima hermeticidade, e impede o ingresso de umidade ou resíduos no interior dos isoladores. O núcleo de fibra de vidro ECR (*Electrical Corrosion Resistant*) e resina epoxy, também garante segurança e maior vida útil ao isolador (Balestro, 2019).

3.3.1.3 Isoladores poliméricos de suspensão ou ancoragem

Os isoladores poliméricos de suspensão ou ancoragem são os que ganham maior atenção e interesse quando o assunto é a isolação de linhas de transmissão de alta e extra alta tensão, uma vez que são os mais utilizados nesse meio, assim como, caso eventualmente ocorra algum defeito de operação as consequências atingirão uma grande quantidade de consumidores.

Esses isoladores, quando feitos de materiais poliméricos, constituem-se de uma única peça, possuindo peso notavelmente reduzido quando comparado aos equivalentes de vidro e porcelana. Assim como, de acordo com a Figura 3.22, quanto maior o nível de tensão de

operação, maior será o número de aletas e maior o seu comprimento. Também, de acordo com o grau de poluição os quais estarão sujeitos, varia-se a arquitetura das aletas, empregando-se, por exemplo, aletas mais espaçadas e com um maior diâmetro, quando comparadas aos isoladores empregados em condições normais.

Figura 3.22 – Isoladores poliméricos de suspensão para diferentes níveis de tensão



Fonte: Ecplaza

4 ESTUDOS DE CASO

Com o objetivo de avaliar na prática se esses estudos acerca dos isoladores elétricos realmente se concretizam, buscou-se sair do campo teórico das funções e características dos isoladores para fazer a revisão bibliográfica e análise de experimentos de campo que aconteceram em duas situações bastante distintas.

O primeiro estudo de caso resume-se na análise da substituição de isoladores de vidro por isoladores poliméricos realizados na linha Xingó-Angelim II de 500 kV no Nordeste Brasileiro. Já o segundo estudo de caso, teve por objetivo analisar o desempenho de 3 tipos de isoladores elétricos distintos quando submetidos a situações de alta incidência de neve molhada em laboratório. Por fim uma conclusão de como o conhecimento sobre os tipos de clima e vegetação locais beneficia na hora de fazer a escolha entre os isoladores elétricos que serão empregados.

4.1 SUBSTITUIÇÃO DE ISOLADORES DE VIDRO POR ISOLADORES POLIMÉRICOS NA LINHA DE TRANSMISSÃO XINGÓ-ANGELIM II DE 500 KV

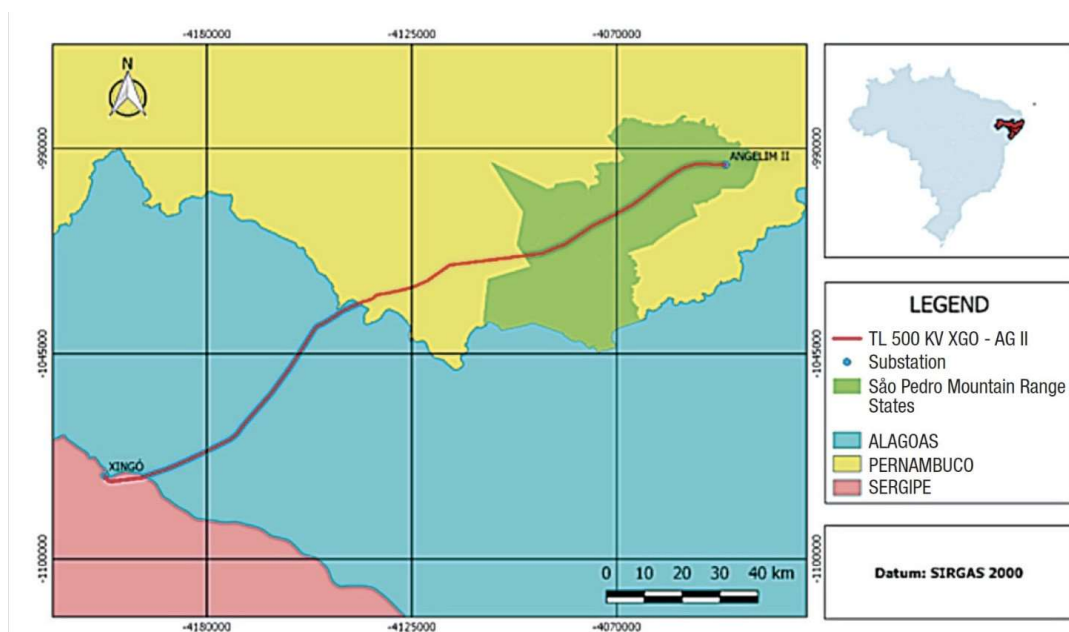
Falhas de isoladores de linhas de transmissão devido à poluição natural são frequentemente associadas a mudanças no ambiente de serviço ou a parâmetros incorretos ao especificar o isolamento durante o desenvolvimento do projeto. Essas interrupções normalmente ocorrem quando a água em um isolante se dissolve, mas em quantidade insuficiente para remover o sal e outros contaminantes condutivos que se acumularam em sua superfície. Desse modo, a corrente de fuga flui sobre a poluição, danificando a isolação e, em casos excepcionais, podem evoluir para um *flashover* (Arco elétrico).

Um histórico de interrupções repetidas na Linha Xingó-Angelim II de 500 kV no nordeste do Brasil é um bom exemplo desses tipos de problemas. Nesse caso, fatores, como mudanças recentes nos padrões de precipitações locais, significam que os isoladores nesta linha devem suportar períodos mais longos com pouca ou nenhuma lavagem natural. De fato, apesar dos estudos sobre a poluição natural nas áreas por onde passa a linha, os problemas só se intensificaram nos últimos anos, paralelamente ao crescimento da rede de transmissão regional (INMR/Xingó, 2022).

Esta contribuição para o INMR, que caracteriza-se por ser uma plataforma para publicações de artigos e periódicos, por engenheiros da Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. (TAESA) revisou a situação, bem como apresentou o trabalho realizado para resolver interrupções de *flashover* ao longo da linha, a fim de evitar tensões relacionadas nos componentes de linha e subestação, e manter a confiabilidade.

A Linha Xingó-Angelim II de 500 kV percorre 193 km pelo nordeste do Brasil, ligando a Usina Hidrelétrica de Xingó, em Alagoas, à Subestação Angelim II, em Pernambuco. Desde o comissionamento em 2004, a linha sofreu uma série de eventos de desligamento concentrados principalmente na Serra de São Pedro, no planalto pernambucano (parte destacada em verde na Figura 4.1). Esta é uma região caracterizada por precipitação limitada, normalmente apenas de abril a agosto, bem como neblina frequentes.

Figura 4.1 – Linha de transmissão Xingó-Angelim II.



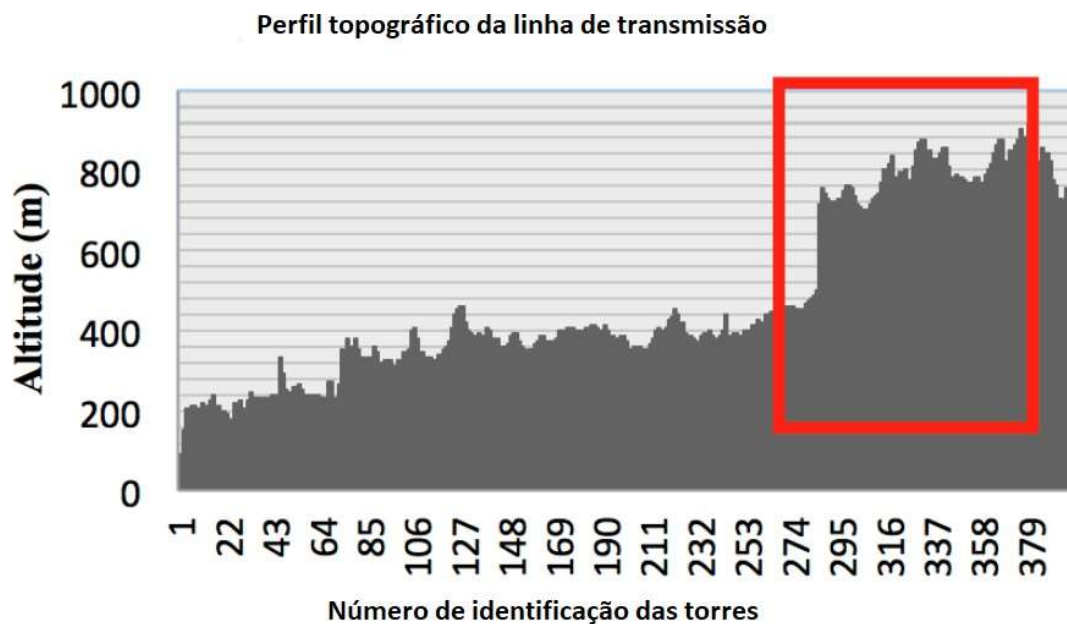
Fonte: INMR

A primeira medida tomada para resolver o problema foi a lavagem sistemática da linha viva das cadeias de isoladores de vidro. No entanto, o custo desta operação de manutenção logo se mostrou insustentável devido à dificuldade de acesso às torres e ao curto tempo necessário entre os sucessivos ciclos de lavagem. Em 2007, foi tomada a decisão de aplicar revestimentos de silicone RTV nos isoladores de vidro. Cerca de 13.800 isoladores foram substituídos por novos, dos quais mais de 8.650 foram pré-revestidos.

O isolamento da Linha Xingó-Angelim II foi projetado com distância de fuga de 8.320

mm (ou seja, 15,12 mm/kV) ao longo de todo o trajeto. Para confirmar se os problemas estavam ocorrendo apenas em áreas montanhosas, foi traçado um gráfico mostrando a altitude de cada torre na linha, vide Figura 4.2. De fato, a maioria das torres afetadas estava no trecho que passava pela Serra de São Pedro e em cotas muito mais altas do que em outros lugares da linha (área em vermelho destacada na Figura 4.2). Isso os tornaria mais suscetíveis a condições de neblina e nevoeiro.

Figura 4.2 – Distribuição das torres da linha Xingó-Angelim II e suas altitudes



Fonte: adaptado de INMR

Considerando a experiência positiva de serviço com isoladores compostos aplicados em linhas de transmissão na mesma região, bem como a própria experiência da TAESA com eles, foi recomendada a substituição de todas as 618 cadeias de isoladores de vidro entre as Torres 284 e 397 por um projeto de isoladores de silicone para poluições de extra alta intensidade. Esta recomendação incluiu torres de suspensão, bem como conjuntos de isoladores de ancoragem. Os isoladores compósitos selecionados tinham uma distância de fuga de quase 15.000 mm, ou seja, cerca de 80% maior do que as cadeias de vidro que eles substituiriam. Eles também ofereceram hidrofobicidade superior e outras propriedades elétricas desejadas, vide Tabela 4.1. A aplicação desses isoladores poliméricos aumentou a distância de fuga específica de 15,12 mm/kV para 27,3 mm/kV, melhorando o isolamento da linha para enfrentar níveis de poluição classificados entre pesados e muito pesados, diminui também em até um quarto o peso da cadeia

de isoladores, antes 104 Kg, agora 26 Kg. Após sua aquisição, um intenso esforço coordenado permitiu a substituição de todas as cadeias antigas em apenas três dias de trabalho com a linha desenergizada.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas dos isoladores substituídos

Informações técnicas	Cadeia de Vidro	Cadeia polimérica
Modelo	Vidro temperado	Polímero para alta poluição
Carga mecânica (kN)	120	120
Diâmetro (mm)	254	138/110
Conexão	16A	16A
Peso (Kg)	104	26
Frequência Industrial		
Tensão suportável a seco da cadeia (kV)	1820	995
Tensão suportável molhado da cadeia (kV)	1040	780
Tensão de descarga molhado da cadeia (kV)	1300	1025
Raios		
Tensão suportável da cadeia (kV)	2600	1785
Tensão de impulso positivo crítico (kV)	3250	1980
Tensão de de impulso negativo crítico (kV)	3380	2030

Fonte: adaptado de INMR

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as substituições das cadeias de isoladores de vidro pelas novas cadeias de isoladores poliméricos.

Figura 4.3 – Isoladores de vidro sendo retirados da linha



Fonte: INMR

Figura 4.4 – Isoladores poliméricos sendo instalados na linha de transmissão



Fonte: INMR

O resultado dessas substituições se deu devido a Linha Xingó-Angelim II passar por uma área de forte poluição natural que não suficientemente considerada durante a concepção do projeto. Assim sendo, uma combinação disso e alta umidade concentrada, resultou em altos níveis de interrupções nessa linha ao longo dos anos.

A solução aplicada pela primeira vez mostrou-se bem-sucedida e o número de interrupções diminuiu, mesmo antes da eventual substituição das cadeias de vidro temperado por um tipo polimérico compósito. Entretanto, a subsequente disseminação de interrupções com as mesmas características de outras partes da linha sugeriu que a combinação de umidade e poluição estava novamente afetando os isoladores, mas agora em locais diferentes. A conclusão lógica foi que essas falhas não haviam ocorrido antes, pois as colinas eram a parte mais fraca da linha em condições de umidade. Uma vez que os problemas nesta seção foram resolvidos,

outras fraquezas começaram a aparecer.

O Departamento de Engenharia de O&M conseguiu respaldar essa teoria, analisando dados para confirmar uma diminuição da precipitação durante a estação chuvosa, no ano imediatamente após a primeira substituição do isolador. Essa falta de chuva trouxe consigo o aumento do acúmulo de poluição nas superfícies dos isoladores de vidro, o que desencadeou *flashovers* em condições de alta umidade. Para resolver isso, considera-se a mesma solução aplicada no primeiro caso, ou seja, substituindo as cadeias de isoladores de vidro existentes por tipos poliméricos.

Por fim, com a substituição dessas cadeias de isoladores, o foco agora seria em analisar o desempenho desses novos isoladores frente as intempéries que estão sujeitos, a partir de diferentes técnicas de inspeção de linha. Essa inspeção, também beneficiaria o sistema ao descobrir o desempenho desses isoladores ao longo prazo, se ocorre a perda da hidrofobicidade ou não, por exemplo, e com isso garantir a confiabilidade e segurança da transmissão de energia para os consumidores.

4.2 IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO POR *WET SNOW* EM ISOLADORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

Dezesseis anos atrás, uma área de baixa pressão do Pacífico mudou-se do sul para o norte ao longo da costa leste da principal ilha do Japão, enquanto outra área de baixa pressão semelhante no Mar do Japão cruzava a ilha. As temperaturas ambientes na área de Niigata Kaetsu estabilizaram na faixa de 0 a 2°C com fortes chuvas e ventos, média de 26 mm e 14 m/s, respectivamente. A velocidade máxima do vento foi superior a 25 m/s. Falhas elétricas em cascata nas linhas de 66 kV e 154 kV começaram pouco antes das 09:00 e resultaram em várias linhas desarmadas. Ao mesmo tempo, algumas linhas de transmissão de 275 kV também começaram a desarmar, por conta disso, 30 linhas de transmissão e 49 circuitos foram afetados (INMR/Snow, 2022).

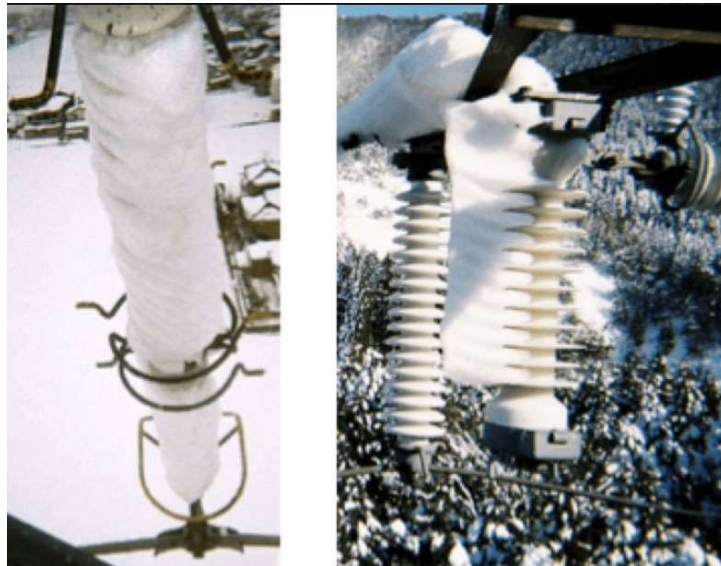
Os trabalhadores de manutenção descobriram que muitos dos isoladores de haste longa de porcelana nas linhas afetadas de 66 kV e 154 kV estavam cheios de neve molhada. A Figura 4.5 mostra o exemplo disso nas cadeias de isoladores. A forma da neve compactada nos isoladores em alguns casos era cilíndrica e em outros casos uma flâmula excêntrica na direção do vento. Essas formas de neve nas cadeias isolantes eram marcadamente diferentes daquelas que

resultam do simples acúmulo de gelo ou cobertura de neve.

Essa tempestade de neve no final de dezembro no norte do Japão, levou a uma das piores interrupções do país, afetando 650.000 residências por um período de até 31 horas. O apagão maciço foi induzido por neve molhada misturada com sal marinho que carregou os isoladores de porcelana de haste longa em linhas de 66 kV e 154 kV. O "galope" dos condutores longo das linhas de 275 kV também contribuiu para o problema, uma vez que o galope dos condutores é caracterizado pela oscilação de alta amplitude e baixa frequência de linhas elétricas aéreas devido ao vento.

Com a tempestade, a neve molhada se acumulava nos isoladores e preenchia as lacunas entre as aletas devido aos ventos fortes. Como a neve continha sal marinho, a resistência do isolamento das cadeias se deteriorou rapidamente e levou a muitos *flashovers*, mas de uma maneira diferente dos fenômenos mais conhecidos de acúmulo de gelo ou cobertura de neve em isoladores. Embora em regiões com alta incidência de neve, o acúmulo de gelo e o acúmulo de neve em isoladores já tivessem sido pesquisados pelas companhias elétricas locais, o conhecimento sobre o impacto da neve molhada contendo contaminação por sal marinho ainda era limitado por conta de sua baixa ocorrência.

Figura 4.5 – Isoladores em linhas de transmissão contaminados com neve



Fonte: INMR

Para enfrentar esse tipo de problema é preciso ter o entendimento das propriedades básicas do processo, para tal, foi realizado um teste em laboratório de inserção artificial de neve úmida para esclarecer o mecanismo de falhas causado pela neve úmida recheada com sal mari-

no. O objetivo do teste, que ocorreu em uma estação de testes de geradores eólicos em Niigata, foi avaliar as propriedades básicas de acúmulo de neve molhada em isoladores com diferentes perfis de aletas. Como a experiência com neve molhada ainda é limitada, o teste foi realizado qualitativamente.

Ambos os tipos de neve, seca e molhada, foram usados para o teste, com a diferença entre os dois consistindo apenas em seu teor de água líquida. O LWC (*Measure the Liquid Water Content of snow*) foi ajustado colocando neve natural em uma sala de teste onde a temperatura ambiente foi mantida em torno de 2 °C. Enquanto o LWC da neve natural é de cerca de 0%, o LWC após o ajuste foi de aproximadamente 5 a 8%. Os tipos de isoladores utilizados foram os isoladores de haste longa de porcelana de 66 kV, isoladores do tipo disco de porcelana (com seis discos) e um isolador polimérico de haste única, todos com especificações de operação na mesma tensão. Eles foram testados nas configurações horizontal e vertical, e suas propriedades de acúmulo de neve foram estudadas e comparadas.

A cadeia de 6 isoladores do tipo discos de porcelana montada verticalmente também foi testada (LWC 7% e densidade de volume 0,4 g/cm³). No início, a neve acumulou nas partes superiores das aletas e, finalmente, cobriu as aletas em condições de compactação. A Figura 4.6 mostra a comparação entre os discos de porcelana e o isolador de haste longa de porcelana testados ao mesmo tempo. O tempo necessário para fazer a ponte no tipo disco foi de cerca de 50 minutos, mas apenas cerca de 10 minutos para a haste longa, evidenciando a enorme desvantagem que os isoladores de porcelana de haste longa apresentam nessa condição.

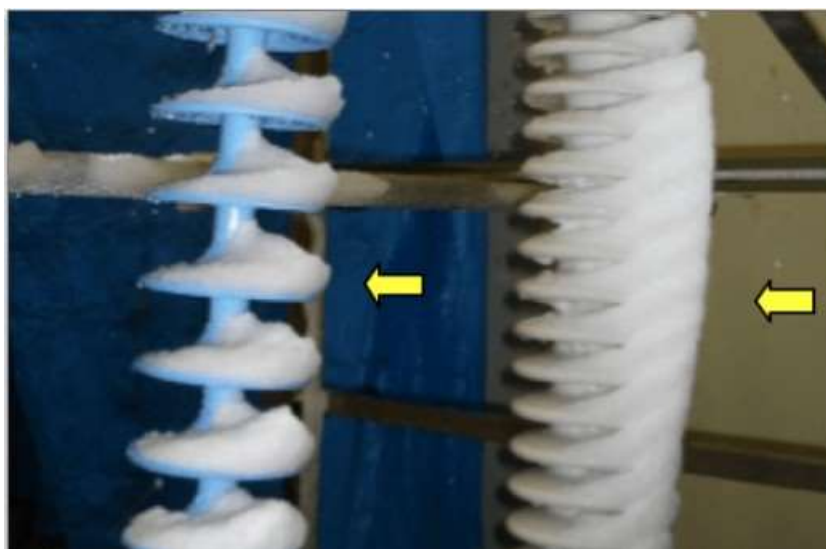
Figura 4.6 – Comparação entre isoladores tipo disco e isoladores de haste longa



Por fim, foram realizados testes envolvendo neve molhada (LWC 7% e densidade de volume $0,3 \text{ g/cm}^3$) em um isolante polimérico montado horizontalmente ao longo de 30 minutos. A neve acumulou-se primeiro na haste do núcleo e, em seguida, tornou-se gradualmente compactada, seguida pela ponte entre as aletas. No entanto, a neve tendia a ser facilmente soprada pelo vento em comparação com o isolador de haste longa de porcelana. Isso pode ser o resultado da presença de uma haste do núcleo menor para o polímero, em comparação com o isolador de haste longa de porcelana, o que resulta em uma área menor de contato entre a superfície e as partículas de neve. Como resultado, no caso de isoladores poliméricos, a forma da neve acumulada não era cilíndrica, mas sim excêntrica perpendicular ao vento.

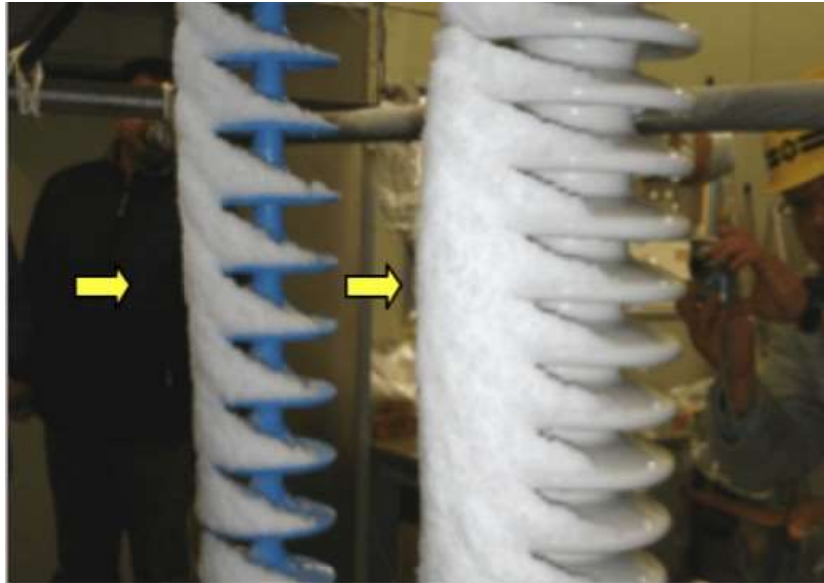
O mesmo teste com neve molhada (LWC 4% e densidade de volume $0,3 \text{ g/cm}^3$) foi então realizado para um isolador polimérico montado verticalmente por 50 minutos. Um isolador de haste longa de porcelana também foi colocado em paralelo para comparação. No início, a neve acumulou-se na parte superior das aletas, vide Figura 4.7, e finalmente, após 50 minutos, formaram-se pontes que acumularam entre elas, conforme Figura 4.8. O tempo necessário para fazer a ponte de neve no isolador polimérico foi de cerca de 20 a 30 minutos, versus cerca de 10 minutos para a haste longa de porcelana. Uma vez que o espaçamento do tipo polimérico é maior do que o da haste longa de porcelana, o tempo para ligá-lo é cerca de duas a três vezes maior.

Figura 4.7 – Isoladores polimérico e de haste longa de porcelana sob a condição de neve por 10 minutos.



Fonte: adaptado de INMR

Figura 4.8 – Isoladores polimérico e de haste longa de porcelana sob a condição de neve por 50 minutos.



Fonte: adaptado de INMR

Durante o teste, o isolante polimérico manteve alta hidrofobicidade, mas esta propriedade pareceu ter pouco efeito sobre o acúmulo de neve. A este respeito, pode-se concluir que o perfil e o tamanho das aletas parecem ser mais importantes do que o material das mesmas.

Falhas elétricas de isoladores por neve molhada com sal marinho podem ser induzidas por eventos climáticos incomuns, envolvendo uma grande quantidade de neve molhada com alta condutividade, combinada com ventos fortes. Este fenômeno é distinto do acúmulo de gelo mais comumente observado ou neve coberta em cadeias de isoladores. A neve compactada foi reproduzida em isoladores usando neve molhada (LWC de 5-8%), enquanto nenhum acréscimo de neve foi observado usando neve seca (LWC de 0%). Isso corresponde bem à experiência de serviço que indica que tais interrupções são causadas por neve compacta e molhada carregada de contaminação, como sal marinho, uma vez que a neve seca é facilmente dispersada dos isoladores pelo vento (INMR/Snow, 2022).

Por fim, é possível concluir com a análise destes experimentos que o perfil das aletas afeta as propriedades do acúmulo de neve molhada, o diâmetro mais largo e o espaçamento maior entre elas, resulta em menor quantidade de acúmulo de neve e menor possibilidade de ponte nos isoladores. Assim como, os isoladores disco de porcelana apresentaram o melhor desempenho e os isoladores poliméricos são a próxima escolha. Os isoladores de haste longa de porcelana são os mais vulneráveis à neve compactada, uma vez que a distância entre as aletas

é reduzida e a haste do núcleo é mais grossa. Assim como o acúmulo de neve entre as aletas pode ocorrer mais facilmente em isoladores de haste longa montados na vertical do que na horizontal, pois quando montados na horizontal a área de contato dos poluentes com o isolador é menor.

4.3 INFLUÊNCIA DAS FONTES DE POLUIÇÃO NO DESEMPENHO DO ISOLAMENTO ELÉTRICO

Pode-se destacar também, na construção deste trabalho que a qualidade do isolamento externo, seja em uma subestação ou em uma linha aérea, é um dos principais fatores que determinam a confiabilidade de uma rede elétrica. Nesse sentido, a escolha e o dimensionamento do isolamento adequado estão intimamente ligados ao nível e ao tipo de poluição que será experimentado pelo equipamento em qualquer local específico.

Para tanto, uma abordagem que pode ser indicada seria a de revisar mapas de poluição anteriores ou intermediários do local de interesse de estudo. A atividade elétrica na superfície de um isolador depende da natureza e do estado do depósito de poluição em sua superfície, das condições atmosféricas e também do tipo de material e perfil do isolante. Por exemplo, um depósito de poluição pode ser intrinsecamente condutor ou tornar-se condutor se for suficientemente molhado (INMR/Pollution, 2022).

Em ambos os casos, como foi dito, a criticidade da poluição superficial é influenciada pela sua quantidade ou natureza. A identificação da principal fonte ou fontes de poluição é, portanto, essencial. Além disso, como o vento é o principal vetor de poluição entre a fonte e a superfície isolante, seu impacto pode ser diferenciado conforme a escala utilizada seja local, regional, continental ou global.

Dito isso, o nível de poluição em qualquer local da rede depende da identificação de sua fonte, da natureza dos poluentes específicos, da forma como são depositados nos isoladores e da frequência de lavagem natural. Portanto, a classificação de Köppen-Geiger pode ser um bom referencial.

Basicamente a classificação de Köppen-Geiger é um código de três letras usado para identificar uma área de acordo com seu clima para qualquer ponto da Terra. Por exemplo, o clima no norte da África, é classificado como BWh, ou seja, seco, árido e quente, conforme indica a Figura 4.9. A partir dessa informação é possível direcionar efetivamente para o estudo

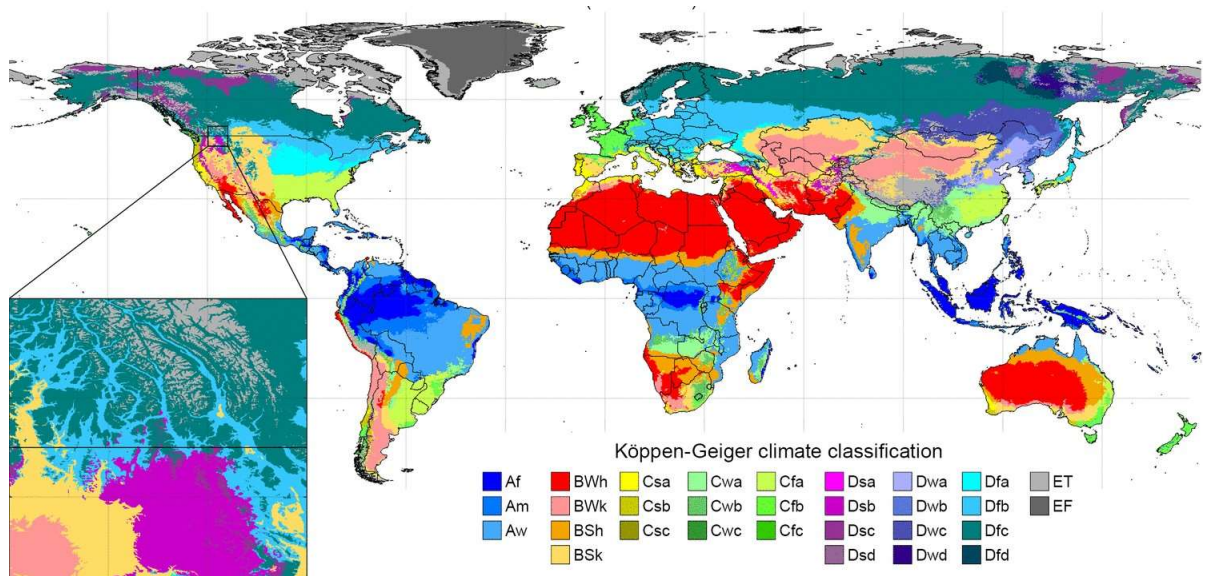
de isoladores elétricos disponíveis naquela região e que têm um bom desempenho nesse tipo de intempéries. Já a Figura 4.10 mostra a diversidade global de climas observados no planeta usando essa mesma classificação.

Figura 4.9 – Esquema de Classificação Climática de Köppen

Grupo	Subgrupo	Tipo
A - Tropical	f - Equatorial	-
	m - Monção	-
	w - Savana (chuva verão)	-
	S - Savana (chuva inverno)	-
B - Seco	W - Árido	h - Quente
		k - Frio
	S - Semiárido	h - Quente
		k - Frio
C - Temperado	f - Sem estação seca	a - Verão Quente
		b - Verão Fresco
		c - Verão Frio
	w - Inverno seco	a - Verão Quente
		b - Verão Fresco
		c - Verão Frio
s - Verão seco	a - Verão Quente	
	b - Verão Fresco	
	c - Verão Frio	
D - Continental	f - Sem estação seca	a - Verão Quente
		b - Verão Fresco
		c - Verão Frio
		d - Inverno muito frio
	w - Inverno seco	a - Verão Quente
		b - Verão Fresco
		c - Verão Frio
		d - Inverno muito frio
	s - Verão seco	a - Verão Quente
b - Verão Fresco		
c - Verão Frio		
d - Inverno muito frio		
E - Polar	F - Glacial	-
	M - Alpino	-
	T - Tundra	-

Fonte: adaptado de INMR

Figura 4.10 – Mapa do tipo climático Köppen-Geiger.



Fonte: INMR

Portanto, a obtenção de conhecimento sobre o clima fornece informações sobre a natureza, intensidade e frequência das chuvas e, dessa maneira, é valiosa para antecipar o comportamento do isolamento externo exposto à poluição. Para abordagens mais regionais e locais, a utilização de medições de estações meteorológicas permite também ter em conta as especificidades da topografia local e garantir, de forma mais precisa as intempéries em que os isoladores estarão sujeitos em um local específico (INMR/Pollution, 2022).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho visou estudar e analisar as diferentes variações de Isoladores Elétricos em operação e também presentes no mercado atual de isoladores do Sistema Elétrico de Potência. Além disto, foi também constatada através de uma extensa revisão bibliográfica, a importância que os isoladores elétricos desempenham nas linhas de transmissão de energia elétrica, uma vez que, caso a escolha do isolador seja mal feita, parte do sistema ficará comprometido, acarretando em altos custos de manutenção ou até substituição dos mesmos.

A construção deste documento também verificou a enorme evolução em que os materiais empregados como isolantes tiveram com o passar do tempo. Prova disso foi a constatação dos mais variados materiais que eram utilizados na composição dos isoladores, onde primeiramente deu-se o emprego da mica, do ebonite, da cerâmica rudimentar, e, com o surgimento de estudos e novas tecnologias, passou-se a empregar o vidro e atualmente os mais diversos tipos e combinações de materiais.

Outrossim, foi demonstrado ao longo do trabalho, uma série de vantagens e comparações dos isoladores poliméricos em relação aos isoladores de vidro e porcelana, assim como, diante de situações específicas de extrema poluição, o emprego de isoladores de vidro revestidos com silicone, o *Sedicoat*, ou isoladores de vidro com Perfil aberto se torna recomendada. Além disso, o emprego de isoladores poliméricos anti-poluição com uma grande distância de escoamento entre as aletas traz consigo grandes vantagens, como uma drástica redução do peso da cadeia, diminuição do diâmetro, uma maior resistência a impactos e a poluição.

Por outro lado, constatou-se também que isoladores poliméricos podem apresentar falhas devido a uma má fabricação, ao envelhecimento e a perda de hidrofobicidade. Assim como, existem situações pontuais onde o emprego de isoladores poliméricos pode não se tornar muito vantajosa, como em regiões com alta migração de pássaros, onde os mesmos causam danos irreversíveis aos isoladores através da bicagem e também de suas excreções corrosivas.

Os estudos de casos também permitiram verificar, em aplicações práticas e específicas, as diferenças e vantagens de alguns tipos de isoladores em relação a outros quando submetidos a condições adversas. Como por exemplo, em regiões de neve molhada com incidência de sal é preferível instalar as cadeias de isoladores na horizontal e com uma maior distância de escoamento entre as aletas dos mesmos, o que dificulta o acúmulo de neve nas cadeias.

Por fim, todos esses estudos e validações tem por objetivo fornecer energia elétrica de forma confiável, segura, com um menor número de interrupções possível aliando-se a um menor custo de transmissão e distribuição.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliações econômicas e viabilidade da substituição de cadeias de isoladores já existentes por cadeias de isoladores poliméricos modernas.
- Pesquisa em companhias elétricas, agências, órgãos públicos, universidades, centros de pesquisas, etc. sobre a existência ou inexistência de estudos comparativos entre isoladores de porcelana, vítreos e poliméricos.
- Ensaio de laboratório com isoladores de porcelana presentes em linhas locais e poliméricos para obtenção dos principais parâmetros e posterior comparação da viabilidade de substituição local.
- Estudo da relação entre o emprego de certos tipos de cadeias de isoladores com a diminuição do número de torres em linhas de transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balestro. **Isoladores Poliméricos Pilar para Redes de Distribuição IPBPL**. Balestro, 2019. Acessado em 18 de junho de 2022. Disponível em: <<https://balestro.com.br/isolador-pilar/>>.

BEZERRA, R. d. C. et al. Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da eletronorte. **apresentado no III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, Brasil**, 2010.

BONETTI, A. N. et al. Desenvolvimento de massas cerâmicas para fabricação de isoladores elétricos: propriedades mecânicas. Florianópolis, SC, 2009.

DEUTSCH, N. M. Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos. 2016.

ENERGISA/GTD-NRM/N.º27/2020. **Isolador porcelana tipo roldana**. Normas técnicas ENERGISA, 2006. Acessado em 15 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/ETU-154.1%20-%20Isolador%20porcelana%20tipo%20roldana.pdf>>.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

Gerson Tertuliano. **Isoladores de Vidro ou Porcelana - Especificação**. ENEL, 2015. Acessado em 16 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/one-hub-brasil---2018/nomas-t%C3%A9cnicas-goi%C3%A1s/normas-t%C3%A9cnicas/NTC73.pdf>>.

INMR/Pollution. **Influence of Pollution Sources on Insulation Performance**. INMRs, 2022. Acessado em 16 de agosto de 2022. Disponível em: <<https://www.inmr.com/influence-of-pollution-sources-on-insulation-performance/>>.

INMR/Snow. **Impact of Contaminated Wet Snow on Insulators**. INMRs, 2022. Acessado em 30 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www.inmr.com/impact-of-contaminated-wet-snow-on-insulators/>>.

INMR/Xingó. **Applying Composite Line Insulators Under Natural Pollution**. INMR, 2022. Acessado em 30 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www.inmr.com/applying-composite-line-insulators-under-natural-pollution/>>.

JANSSEN, F. Influência dos parâmetros de envelhecimento nas propriedades elétricas de isoladores cerâmicos para sistemas de potência. **São Cristovão: Universidade Federal de Sergipe**, 2005.

LIMA, R.; SILVA, V. H. Viabilidade técnica da substituição de isoladores de vidro por poliméricos. 2017.

LUNA, A. M. Materiais de engenharia elétrica. **Recife: do autor**, 2006.

MORA, N. D. et al. Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos. **UNIOESTE–Universidade Federal do Oeste do Paraná/Campus de Foz do Iguaçu–LAMAT–Laboratório de Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná**, 2010.

Niagara Falls to Buffalo Power Transmission. **Niagara Falls to Buffalo Power Transmission**. Niagara Power Transmission, 2006. Acessado em 21 de maio de 2022. Disponível em: <<https://www.r-infinity.com/Niagara/>>.

QUEIROZ, M.; VILAR, E.; OLIVEIRA, P. Estudo da corrosão nos componentes metálicos dos isoladores de vidro das linhas de transmissão de alta tensão. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 10095–10102, 2015.

Sediver. **Isoladores de Vidro temperado Sediver para aplicações HVAC**. SEDIVER, 2019. Acessado em 17 de junho de 2022. Disponível em: <http://www.eletromecan.com.br/eletromecan.com.br/catalogos/isoladores/vidro-temperado/ELETROMECHAN_ELECTROVIDRO_Vidro_Temperado_Brasil.pdf>.

SENSU, P.; REIS, D. F. Estudo experimental e computacional dos níveis de campo elétrico em isoladores poliméricos de 138 kv sob condições de contaminação e umidade.

NUP: 23081.087552/2022-81

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
9	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	Leonardo Vieira Ramos_TCC.pdf

Assinaturas

29/08/2022 04:03:46

MAURICIO SPERANDIO (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)

07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECAÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP



Código Verificador: 1777819

Código CRC: 36b97b9a

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

