

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**LUCAS PERES PINHEIRO MACHADO
JOÃO VITOR CARNEIRO VIECHNIEWSKI**

**CRITÉRIOS PARA ESPECIFICAÇÃO E FALHAS DE ISOLADORES ELÉTRICOS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

CURITIBA

2025

**LUCAS PERES PINHEIRO MACHADO
JOÃO VITOR CARNEIRO VIECHNIEWSKI**

**CRITÉRIOS PARA ESPECIFICAÇÃO E FALHAS DE ISOLADORES ELÉTRICOS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

***CRITERIA FOR THE SPECIFICATION AND FAILURES OF ELECTRICAL
INSULATORS IN TRANSMISSION LINES***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Andrea Lucia Costa
Coorientador: Claudio da Costa Teixeira

CURITIBA

2025



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

**LUCAS PERES PINHEIRO MACHADO
JOÃO VITOR CARNEIRO VIECHNIEWSKI**

**CRITÉRIOS PARA ESPECIFICAÇÃO E FALHAS DE ISOLADORES ELÉTRICOS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

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

Data de aprovação: 12/Dezembro/2025

Andrea Lucia Costa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nastasha Salame da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Mariano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Claudio da Costa Teixeira
Especialização
Texpi Equipamentos LTDA

**CURITIBA
2025**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à banca examinadora pela leitura atenta, pelas perguntas desafiadoras e pelas contribuições que elevaram a qualidade deste trabalho.

Expressamos nossa profunda gratidão aos nossos orientadores, Prof.^a Andrea e Eng. Claudio, pelo suporte constante, pelas orientações técnicas e metodológicas, e pela confiança ao longo de todas as etapas do desenvolvimento.

Agradecemos também a nossos amigos e família, que nos proveram de todo o apoio necessário durante nossa jornada no desenvolvimento do trabalho.

Registrarmos, ainda, nossos sinceros agradecimentos à Texpi Equipamentos pela autorização de uso de seu acervo técnico e fotográfico, sem a qual não seria possível ilustrar e sustentar diversas análises aqui apresentadas. A todos, muito obrigado pelo apoio essencial à realização deste TCC.

O mérito é compartilhado: onde há gratidão, há mais de um vencedor.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem complementar para a especificação e a gestão de isoladores em linhas de transmissão no Brasil. Inicialmente, discute-se a importância sistêmica desses componentes para a continuidade do serviço, bem como as consequências regulatórias e econômicas associadas a falhas. Em seguida, é apresentado um panorama histórico-técnico dos principais materiais empregados, porcelana, vidro e compósitos, abordando processos de fabricação, mecanismos físicos atuantes em serviço externo e suas implicações no desempenho. São analisados os modos de falha mais recorrentes em cada tecnologia e seus impactos sobre as práticas de inspeção e operação e manutenção. Por fim, o trabalho sintetiza critérios de especificação por trecho, integrando classe ambiental, fatores externos e condicionantes operacionais, além de medidas de mitigação aplicáveis ao próprio isolador, com o objetivo de apoiar decisões técnicas mais adequadas no contexto das linhas de transmissão.

Palavras-chave: *flashover*, hidrofobicidade, isolador composto, isolador de porcelana, isolador de vidro, *tracking*

ABSTRACT

This work presents a complementary approach to the specification and management of insulators in transmission lines in Brazil. Initially, it discusses the systemic importance of these components for service continuity, as well as the regulatory and economic consequences associated with failures. Next, it provides a historical and technical overview of the main materials employed - porcelain, glass, and composites - addressing manufacturing processes, physical mechanisms acting under outdoor service conditions, and their implications for performance. The most recurrent failure modes in each technology and their impacts on inspection practices and operation and maintenance are analyzed. Finally, the work synthesizes segment-based specification criteria, integrating environmental class, external factors, and operational constraints, as well as mitigation measures applicable to the insulator itself, with the aim of supporting more appropriate technical decisions in the context of transmission lines.

Keywords: *composite insulator, flashover, glass insulator, hydrophobicity, insulator, porcelain insulator, specification, tracking, transmission lines.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distância de arco a seco.....	23
Figura 2 - Distância de escoamento.....	24
Figura 3 - Desenho técnico de Isolador Composto IC0054.....	28
Figura 4 - Desempenho do SIN (número de perturbações), 2019-2023.....	35
Fotografia 1 - Isolador de vidro sob ensaio de perfuração.....	22
Fotografia 2 - Isolador em ensaio de perfuração no óleo.....	25
Fotografia 3 - Torre de suspensão.....	26
Fotografia 4 - Isoladores em ancoragem.....	27
Fotografia 5 - Isoladores de vidro em cadeias.....	31
Fotografia 6 - Isolador de Porcelana sob ensaio.....	31
Fotografia 7 - Isolador polimérico de ancoragem.....	33
Fotografia 8 - Flashover em isoladores de linha de transmissão durante arco de potência.....	36
Fotografia 9 - Isolador polimérico com erosão e trilhas de carbonização (tracking).....	37
Fotografia 10 - Ruptura mecânica do núcleo de isolador polimérico por tração.....	38
Fotografia 11 - Corrosão e desgaste em ferragem de conexão de isolador.....	39
Fotografia 12 - Superfície hidrofóbica de isolador de vidro coberto com silicone RTV.....	40
Fotografia 13 - Isoladores após realização do ensaio de arco de potência.....	41
Fotografia 14 - Instalação de aterramento com composto de grafite em solo de alta resistividade (LT Axia Energia - Eletrobras).....	45
Fotografia 15 - Colapso de torre de transmissão em área florestal.....	48
Fotografia 16 - Isolador de vidro revestido com silicone RTV vermelho para ambientes de alta poluição.....	55
Fotografia 17 - Isolador tipo disco de vidro temperado para linhas de transmissão.....	58
Fotografia 18 - Etapa de prensagem e têmpera na fabricação de isoladores de vidro.....	59
Fotografia 19 - Verificação da têmpera de isolador de vidro em polariscópio, evidenciando distribuição uniforme de tensões internas (boa têmpera).....	61
Fotografia 20 - Verificação da têmpera de isolador de vidro em polariscópio, evidenciando distribuição irregular de tensões internas (têmpera ruim).....	61
Fotografia 21 - Isolador de porcelana em ensaio de medição da distância de escoamento.....	63
Fotografia 22 - Desenho de isolador de disco em detalhe a montagem da campânula e pino.....	64
Fotografia 23 - Estudo da ação do RTV de silicone sobre camada poluente em	

superfície cerâmica.....	66
Fotografia 24 - Ensaio de tensão disruptiva em cadeia de isoladores de porcelana.....	67
Fotografia 25 - Fratura frágil em isolador polimérico observada em inspeção de campo.....	70
Fotografia 26 - Isolador polimérico após ensaio de tracking e erosão superficial.....	71
Fotografia 27 - Isolador polimérico após ensaio de aderência entre núcleo e invólucro de silicone.....	72
Fotografia 28 - Leitura de campo elétrico ao longo de isolador com defeito (ida e volta).....	73
Quadro 1 - Desempenho de isoladores por especificidade regional.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES DE MEDIDA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATH	<i>Aluminium Trihydroxide</i> (Hidróxido de Alumínio)
BIL	<i>Basic Insulation Level</i> (Nível Básico de Isolamento)
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (Investimentos de Capital)
CCT	Centro de Controle de Transmissão
EHV	<i>Extra-High Voltage</i> (Extra Alta-tensão)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPDM	Etileno Propileno Dieno Metíleno
ESDD	<i>Equivalent Salt Deposit Density</i> (Deposição Equivalente de Sal)
FT	Função de Transmissão
HTV	<i>High-Temperature Vulcanizing</i> (Silicone de Alta Temperatura)
HV	<i>High Voltage</i> (Alta Tensão)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
kHz	Quilohertz
kN	QuiloNewton
km	Quilômetro
kV	Quilovolts
LMW	<i>Low Molecular Weight</i> (Moléculas de baixo peso)
LSR	<i>Liquid Silicone Rubber</i> (Borracha de Silicone Líquida)
LT	Linha de Transmissão
NBI	Nível Básico de Isolamento
Ng	Densidade de descargas atmosféricas ao solo
NOx	Óxidos de Nitrogênio
NSDD	<i>Non-Soluble Deposit Density</i> (Densidade de Depósito Não Solúvel)
O&M	Operação e Manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i> (Cabo Pára-raios com Fibras Ópticas)

OPEX	<i>Operating Expenditure</i> (Custos Operacionais)
PD	<i>Partial Discharge</i> (Descarga Parcial)
pk	Ponto Quilométrico
PV	Parcela Variável
RAP	Receita Anual Permitida
REN	Resolução Normativa (ANEEL)
R_foot	<i>Tower-footing</i> (Resistência de Aterramento da Torre)
RIV	<i>Radio Interference Voltage</i> (Tensão de Interferência de Rádio)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (<i>Valor Eficaz</i>)
RTV	<i>Room-Temperature Vulcanizing</i> (Silicone de Cura em Temperatura Ambiente)
SIN	Sistema Interligado Nacional
SML	<i>Specified Mechanical Load</i> (Carga Mecânica Especificada)
SOx	Óxidos de Enxofre
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UV	Raios Ultravioleta
ρ	Resistividade do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Tema.....	12
1.1.1	Delimitação do tema.....	14
1.2	Problematização.....	15
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
1.4	Justificativa.....	17
1.5	Metodologia da pesquisa.....	17
1.5.1	Metodologia Aplicada.....	17
1.5.2	Revisão bibliográfica e normativa.....	18
1.6	Estrutura do trabalho.....	18
2	ISOLADORES ELÉTRICOS.....	21
2.1	Importância dos isoladores no sistema de transmissão.....	21
2.2	Características técnicas essenciais dos isoladores.....	22
2.3	Configuração dos isoladores na linhas de transmissão.....	26
2.4	Esforços Eletromecânicos Aplicados aos Isoladores.....	27
2.5	Tipos de isoladores utilizados em linhas de transmissão.....	30
2.6	Considerações Finais do Capítulo.....	33
3	FALHAS ASSOCIADAS A ISOLADORES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E IMPACTOS REGULATÓRIOS.....	34
3.1	Participação dos isoladores nas falhas de linhas de transmissão....	34
3.2	Taxonomia de falhas associadas a isoladores.....	35
3.2.1	Falhas elétricas superficiais (<i>flashover</i>).....	35
3.2.2	Falhas dielétricas internas (perfuração/ <i>puncture</i>).....	36
3.2.3	Degradação superficial/erosão e <i>tracking</i>	37
3.2.4	Falhas mecânicas/estruturais.....	37
3.2.5	Falhas de interface (hardware/acessórios).....	38
3.3	Mecanismos físico-químicos críticos que ocorrem nas falhas.....	39
3.4	Condições brasileiras que amplificam a ocorrência.....	40
3.5	Indicadores e como quantificar a criticidade dos isoladores.....	42
3.5.1	Unidades de análise recomendadas.....	42
3.5.2	Fontes de dados.....	42
3.5.3	Normalização internacional.....	42
3.6	Conexão com o impacto regulatório.....	43
3.6.1	Síntese técnica.....	44
3.7	Penalizações por indisponibilidade de linhas de transmissão: conceito e aplicação da Parcela Variável (PV).....	45
3.7.1	Enquadramento regulatório.....	45
3.7.2	Do evento ao desconto: o fluxo de apuração.....	46
3.7.3	Fatores de maior impacto na PV: tipologia, duração e relevância.....	47

3.7.4	Excludentes de responsabilidade (isenções).....	48
3.7.5	Por que isso importa para os isoladores.....	49
3.8	Cálculo da Parcela Variável (PV): passo a passo prático.....	49
3.8.1	Dados de entrada do cálculo.....	50
3.8.2	Fatores que compõem o cálculo da PV.....	50
3.9	Considerações finais do capítulo.....	51
4	CRITÉRIOS DE ESPECIFICAÇÃO DE ISOLADORES POR MATERIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO ESPECIFICIDADES REGIONAIS.....	54
4.1	Materiais de isoladores para linhas de transmissão: panorama técnico e evolução.....	54
4.2	Isoladores de vidro.....	57
4.3	Isoladores de porcelana.....	62
4.4	Isoladores compostos (poliméricos).....	68
4.5	Síntese do capítulo.....	74
5	CONCLUSÃO.....	78
5.1	Principais conclusões técnicas.....	78
5.2	Contribuições práticas.....	80
5.3	Considerações Finais.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

O setor elétrico brasileiro é um dos pilares fundamentais da infraestrutura nacional, sustentando o funcionamento da economia, dos serviços públicos essenciais e da qualidade de vida da população. Com dimensões continentais, o Brasil abriga um dos sistemas elétricos mais extensos e interligados do mundo, composto por uma ampla rede de geração, transmissão e distribuição de energia. Essa estrutura é organizada majoritariamente no chamado Sistema Interligado Nacional (SIN), que atende o consumo nacional de energia elétrica e permite a integração entre diversas fontes de geração e regiões consumidoras, promovendo maior eficiência e confiabilidade ao sistema (ABRADEE, 2023).

A matriz elétrica brasileira é marcada por um expressivo predomínio de fontes renováveis, com destaque para a energia hidrelétrica, seguida pelas fontes eólica, solar e biomassa. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), mais de 80% da eletricidade produzida no país em 2023 teve origem em fontes renováveis, contrastando com a média global, ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis. Essa característica confere ao Brasil uma vantagem estratégica não apenas em termos ambientais, mas também econômicos, visto que reduz a exposição a flutuações de preços internacionais e possibilita a exportação de tecnologias e conhecimentos associados à geração limpa e sustentável.

No entanto, a confiabilidade desse sistema não depende apenas da diversidade de fontes ou da capacidade instalada de geração. Para garantir o fornecimento contínuo e seguro de energia elétrica, é necessário que todos os componentes da cadeia, especialmente os elementos do sistema de transmissão e distribuição, funcionem de maneira coordenada e eficiente. A malha de transmissão brasileira, com mais de 170 mil quilômetros de linhas em tensão igual ou superior a 230 kV, é responsável por transportar grandes quantidades de energia entre centros de geração e centros de carga. Já a rede de distribuição, que se estende por mais de 3,9 milhões de quilômetros de redes em baixa e média tensão, é responsável por levar a energia até os consumidores finais (ABRADEE, 2023).

Essencialmente, isoladores são dispositivos utilizados para sustentar mecanicamente os condutores elétricos, ao mesmo tempo que evitam a passagem indesejada de corrente elétrica para estruturas aterradas, como torres metálicas, cruzetas e postes. Eles atuam como uma barreira dielétrica entre componentes energizados e estruturas condutoras, sendo decisivos para a operação segura de linhas de transmissão e redes de distribuição.

A função dos isoladores vai além de simplesmente isolar eletricamente: eles precisam resistir a esforços mecânicos consideráveis, oriundos do peso dos condutores, das forças do vento, da vibração, tensões térmicas e esforços eletromecânicos transitórios (como um curto-círcuito estabelecido por uma descarga atmosférica). Além disso, devem manter suas propriedades elétricas mesmo em condições ambientais adversas, como poluição, salinidade, umidade elevada, chuvas ácidas e surtos de tensão provocados por descargas atmosféricas ou manobras operacionais (Vosloo et al., 2004).

Com base na experiência profissional de um dos autores, constatou-se que falhas em isoladores podem ter consequências severas para o sistema elétrico como um todo, gerando interrupções no fornecimento de energia, com a possibilidade de causar danos aos equipamentos elétricos dos consumidores. Descargas parciais, *flashovers* (descargas elétricas superficiais), fissuras mecânicas ou degradação de materiais podem provocar desligamentos intempestivos de linhas, perda de carga, interrupções prolongadas no fornecimento e até acidentes fatais com trabalhadores ou com o público em geral. Esses eventos, além de comprometer a segurança e a confiabilidade do sistema, geram prejuízos econômicos significativos, penalidades regulatórias e danos à imagem das concessionárias responsáveis.

Com a evolução tecnológica, os isoladores passaram por diversas transformações, tanto em termos de materiais quanto em termos de design. Tradicionalmente, os isoladores de vidro e porcelana dominaram o mercado, oferecendo boa resistência mecânica e elétrica. No entanto, nas últimas décadas, os isoladores compostos, feitos de materiais poliméricos como silicone ou Etileno Propileno Dieno Metileno - *EPDM*, estão sendo cada vez mais utilizados devido ao seu menor peso, maior resistência à poluição e preços mais atrativos. Ainda assim, a seleção do tipo ideal de isolador deve considerar aspectos técnicos, ambientais,

regulatórios e econômicos, tornando a especificação um processo criterioso dentro dos projetos de engenharia elétrica.

Além da especificação, inspeções visuais, testes e uso de tecnologias avançadas, como inspeções com drones e sensores inteligentes, têm sido incorporados para garantir a confiabilidade desses dispositivos ao longo de sua vida útil.

Dessa forma, estudar os isoladores elétricos, suas características, critérios de escolha, modos de falha e práticas de manutenção é fundamental para o profissional da engenharia elétrica que atue com projetos envolvendo linhas de transmissão.

1.1.1 Delimitação do tema

Este trabalho tem como foco a análise técnica dos isoladores elétricos utilizados em linhas de transmissão de alta tensão no sistema elétrico brasileiro. A pesquisa se concentra na caracterização dos principais tipos de isoladores (de vidro, porcelana e compostos) avaliando suas propriedades dielétricas, mecânicas e ambientais, além dos critérios normativos que regem sua especificação e aplicação.

Adicionalmente, o estudo contempla as principais causas de falha, aspectos de envelhecimento e degradação dos materiais, bem como os métodos de inspeção e manutenção preventiva mais utilizados atualmente no setor. A abordagem restringe-se ao contexto das linhas de transmissão com ênfase em tensões superiores a 138 kV, excluindo aplicações específicas de isoladores em subestações ou redes de distribuição em baixa tensão.

A área geográfica considerada para análise corresponde a área coberta pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando as condições climáticas e variáveis ambientais do território brasileiro, como poluição industrial, salinidade e elevada umidade, entre outras, que afetam o desempenho dos isoladores. Não são consideradas condições climáticas de zonas temperadas, como frio extremo e neve. O recorte temporal refere-se ao estado atual da tecnologia brasileira até o ano de 2025, com base em normas técnicas vigentes, como a IEC 60815, e diretrizes adotadas por concessionárias brasileiras.

Por fim, ressalta-se que o critério proposto neste trabalho não recalcula nem altera parâmetros já definidos pelo projetista, como distância de escoamento, RIV/corona, arco a seco, níveis de impulso. A qualidade da decisão depende da disponibilidade e fidelidade dos dados locais (ESDD/NSDD ou *proxies*, histórico de vandalismo/fauna, sazonalidade, leitura de ρ). O estudo também não abrange a especificação de ferragens e acessórios, quando mencionados (p.ex., anéis/*grading*), sendo citados apenas para enquadrar o contexto do material.

1.2 Problematização

A confiabilidade do sistema elétrico brasileiro é essencial para garantir o fornecimento contínuo e seguro de energia aos diversos setores da sociedade, desde a indústria até os serviços essenciais. Nesse contexto, os componentes da infraestrutura de transmissão de energia desempenham um papel crítico, sendo que qualquer falha pode acarretar prejuízos significativos tanto do ponto de vista técnico quanto econômico e social.

O Brasil apresenta características ambientais desafiadoras, tais como elevada umidade, áreas de alta salinidade próximas ao litoral, regiões com forte poluição industrial e grande incidência de descargas atmosféricas, que comprometem o desempenho dos isoladores. De acordo com Looms, em sua obra *Insulators for High Voltages*, sob tais condições, os isoladores estão sujeitos a processos de contaminação, envelhecimento acelerado, fissuração mecânica, perda de rigidez dielétrica e ocorrência de descargas superficiais (*flashovers*). Essas falhas não apenas interrompem o fornecimento de energia, mas também podem causar acidentes e resultar em pesadas multas regulatórias associadas à parcela variável (PV) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) à concessionária que opera a linha.

Apesar da evolução tecnológica e do desenvolvimento de novos materiais e projetos construtivos, observa-se que muitas concessionárias ainda enfrentam dificuldades na seleção adequada de isoladores conforme as condições ambientais específicas de cada região. Soma-se a isso a limitação de recursos e a defasagem na implementação de métodos modernos de monitoramento e manutenção preditiva,

o que compromete a capacidade de identificar falhas incipientes e planejar intervenções corretivas com eficiência (Varli, 2025).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor diretrizes para a especificação de materiais de isoladores elétricos (porcelana, vidro e compósito) em linhas de transmissão no Brasil, visando aumentar a confiabilidade operacional e reduzir o custo de ciclo de vida, sem a necessidade de recalcular parâmetros elétricos de projeto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar os principais tipos de isoladores elétricos utilizados em linhas de transmissão (vidro, porcelana e compostos), destacando suas propriedades físicas, elétricas e mecânicas;
- Analisar os fatores ambientais que afetam o desempenho dos isoladores no Brasil, como poluição industrial, salinidade, umidade e descargas atmosféricas;
- Avaliar os modos de falha mais comuns em isoladores e seus impactos sobre o sistema de transmissão;
- Estruturar e aplicar critérios para segmentação por trechos de uma linha de transmissão, considerando conjuntamente os aspectos de classe ambiental (ESDD/NSDD ou *proxies*), vandalismo, fauna e a leitura operacional da resistividade de solo (*R_foot/back-flashover*);
- Propor boas práticas para a seleção, instalação e manutenção de isoladores elétricos, considerando custo-benefício, durabilidade e segurança operacional, incluindo mitigações no próprio isolador (RTV¹, limpeza);
- Classificar os materiais isolantes quanto ao seu desempenho dentro do contexto das especificidades regionais da linha de transmissão estudada.

¹ RTV: Silicone de cura em temperatura ambiente que aumenta o desempenho superficial do isolador contra poluição

1.4 Justificativa

A escolha do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) justifica-se pela importância crítica que os isoladores elétricos exercem no desempenho confiável das linhas de transmissão de energia elétrica. Embora frequentemente invisíveis ao olhar das concessionárias diante de ativos de maior valor, como transformadores de potência, os isoladores são vitais para a segurança, estabilidade e continuidade do fornecimento elétrico, atuando como elementos de sustentação e isolamento entre condutores energizados e estruturas aterradas.

Falhas nesses componentes podem causar desligamentos, perdas de carga, acidentes, e ainda implicar penalizações regulatórias às concessionárias, como a aplicação da PV da ANEEL, impactando diretamente os indicadores de desempenho e a receita das empresas. Um exemplo notório ocorreu no apagão de 2009, quando houve a falha de um isolador na subestação Itaberá que causou o desligamento de diversas regiões no Brasil (ONS, 2009).

Adicionalmente, com o avanço de novas tecnologias, tais como isoladores compostos, sensores inteligentes, inspeção com drones e sistemas de manutenção preditiva, abre-se um campo promissor de inovação e aplicação prática que pode contribuir para a maneira como os isoladores são geridos no Brasil.

Portanto, o desenvolvimento deste TCC representa uma oportunidade de aprofundamento técnico, alinhado com as demandas atuais do setor elétrico, e contribui para o aprimoramento do conhecimento acadêmico e profissional na área da engenharia elétrica.

1.5 Metodologia da pesquisa

1.5.1 Metodologia Aplicada

Este trabalho adota uma análise qualitativa de material técnico, com método exploratório-descritivo, fundamentado em pesquisa bibliográfica e documental, complementado por estudos de caso técnico e análise qualitativa de dados normativos e operacionais. O objetivo é compreender, sistematizar e propor boas

práticas relacionadas à especificação, desempenho e manutenção de isoladores elétricos aplicados a linhas de transmissão no contexto do sistema elétrico brasileiro.

1.5.2 Revisão bibliográfica e normativa

Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica com base em livros técnicos, artigos científicos, dissertações, manuais técnicos de fabricantes e publicações institucionais. Serão consultadas também normas técnicas nacionais e internacionais, com destaque para:

- Normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e normas internacionais;
- Regulamentos e resoluções da ANEEL, especialmente no que diz respeito à penalização por falhas (PV).
- Artigos publicados em revistas do setor elétrico.
- Livros técnicos referências no tema, como *Insulators for High Voltages* (Looms, 1988) e *The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators* (Vosloo; Macey; De Tourreil, 2004).

Essa etapa visa consolidar os fundamentos teóricos e práticos sobre os tipos de isoladores, propriedades dielétricas e mecânicas, mecanismos de falha, critérios de escolha e técnicas de manutenção.

1.6 Estrutura do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a conduzir o leitor desde os conceitos gerais sobre o sistema elétrico brasileiro até a abordagem específica e técnica dos isoladores elétricos utilizados em linhas de transmissão, sua seleção, manutenção e comportamento em diferentes condições operacionais.

No Capítulo 1, são apresentados a introdução ao tema, a delimitação do escopo, a justificativa da escolha, a problematização e os objetivos da pesquisa. Esse capítulo tem por finalidade contextualizar a importância dos isoladores dentro do sistema de transmissão nacional e estabelecer os fundamentos que nortearão a análise desenvolvida ao longo do trabalho.

O Capítulo 2 trata das características técnicas e funcionais dos isoladores elétricos, com enfoque nas propriedades mais relevantes para o desempenho em linhas de alta tensão, como distância de arco a seco, distância de escoamento, resistência mecânica e tensão de perfuração. Também são discutidos os principais tipos de isoladores aplicados a essas linhas - como discos de vidro, porcelana e isoladores compostos - bem como os fatores técnicos que influenciam sua escolha e aplicação. A seção ainda aborda os esforços elétricos e mecânicos aos quais os isoladores são submetidos, considerando aspectos normativos e operacionais.

O Capítulo 3 aborda as falhas associadas aos isoladores em linhas de transmissão e seus impactos sobre os indicadores de desempenho regulatório das concessionárias de transmissão, com ênfase na aplicação das penalizações da Parcela Variável (PV) pela ANEEL. Inicialmente, o capítulo analisa a participação dos isoladores nas interrupções e indisponibilidades de linhas, descrevendo a classificação das falhas conforme seus mecanismos predominantes - elétricos, dielétricos, mecânicos e de interface - e apresentando registros fotográficos ilustrativos. Em seguida, são discutidos os mecanismos físico-químicos responsáveis pelo envelhecimento e degradação dos isoladores sob diferentes condições ambientais e operacionais, destacando a influência da contaminação, da perda de hidrofobicidade e dos ciclos térmicos. Por fim, o texto explora o enquadramento regulatório brasileiro referente à apuração de indisponibilidades, detalhando o papel da ANEEL e do ONS nos Procedimentos de Rede e nas Resoluções Normativas que fundamentam a aplicação da PV, bem como a relevância da tipologia e duração dos eventos de falha na composição das penalizações financeiras.

O Capítulo 4 estabelece alguns critérios para especificar o material do isolador (vidro, porcelana ou compósito polimérico) por trecho de linha de transmissão, alinhando a literatura técnica com a realidade operacional brasileira. O capítulo inicia-se com um panorama histórico-técnico dos materiais e de seus

mecanismos de desempenho superficial ao ar livre (deposição, reumidificação, hidrofobicidade, envelhecimento, bio-contaminação). A seguir, é feita a análise individual dos materiais e seus aspectos: vidro (repetibilidade geométrica, auto sinalização e limites em vandalismo; uso de RTV em severos), porcelana (longevidade e robustez com detecção difícil de falhas; ganho com RTV em reumidificação), e compósitos (hidrofobicidade dinâmica, menor variabilidade em poluição/garoa, não auto sinalizam e são sensíveis a fauna que danifica aletas).

Por fim, o capítulo traduz essas propriedades para as especificidades regionais brasileiras, combinando poluição + reumidificação, vandalismo, fauna e a leitura operacional da resistividade de solo (ρ) via R_{foot} e seu efeito no risco de *back-flashover*. O resultado é um roteiro de decisão que não reabre parâmetros do projetista (distância de escoamento, RIV/corona, arco a seco), mas orienta mitigações no próprio isolador (RTV, limpeza sazona).

O Capítulo 5 conclui o trabalho demonstrando que a especificação por trecho é a forma tecnicamente correta e operacionalmente superior de definir o material do isolador no Brasil. Os critérios propostos, ancorados em dados de ESDD/NSDD ou proxies, dados sobre vandalismo, sobre a fauna e leitura operacional de R_{foot} , contribui para a tomada de decisão: menor variabilidade de corrente de fuga nos piores dias, redução de lavagens e reposições, O&M mais previsível e custo de ciclo de vida menor, sem reabrir parâmetros do projetista. Reconhecem-se limites da aplicação do critério proposto, como a incerteza e indisponibilidade de dados locais, a necessidade de inspeção diferenciada por material, entre outras limitações, mas a abordagem é reproduzível e escalável.

2. ISOLADORES ELÉTRICOS

2.1 Importância dos isoladores no sistema de transmissão

No contexto das redes de transmissão de energia elétrica, os isoladores representam componentes fundamentais para a integridade, segurança e confiabilidade do sistema. Sua principal função é proporcionar o isolamento elétrico entre os condutores energizados e as estruturas de suporte, como torres metálicas e postes, ao mesmo tempo que sustentam mecanicamente os cabos condutores sob condições ambientais e operacionais rigorosas. Em linhas de alta e extra-alta tensão, qualquer falha na função isolante pode gerar curtos-circuitos, interrupções no fornecimento e até acidentes graves, além de comprometer a estabilidade do sistema interligado nacional.

A importância dos isoladores vai além de seu papel estrutural e elétrico. Eles estão diretamente relacionados à continuidade do serviço, à segurança das instalações e à redução de perdas operacionais. Devido à sua exposição contínua às intempéries e à poluição ambiental, esses dispositivos devem ser capazes de manter suas propriedades elétricas e mecânicas mesmo sob chuva, poeira, salinidade, variações térmicas, radiação solar intensa e descargas atmosféricas. Sua falha pode causar o fenômeno conhecido como *flashover*, ou até mesmo um curto-círcito permanente.

Um isolador deve suportar diversos valores de tensão que são submetidos no sistemas de transmissão, indo muito além do nível de tensão nominal da linha. Deve suportar diversos tipos de sobretensões transitórias ou causadas por condições climáticas, como poluição ou chuva, para garantir que o sistema opere de maneira estável e com bom nível de confiabilidade.

Além disso, os isoladores precisam suportar elevados esforços mecânicos gerados pelo peso próprio dos condutores, pela tração longitudinal entre torres, pela ação do vento e pelas variações térmicas que provocam expansão e contração dos cabos. A resistência à tração, portanto, é uma exigência crítica em sua especificação, especialmente em pontos de ancoragem, onde ocorrem as maiores

tensões. A Fotografia 1 mostra um isolador tipo disco de vidro sob ensaio de perfuração para verificação de sua tensão de perfuração no ar.

Fotografia 1 - Isolador de vidro sob ensaio de perfuração



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Diante da crescente exigência por qualidade no fornecimento de energia elétrica, os isoladores também passaram a ser alvo de políticas de manutenção preditiva e preventiva, buscando antecipar falhas e maximizar sua vida útil. Sua seleção adequada, considerando não apenas o nível de tensão mas também o ambiente de instalação e os requisitos mecânicos, é uma etapa decisiva nos projetos de linhas de transmissão.

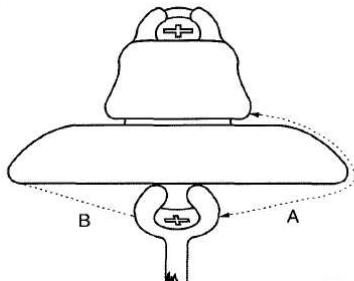
2.2 Características técnicas essenciais dos isoladores

A confiabilidade de um isolador elétrico está diretamente associada a um conjunto de características técnicas que determinam sua capacidade de suportar tensões elétricas elevadas, esforços mecânicos e condições ambientais adversas. Em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, a escolha correta do isolador deve considerar parâmetros rigorosamente definidos por normas técnicas nacionais e internacionais, de modo a garantir segurança operacional e minimizar falhas. Entre as propriedades mais relevantes, destacam-se: distância de arco a seco, distância de escoamento, classe de resistência mecânica e tensão de perfuração.

A distância de arco a seco, também chamada de distância elétrica, é a menor distância entre o condutor energizado e a parte aterrada do sistema, medida em linha reta através do ar. Essa característica é fundamental para garantir que o isolador seja capaz de suportar surtos de tensão, como os provocados por descargas atmosféricas ou manobras de chaveamento, sem que ocorra a ruptura dielétrica do ar e, consequentemente, o estabelecimento de um arco elétrico entre os eletrodos.

Quanto maior a distância de arco a seco, maior será a capacidade do isolador de resistir a sobretensões. Em linhas de transmissão de 138 kV, por exemplo, essa distância é geralmente projetada para suportar surtos de até 650 kV de NBI (Nível Básico de Isolamento). Esse parâmetro é especialmente crítico em regiões com alta incidência de descargas atmosféricas. A Figura 1 mostra um desenho de um isolador evidenciando a distância de arco a seco pelo segmento “A”.

Figura 1 - Distância de arco a seco



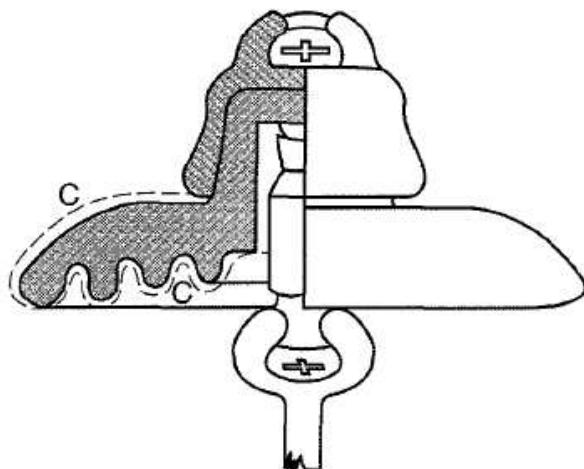
Fonte: NBR 5032 (2025)

A distância de escoamento corresponde ao percurso total ao longo da superfície isolante entre o terminal energizado e a parte aterrada. Diferente da distância de arco a seco, que considera a trajetória reta no ar, a distância de escoamento segue o contorno da superfície do isolador, sendo, portanto, diretamente influenciada pelo design geométrico (número de aletas, curvatura e comprimento da superfície externa).

Essa característica é especialmente importante em ambientes com alto grau de poluição (como áreas industriais ou litorâneas), onde há formação de filmes condutivos sobre a superfície do isolador. Uma maior distância de escoamento ajuda a evitar descargas parciais e arcos superficiais (*tracking*), garantindo o isolamento

mesmo sob condições de contaminação. A norma IEC 60815 fornece diretrizes para o dimensionamento da distância de escoamento conforme os níveis de poluição presentes na instalação. A Figura 2 mostra um desenho em corte transversal de um isolador com a distância de escoamento indicada pelo segmento “C”.

Figura 2 - Distância de escoamento



Fonte: NBR 5032 (2025)

A classe de resistência mecânica dos isoladores, frequentemente expressa em quilonewtons (kN), indica o esforço máximo que o isolador é capaz de suportar em tração, sem ruptura. Essa propriedade é essencial para garantir que o isolador suporte o peso dos condutores, as forças causadas pelo vento, o tensionamento das linhas e as oscilações térmicas que ocorrem ao longo do tempo.

Isoladores de suspensão e ancoragem, comumente utilizados em linhas de transmissão, são classificados em classes padronizadas como 120kN, 160kN, entre outras. A seleção da classe apropriada depende de variáveis como o vão entre torres, a massa dos condutores, a região climática e os fatores de segurança exigidos pela transmissora.

A tensão de perfuração representa o valor de tensão elétrica que, ao ser aplicado entre os terminais do isolador, provoca a ruptura dielétrica permanente do material isolante, criando um caminho de condução elétrica interna (perfuração).

Trata-se de uma falha catastrófica e irreversível, diferente do *flashover*, que ocorre na superfície e pode ser transitório.

Este parâmetro está diretamente relacionado à qualidade do material isolante (porcelana, vidro ou composto), sua uniformidade estrutural, ausência de bolhas internas, fissuras ou impurezas. A tensão de perfuração é geralmente determinada em laboratório, sob condições controladas, e expressa em kV, sendo superior à tensão de impulso nominal do sistema. A conformidade com esse critério assegura que o isolador pode operar com margem suficiente frente a sobretensões.

Existem duas classes de isoladores para classificação quanto a sua possibilidade de perfuração, descritas a seguir.

Classe A:

Um isolador ou unidade de isolador em que a distância de perfuração através do material isolante sólido é pelo menos igual à metade da distância de arco. Isoladores da Classe A são considerados não perfuráveis.

Classe B:

Um isolador ou unidade de isolador em que a distância de perfuração através do material isolante sólido é inferior à metade da distância de arco. Isoladores da Classe B são considerados perfuráveis. A Fotografia 2 mostra um ensaio de um isolador da classe B, no qual foi realizada verificação de sua tensão de perfuração.

Fotografia 2 - Isolador em ensaio de perfuração no óleo



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

2.3 Configuração dos isoladores na linhas de transmissão

Antes de abordar os tipos de isoladores mais utilizados em linhas de transmissão, é importante compreender as duas principais configurações de instalação em que esses componentes são aplicados: suspensão e ancoragem.

Os isoladores de suspensão são utilizados quando o condutor deve ser sustentado verticalmente abaixo da estrutura da torre. Essa configuração é comum em trechos retilíneos da linha, onde as forças atuantes são predominantemente verticais. A cadeia de isoladores é disposta como um colar, sustentando mecanicamente o condutor e garantindo o isolamento elétrico necessário. A Fotografia 3 mostra uma torre com isoladores em arranjo de suspensão.

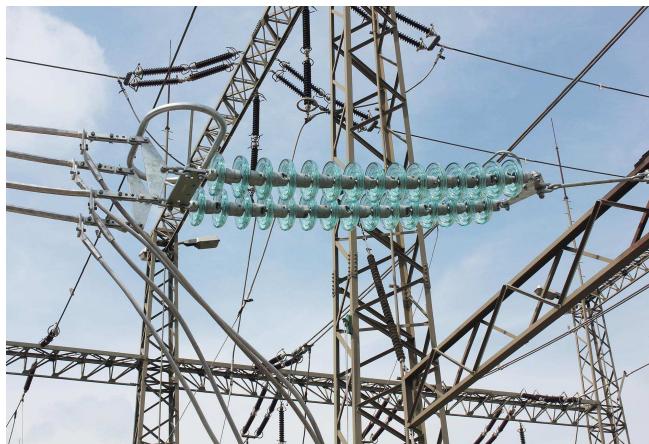
Fotografia 3 - Torre de suspensão



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Já os isoladores de ancoragem são empregados em pontos críticos da linha, como curvas, final de trechos, mudanças de nível, e em locais estabelecidos para tracionar os condutores da linha, onde há necessidade de resistir a elevados esforços de tração. Nessa configuração, os isoladores são instalados na posição horizontal ou inclinada, funcionando como elementos de retenção mecânica para os condutores. A Fotografia 4 mostra isoladores de vidro em arranjo de ancoragem.

Fotografia 4 - Isoladores em ancoragem



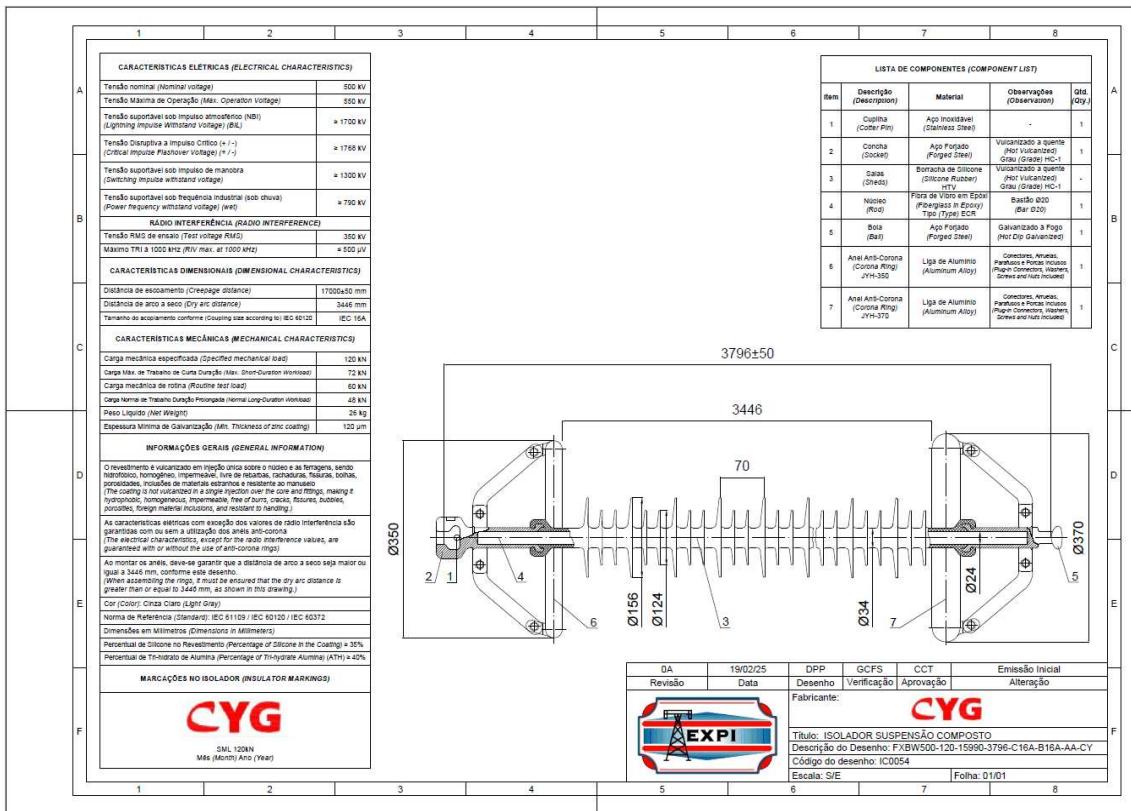
Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Ambas as configurações podem utilizar isoladores do tipo disco (vidro ou porcelana) ou compostos (poliméricos), dependendo dos requisitos técnicos e ambientais da instalação.

2.4 Esforços Eletromecânicos Aplicados aos Isoladores

Os isoladores de linhas de transmissão são constantemente submetidos a esforços combinados, de natureza elétrica e mecânica, que devem ser rigorosamente considerados no processo de especificação e validação desses componentes. A seguir, são apresentados e explicados os principais esforços, com base em dados reais do isolador composto de 500 kV modelo IC0054-FXBW500-120, conforme ficha técnica do fabricante Texpi. A Figura 3 mostra um desenho técnico de um isolador composto utilizado nas linhas de transmissão da ELETROBRAS. Os valores das tensões do isolador mostrado na figura são usados como exemplo na descrição dos esforços a seguir.

Figura 3 - Desenho técnico de Isolador Composto IC0054



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Esforços Elétricos

- **Tensão nominal (*Nominal voltage*) - 500 kV**
Representa o valor da tensão para o qual o isolador foi projetado para operar continuamente em regime normal. Ele deve manter a isolação sem gerar descargas parciais nem perdas por corrente de fuga.
 - **Tensão máxima de operação (*Max. Operating Voltage*) - 550 kV**
Corresponde ao maior valor de tensão que o isolador pode suportar em operação contínua, como em casos de sobrecarga controlada ou variações operacionais dentro dos limites do sistema.
 - **Tensão suportável sob impulso atmosférico (*NBI / BIL*) - ≥ 1700 kV** Esse é o principal parâmetro para avaliação da resistência do isolador a descargas atmosféricas (raios). A tensão de impulso é de curta duração (forma de onda típica 1,2/50 μ s) e requer alta rigidez dielétrica e distância de arco adequadas para evitar o *flashover*.
 - **Tensão disruptiva a impulso crítico (*Critical Impulse Flashover Voltage*) - ≥ 1768 kV**

Indica o valor de impulso no qual ocorre o *flashover*, ou seja, a ruptura da isolação pelo arco elétrico sem perfuração do isolador. Esse valor deve sempre estar acima do NBI, representando a margem de segurança entre o suporte e a falha.

- **Tensão suportável sob impulso de manobra (*Switching Impulse Withstand Voltage*) - ≥ 1300 kV**

Avalia a capacidade do isolador de suportar sobretensões provocadas por operações de chaveamento de equipamentos em sistemas de alta tensão. Essas tensões têm forma de onda mais lenta (30 a 250 μ s) e maior conteúdo energético que os impulsos atmosféricos.

- **Tensão suportável sob frequência industrial sob chuva (*Power frequency withstand voltage - wet*) - ≥ 790 kV**

Verifica se o isolador mantém sua função sob tensão alternada (60 Hz) durante condições adversas de umidade ou chuva. Este ensaio simula condições reais de operação prolongada em campo, sendo essencial para verificar a eficácia do isolamento superficial.

- **Tensão RMS de ensaio (*Test voltage RMS*) - 350 kV**

Tensão eficaz aplicada para ensaios de laboratório, usada para avaliar o comportamento em regimes controlados, geralmente em conjunto com testes de interferência de rádio.

- **Máximo TRI a 1000 kHz (*RIV max. at 1000 kHz*) - ≤ 500 μ V**

Mede a interferência de rádio gerada pelo isolador sob tensão alternada. Valores baixos de RIV indicam que o isolador não contribui para a emissão de ruídos eletromagnéticos indesejados no espectro de radiofrequência.

Esforços Mecânicos

- **Carga mecânica especificada (*Specified Mechanical Load - SML*) - 120 kN**
É o maior esforço de tração que o isolador pode suportar sem falha estrutural. Define a capacidade máxima de tração, usada como referência para o dimensionamento da linha.

2.5 Tipos de isoladores utilizados em linhas de transmissão

No setor de transmissão de energia elétrica, a escolha do tipo de isolador está diretamente relacionada ao nível de tensão da linha, às condições ambientais da região de instalação e aos requisitos de desempenho mecânico e elétrico do sistema. Embora existam diferentes modelos de isoladores empregados em redes elétricas, em linhas de alta e extra-alta tensão predominam três tipos principais: os isoladores tipo disco de vidro, os tipo disco de porcelana e os compostos (poliméricos), aplicados nas configurações de suspensão ou ancoragem.

Isoladores tipo disco (vidro e porcelana)

Os isoladores tipo disco são amplamente utilizados em linhas de transmissão por sua modularidade, facilidade de substituição individual e padronização construtiva. Cada disco possui dimensões, distâncias de escoamento e resistência mecânica definidas conforme normas técnicas (como a IEC 60383), e pode ser combinado em cadeias de isoladores (*strings*), formando conjuntos que atendem diferentes níveis de tensão e esforços mecânicos.

- Os isoladores de vidro temperado são conhecidos por sua alta rigidez dielétrica, resistência a impactos e comportamento favorável em inspeções visuais - uma vez que eventuais danos internos causam o esbranquiçamento do disco, facilitando a identificação de falhas. São largamente utilizados em linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), especialmente em tensões entre 138 kV a 500 kV. A Fotografia 5 mostra em detalhe isoladores de vidro em cadeias de ferragens.

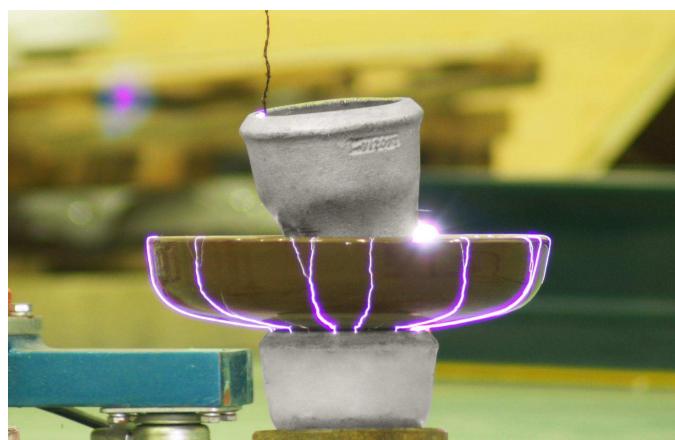
Fotografia 5 - Isoladores de vidro em cadeias



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

- Já os isoladores de porcelana vitrificada apresentam elevada resistência mecânica e estabilidade térmica, sendo tradicionalmente empregados em estruturas que exigem confiabilidade a longo prazo. Apesar de serem mais pesados e menos eficientes em inspeções visuais, continuam sendo amplamente utilizados por sua robustez e histórico comprovado de desempenho. A Fotografia 6 mostra em detalhe um isolador disco de porcelana sob ensaio.

Fotografia 6 - Isolador de Porcelana sob ensaio



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Isoladores compostos (poliméricos)

Nos últimos anos, os isoladores compostos, também chamados de isoladores poliméricos, têm sido mais utilizados em linhas de transmissão, especialmente em projetos novos ou em substituições de isoladores convencionais em ambientes agressivos. Com estrutura interna geralmente composta por núcleo de fibra de vidro e revestimento de silicone ou *EPDM*, esses isoladores oferecem vantagens significativas:

- Peso reduzido, que facilita o transporte;
- Melhor desempenho em áreas com poluição, devido à hidrofobicidade² natural dos polímeros, que dificulta a formação de caminhos condutivos;
- Boa resistência a vandalismo, pois não se fragmentam como vidro ou porcelana.

Contudo, apresentam limitações quanto à sua durabilidade em ambientes com alta radiação UV e ainda demandam cuidados na especificação e instalação, uma vez que são mais suscetíveis a danos mecânicos durante o manuseio (de acordo com manuais de instalação da Texpi). Em geral, os isoladores compostos são utilizados tanto em configurações de suspensão quanto de ancoragem, sendo uma alternativa técnica viável especialmente em regiões litorâneas, áreas industriais ou com espaço físico limitado. A Fotografia 7 mostra um isolador polimérico em arranjo de ancoragem no *Bay* de uma subestação (Varli, 2025).

² Hidrofobicidade é a capacidade da superfície do isolador de repelir a água, fazendo com que ela forme gotas em vez de um filme contínuo, o que dificulta a passagem de corrente elétrica pela superfície.

Fotografia 7 - Isolador polimérico de ancoragem



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

2.6 Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo teve como objetivo apresentar e discutir as características técnicas mais relevantes dos isoladores elétricos utilizados em linhas de transmissão, com ênfase nos aspectos que influenciam diretamente seu desempenho elétrico e mecânico. Foram abordados parâmetros fundamentais como distância de arco a seco, distância de escoamento, classe de resistência mecânica, tensão de perfuração, além dos esforços elétricos (como NBI, tensões de manobra e frequência industrial) e esforços mecânicos (como carga de ruptura) aos quais esses componentes são submetidos.

Também foram discutidos os principais tipos de isoladores aplicados em linhas de transmissão, como os tradicionais discos de vidro e porcelana, e os mais recentes isoladores compostos (poliméricos), utilizados tanto em configurações de suspensão quanto de ancoragem. Observou-se que a seleção adequada do tipo de isolador depende de uma análise integrada de fatores como nível de tensão, condições ambientais, esforços mecânicos do vão, logística de manutenção e normas técnicas aplicáveis.

A análise evidenciou que os isoladores são componentes críticos para a confiabilidade e segurança do sistema elétrico, e que sua falha pode provocar desde interrupções no fornecimento até prejuízos operacionais significativos. Portanto, conhecer suas propriedades, limites e comportamentos sob diferentes condições é fundamental para engenheiros e técnicos envolvidos com projetos, operação e manutenção de linhas de transmissão.

3. FALHAS ASSOCIADAS A ISOLADORES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E IMPACTOS REGULATÓRIOS

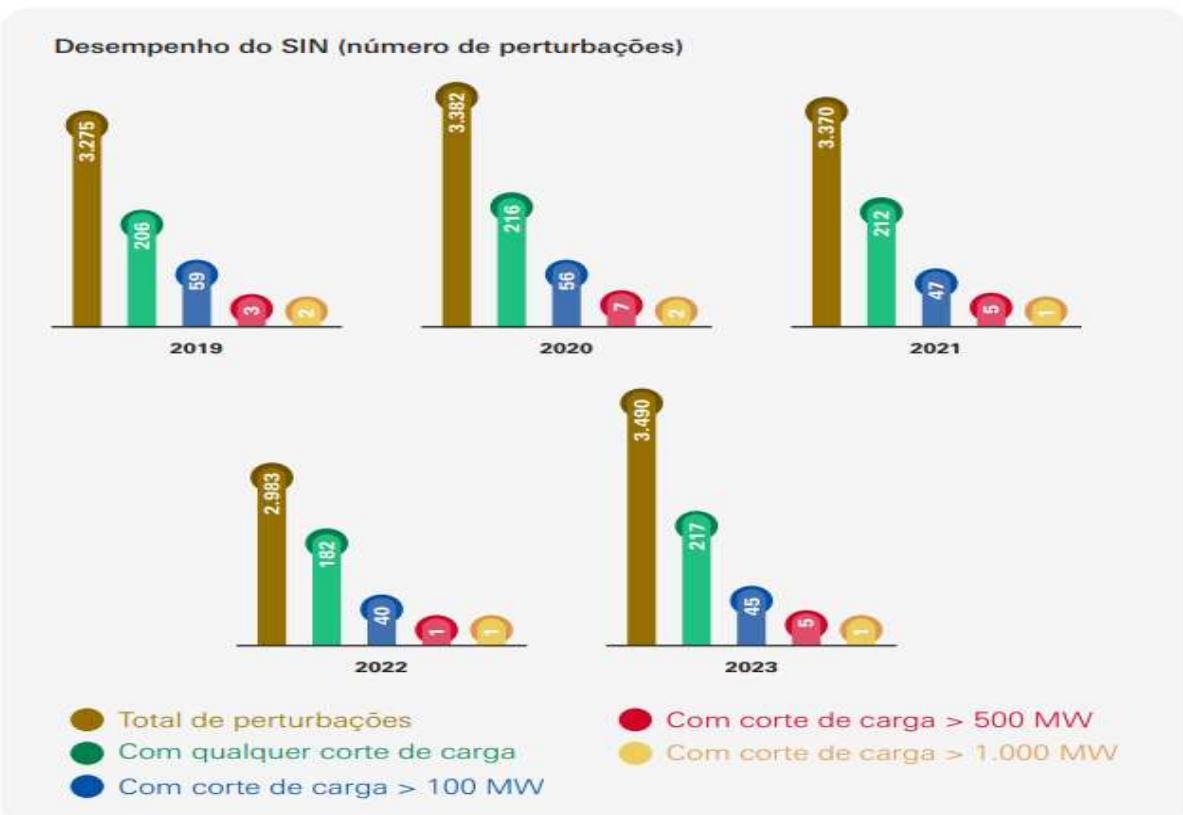
3.1 Participação dos isoladores nas falhas de linhas de transmissão

Os isoladores promovem a separação dielétrica entre os condutores energizados e as estruturas aterradas ao longo de toda a linha de transmissão (LT). Isso os torna, simultaneamente, indispensáveis e vulneráveis: estão expostos a todas as intempéries (chuva, nível de salinidade, poeira, poluição industrial), a esforços elétricos (impulsos atmosféricos, sobretensões de manobra, regime AC úmido), bem como a esforços mecânicos (tração dos cabos, vento, vibração, variações térmicas).

Pequenas degradações locais podem evoluir para *flashover*, perfuração ou ruptura mecânica, provocando desligamento intempestivo. Embora representem uma fração relativamente pequena do CAPEX³ da LT (Cigré, 2024), seu papel sistêmico faz com que falhas de isoladores interrompam a continuidade do serviço e a indisponibilidade, gerando um prejuízo financeiro muito superior ao valor do próprio isolador em si. A Figura 4 sintetiza a evolução anual das perturbações no SIN entre 2019 e 2023, destacando os subconjuntos de eventos que implicaram em cortes de carga de diferentes magnitudes. Em comparação com direta entre os custos de perturbações com o valor dos isoladores utilizados nas LTs, o custo é baixo frente ao valor de receita anual permitida (RAP) estabelecido pela ANEEL para remuneração das concessionárias de transmissão de energia elétrica e Parcelas Variáveis (PV) que as concessionárias devem pagar em caso de desligamentos não programados, reforçando a importância de especificação e O&M adequadas.

³ CAPEX são os gastos com aquisição, ampliação ou melhoria de ativos físicos de longa duração, essenciais para a infraestrutura do sistema elétrico

Figura 4 - Desempenho do SIN (número de perturbações), 2019-2023



Fonte: Relatório anual ONS (2023)

3.2 Taxonomia de falhas associadas a isoladores

Para análise estruturada, é útil classificar as falhas pelo mecanismo dominante (causas), como descrito a seguir:

3.2.1 Falhas elétricas superficiais (*flashover*)

As falhas elétricas superficiais são causadas principalmente por:

- Poluição/umidade: acúmulo de contaminantes solúveis (névoa salina, poeiras condutivas) reduz a resistência superficial; sob a umidade, as partículas

solúveis se misturaram a água e diminuem a resistência superficial dos isoladores, favorecendo descargas parciais até que ocorra o *flashover*.

- Impulso atmosférico/manobra: sobretensões com frente rápida (raio) ou lenta (manobra) excedem a coordenação de isolamento do vão; se a distância de arco a seco e o perfil não forem suficientes (ou a cadeia estiver deteriorada), ocorre a descarga. A Fotografia 8 mostra um isolador composto no momento que se estabelece o arco elétrico durante um ensaio simulando uma ocorrência real. O arco elétrico estabelece-se entre o condutor energizado e a estrutura aterrada, evidenciando a falha no isolamento.

Fotografia 8 – Flashover em isoladores de linha de transmissão durante arco de potência



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

3.2.2 Falhas dielétricas internas (perfuração/*puncture*)

As falhas dielétricas internas são causadas nas condições descritas a seguir:

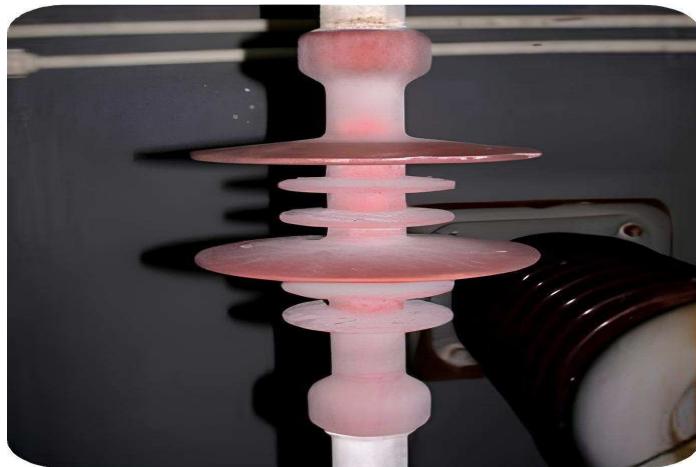
- O campo elétrico supera o limite do material sólido (vidro/porcelana/polímero), produzindo trilhas internas irreversíveis. Diferentemente do *flashover*, a perfuração é destrutiva e permanente.

- Em compósitos, caminhos condutivos podem se iniciar por defeitos internos (inclusões, vazios) ou degradação do núcleo, embora o mecanismo mais comum em campo seja superficial.

3.2.3 Degradação superficial/erosão e *tracking*

Em ambientes severos, ciclos de contaminação/auto-limpeza pela chuva e arcos repetitivos causam erosão do invólucro, perda de hidrofobicidade (no caso de polímeros), *tracking* e formação de caminhos carbonizados. A Fotografia 9 mostra um isolador polimérico com evidentes sinais de *tracking* e erosão superficial, como manchas escurecidas e trilhas na superfície das aletas, associadas à carbonização do polímero, bem como regiões opacas e desgastadas, com perda de material nas extremidades das aletas, resultantes da degradação do material sob ação combinada de poluição, umidade e arcos parciais repetitivos.

Fotografia 9 – Isolador polimérico com erosão e trilhas de carbonização (*tracking*)



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

3.2.4 Falhas mecânicas/estruturais

As falhas mecânicas ocorrem por ruptura por tração (classe mecânica inadequada, fadiga em ancoragens), corrosão em ferragens, fraturas (choques,

vandalismo), defeitos de fabricação ou montagem (torque inadequado, desalinhamentos). A Fotografia 10 mostra um isolador polimérico com ruptura completa do núcleo de fibra de vidro, caracterizando falha mecânica por tração excessiva ou fadiga estrutural, comum em pontos de ancoragem sob elevado esforço longitudinal.

Fotografia 10 – Ruptura mecânica do núcleo de isolador polimérico por tração



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

3.2.5 Falhas de interface (hardware/acessórios)

Manilhas, terminais, grampos e pinos/caps podem apresentar desgaste, corrosão, trincas ou montagem deficiente. Embora não sejam o corpo isolante, são parte do conjunto que sustenta o condutor e mantém a separação elétrica. A Fotografia 11 mostra o desgaste e a corrosão em componente metálico de fixação de isolador após ocorrência de falha, exemplificando o desgaste entre interface e o corpo isolante e o acessório mecânico, condição que pode comprometer a integridade elétrica e estrutural do conjunto.

Fotografia 11 – Corrosão e desgaste em ferragem de conexão de isolador



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

3.3 Mecanismos físico-químicos críticos que ocorrem nas falhas

Quando os isoladores falham, ocorrem mecanismos físico - químicos críticos que definem estas falhas (o chamado “como falha”). Estes mecanismos são descritos a seguir.

- Contaminação e filme condutor: partículas solúveis (sal, sulfatos, cloreto) reduzem a resistência superficial. Com umidade/chuva leve, forma-se filme condutor; a geometria das saias (ângulo de escoamento, sobreposição) e a distância de escoamento efetivo são determinantes.
- Iniciação de arcos e re-ignição: irregularidades de superfície (microfissuras, zonas ásperas), bordas e desuniformidades de campo (sem anéis anticorona adequados) favorecem ionização local; arcos de pequena extensão podem se re-ignitar até atingir toda a cadeia.
- Hidrofobicidade e recuperação (polímeros): isoladores de silicone exibem boa recuperação de sua hidrofobicidade, degradando a superfície. Sob arcos repetidos, podem perder hidrofobicidade temporariamente, recuperando-se por migração de cadeias curtas; erosão severa pode tornar a perda de hidrofobicidade permanente.

A Fotografia 12 mostra a superfície de um isolador de vidro coberto com silicone após desgaste de sua capacidade hidrofóbica em um estudo realizado na Texpi. Essa propriedade é essencial para minimizar a formação de filmes condutivos e reduzir correntes de fuga em ambientes contaminados.

Fotografia 12 – Superfície hidrofóbica de isolador de vidro coberto com silicone RTV



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

- Envelhecimento e ciclos térmicos: amplitudes térmicas, UV, ozônio e poluição promovem microfissuras e alteração de fase (em cerâmicas/vidros) e oxidação superficial (em polímeros).
- Impulsos (raio/manobra): a coordenação de isolamento exige relação coerente entre NBI, impulso de manobra e distâncias de arco a seco; em topologias com campo intensificado (extra alto tensão e ultra alta tensão), corona e RIV aumentam, antecipando *flashover*.

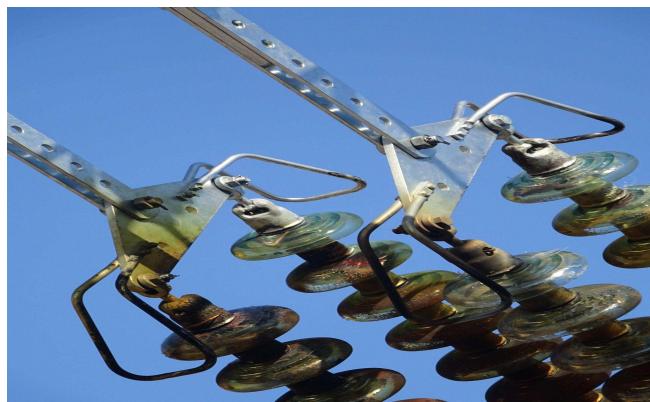
3.4 Condições brasileiras que amplificam a ocorrência

No Brasil, existem várias condições climáticas e aspectos regionais que alimentam a ocorrência de falhas em isoladores. As principais são descritas a seguir:

- Faixas litorâneas e estuários: névoa salina constante - alta ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) e NSDD (*Non-Soluble Deposit Density*).
- Cinturões industriais/agrícolas: SO₂/NO_x, poeiras alcalinas e particulados finos solúveis presentes em regiões industrializadas ou com agricultura intensiva intensificam correntes de fuga.
- Zonas de alta densidade de raios: o Brasil apresenta hotspots de descargas atmosféricas; coordenação de isolamento e blindagem por cabos pára-raios (e seus próprios isoladores em linhas com OPGW/para-raios de linha) são centrais.
- Regiões de muita umidade/chuva leve persistente: favorecem a formação de filme em vez de lavagem completa, mantendo a superfície contaminada condutiva.

A Fotografia 13 mostra cadeias de isoladores de vidro após a realização do ensaio de arco de potência, que é uma ensaio que simula a suportabilidade do arranjo na ocorrência de um curto circuito, que poderia ser provocado por um raio ou sobretensão, onde o mesmo deve suportar o curto sem que haja a falha mecânica do arranjo.

Fotografia 13 – Isoladores após realização do ensaio de arco de potência



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

3.5 Indicadores e como quantificar a criticidade dos isoladores

3.5.1 Unidades de análise recomendadas

A fim de recomendar que seja montado um banco de dados para indicar o desempenho da linha, alguns indicadores podem ser usados para classificar a criticidade dos isoladores, ou o risco da ocorrência de falhas nestes componentes:

- Taxa de desligamentos por 100 km·ano (nível da linha) e/ou por 100 “string·ano” (nível da cadeia de isoladores);
- MTBF (*Mean Time Between Failure*): Tempo médio entre falhas de cadeias em ambientes distintos;
- Distribuição por causa-raiz: *flashover* por poluição, impulso atmosférico, manobra, defeito/montagem, ruptura mecânica, vandalismo/ato intencional.

3.5.2 Fontes de dados

Os indicadores descritos acima são calculados a partir de algumas fontes de dados, conforme as descritas a seguir:

- Registros de perturbação e indisponibilidade (boletins do operador do sistema e dos CCTs regionais);
- Relatórios técnicos de concessionárias e literatura (Cigré, artigos acadêmicos, manuais de fabricantes);
- Campanhas de medição (corrente de fuga, RIV, termovisão, inspeção por drone, medição de campo elétrico) - quando disponíveis como dados secundários.

3.5.3 Normalização internacional

Algumas normas, como a DLT 626/2015 (norma chinesa para análise da vida útil de isoladores), estabelecem alguns critérios para identificar o risco de falhas em isoladores, tais como:

a) Vidro temperado:

- Auto sinalização por “*shattering*”: porcentagem/contagem de discos estilhaçados na cadeia e padrão de fratura (indicativo de fim de vida da peça);
- Integridade do casquete/pino e cimento: folgas, corrosão, giro, deslocamento; verificação visual e por ensaios não destrutivos simples (p.ex., martelo de som);
- Corrosão sob o metal/vidro e micro fissuras visíveis a olho/óptica.

b) Porcelana:

- Esmalte e corpo cerâmico: micro fissuras/craquelê, lascas, “cicatrizes” de descarga; avaliação por inspeção visual junto com teste de som;
- Interface casquete-pino-cimento: corrosão, rachaduras do cimento, folgas; sinais de possível *puncture* (escurecimento, marca de arco);
- Corona/UV em arestas e hardware adjacente (como *proxy* de estresse superficial).

c) Compósitos:

- Hidrofobicidade superficial (grau): leitura visual padronizada (classe/nível), indicação indireta da estabilidade de corrente de fuga;
- *Tracking/Erosion/Chalking*: trilhas condutivas, erosão de *sheds*, Descargas “empoeiram/chalk” (giz), cortes, mordidas/roeduras e perdas de aletas; integridade da vedação nas extremidades;
- em terminais/vedações: corona/UV persistente em regiões de selagem/*end-fittings*.

3.6 Conexão com o impacto regulatório

Cada desligamento intempestivo associado a falha de isolador cadeia ou conjunto, gera uma indisponibilidade e aciona a Parcela Variável (PV), reduzindo a Receita Anual Permitida (RAP) da transmissora. Para tentar minimizar a perda de receita, um caminho é adotar procedimentos técnicos com o objetivo de minimizar as

falhas em isoladores. Alguns procedimentos que podem ser adotados são descritos a seguir.

- Projeto/Especificação (coordenação de isolamento coerente com NBI/impulso de manobra, distância de escoamento dimensionada ao nível de poluição, classe mecânica adequada ao vão e ao vento, uso correto de anéis anticorona, tipo de isolador e material isolante a ser aplicado) reduzindo a probabilidade de falha;
- O&M baseado em risco (inspeção direcionada por severidade ambiental e idade, lavagem seletiva, monitoramento de corrente de fuga/RIV, substituição pró-ativa de cadeias críticas), diminuindo eventos e exposição à PV.
- Realização de ensaios no arranjo completo, preferencialmente ensaios disruptivos, que determinam as tensões máximas que o arranjo suporta antes da ocorrência do *flashover* (tensão disruptiva sob impulso atmosférico por exemplo). E o ensaio de arco de potência, que testa a capacidade do arranjo suportar um curto circuito sem que ocorra o rompimento mecânico.

3.6.1 Síntese técnica

Isoladores são elementos críticos: correspondem a uma pequena fatia de investimento, mas têm um grande impacto na continuidade.

Os mecanismos de falha mais relevantes, que ocorrem com maior frequência, são *flashover* por poluição/umidade e solicitações de impulso (raio/manobra) sobre cadeias com coordenação/estado inadequados.

As condições ambientais de muitas regiões brasileiras potencializam esses mecanismos, tais como salinidade, poluição, umidade, raios, além da alta resistividade do solo, que prejudica a resistência de aterramento da estrutura (Yadee, P, 2007). A Fotografia 14 ilustra uma etapa prática de instalação de aterramento em linha de transmissão, empregando compostos de grafite em solo de alta resistividade. Esta técnica é comumente adotada para reduzir o potencial de falha associado à elevada impedância de terra das estruturas.

Fotografia 14 - Instalação de aterramento com composto de grafite em solo de alta resistividade (LT Axia Energia - Eletrobras).



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025).

A boa engenharia de especificação e a manutenção orientada por risco são as alavancas técnicas para reduzir a indisponibilidade e perdas de receitas devido à PV.

3.7 Penalizações por indisponibilidade de linhas de transmissão: conceito e aplicação da Parcela Variável (PV)

3.7.1 Enquadramento regulatório

No modelo brasileiro de transmissão, a qualidade do serviço é assegurada por um sistema de incentivos e penalidades que impacta diretamente a Receita Anual Permitida (RAP) dos agentes. O pilar desse mecanismo são as Parcelas Variáveis (PV), que descontam (ou, em casos específicos, adicionam) valores à receita do transmissor de acordo com o desempenho de disponibilidade das suas Funções Transmissão (FT). A metodologia operacional é detalhada nos Procedimentos de Rede do ONS, especialmente no Submódulo 15.12 (apuração

mensal das PV) e no Submódulo 15.6 (apuração das indisponibilidades/restricções), formando o encadeamento: evento > apuração > desconto na RAP (ANEEL, 2016).

Em termos práticos, interessam aqui dois tipos de penalidades:

- **PVI - Parcela Variável por Indisponibilidade:** aplicada quando há indisponibilidade (desligamento) de uma FT de transmissão. É a penalidade mais comum para LTs fora de serviço, seja por desligamento programado (com pesos próprios) ou intempestivo (maior gravidade). A REN 729/2016 acolhe a PVI como instrumento para induzir disponibilidade e disciplina o seu uso no âmbito contratual-regulatório.
- **PVRO - Parcela Variável por Restrição Operativa:** aplicada quando a FT permanece disponível, porém com capacidade reduzida (ex.: operação com limitação térmica/estática que restringe a transferência). A REN 729/2016 e o submódulo 15.12 do ONS definem o conceito e a forma de apuração, inclusive as situações em que a restrição deve ser tratada como 100% (ex.: risco de queimada/florestal que inviabiliza o uso efetivo).

3.7.2 Do evento ao desconto: o fluxo de apuração

O processo segue três blocos (com interfaces bem definidas nos Procedimentos de Rede):

1. Apuração da indisponibilidade/restricção (Submódulo 15.6)

O ONS identifica, qualifica e registra cada evento por FT: data/hora, duração, tipologia (programado ou intempestivo), motivação/causa, e se é indisponibilidade (candidato a PVI) ou restrição operativa (candidato a PVRO). Esse registro é padronizado e alimenta a etapa seguinte.

2. Cálculo e consolidação das PV (Submódulo 15.12)

Com o fechamento dos eventos do mês, o ONS aplica os critérios de ponderação (pesos por tipo de evento, janelas de referência, limites regulatórios) e

consolida os valores mensais de PVI/PVRO por concessionária. Os demonstrativos são disponibilizados aos agentes para verificação da consistência e análise.

O submódulo 15.12 explicita que a PVI é o valor mensal a ser descontado da RAP em virtude do conjunto de desligamentos apurados nas instalações do agente. O documento também trata da comunicação à fiscalização da ANEEL quando limites de desconto são atingidos ou ultrapassados.

3. Efetivação sobre a RAP

Após a consolidação e eventuais ajustes, o valor de PV incide sobre a RAP mensal da transmissora. O Submódulo 15.12 ainda contempla a lógica do adicional financeiro (bônus) por desempenho de disponibilidade, apurado anualmente, que usa a PVI como referência (em regra para concessões com diretrizes específicas).

3.7.3 Fatores de maior impacto na PV: tipologia, duração e relevância

Ainda que o valor final da PVI/PVRO dependa das fórmulas/ponderações do submódulo 15.12, três aspectos orientam a engenharia e a operação:

- Tipologia do desligamento: eventos intempestivos tendem a ser mais gravosos que programados, em razão do impacto sistêmico e da menor previsibilidade. A Fotografia 15 mostra o colapso estrutural de uma torre de transmissão em área de floresta, evento que caracteriza desligamento intempestivo de alta gravidade e impacto direto nos indicadores de disponibilidade e na apuração da Parcela Variável (PV).

Fotografia 15 – Colapso de torre de transmissão em área florestal



Fonte: G1 (2025)

- Duração/recorrência: tempo fora de serviço e repetição de eventos no período elevam a PVI consolidada do mês.
- Relevância sistêmica: FTs mais críticas (topologia/fluxo de potência) exercem maior impacto sobre os efeitos operativos mais nos efeitos operativos; certas condições, por exemplo, risco de incêndio ou queimada, podem levar a ponderações extremas (100% na PVRO) quando inviabilizam o uso efetivo, por determinação da REN 729/2016 (ANEEL, 2016).

Para o gestor de ativos e para a engenharia de especificação/manutenção de isoladores, isso se traduz em prioridade de prevenção de eventos intempestivos (*flashover*, perfuração, ruptura de conjunto) e em controle de duração de recomposição, dois determinantes diretos do valor de PVI.

3.7.4 Excludentes de responsabilidade (isenções)

A depender das circunstâncias do evento e da prova técnica, a ANEEL pode afastar a PVI ao reconhecer excludentes (caso fortuito/força maior). Em 2022, por exemplo, a Diretoria reconheceu, por unanimidade, excludentes em casos de sabotagem e queda de balão tripulado em ativos de transmissão - decisões que ficaram conhecidas no setor e foram objeto de análises técnicas e jurídicas. O corolário prático é: nem toda indisponibilidade gera PVI, mas a exceção precisa estar muito bem caracterizada nos autos (Valle et al., 2022).

Além disso, votos recentes mostram o tratamento caso a caso: por exemplo, LT 500 kV Itatiba–Bateias C-1 (desligamento intempestivo, com discussão sobre sabotagem) e LT 440 kV Assis–Sumaré (serragem/ruptura de manilha de sustentação de isolador), em que a ANEEL avaliou nexo causal, culpa, diligência na manutenção e cabimento/afastamento da PVI. Tais decisões são úteis para exemplificar a aplicação prática da PV e a interface com falhas do conjunto de isolação (ANEEL, 2022).

3.7.5 Por que isso importa para os isoladores

Existe uma relação, inversamente proporcional, entre o valor da PV e a eficiência da coordenação do isolamento da linha: cada hora de LT indisponível por *flashover*, perfuração ou ruptura de componentes do conjunto de isolação (cadeias, ferragens, manilhas) é receita não recebida via PVI. Logo, a especificação correta , por meio da coordenação de isolamento/NBI, distância de escoamento conforme IEC 60815, perfil de *sheds*, classe mecânica adequada, anéis anticorona e materiais escolhidos conforme as especificidade regionais; e práticas de O&M baseadas em severidade ambiental (lavagem seletiva, inspeção por drone/termovisão, controle de RIV/corrente de fuga, substituição pró-ativa, inspeção por leitura de distribuição de campo elétrico ao longo do isolador) são ferramentas técnicas de mitigação de PV. Esta premissa, adotada neste TCC, é explicada melhor nas próximas seções.

3.8 Cálculo da Parcela Variável (PV): passo a passo prático

A Parcela Variável é o mecanismo que desconta parte da RAP/Pagamento-Base (PB) do transmissor quando há indisponibilidade ou restrição operativa das Funções de Transmissão (FT). As definições de PVI e PVRO estão na REN ANEEL nº 729/2016. O procedimento de cálculo mensal é descrito pelo ONS no Submódulo 15.12 dos Procedimentos de Rede, alimentado pelos registros de eventos conforme o Submódulo 15.6. A seguir tem-se uma descrição desta terminologia-chave para sistemas de transmissão:

PVI: parcela variável por indisponibilidade (desligamentos programados ou intempestivos);

PVRO: parcela variável por restrição operativa (redução de capacidade).

3.8.1 Dados de entrada do cálculo

Os dados de entrada para o cálculo da Parcela Variável (PV) são descritos a seguir:

- RAP/Pagamento-Base (PB) da FT - valor homologado para a instalação (ou função) no ciclo tarifário vigente, base sobre a qual incide o desconto. (ONS, submódulo 15.12, Introdução).
- Eventos do mês, por FT - obtidos da apuração de indisponibilidades e restrições (ONS, 2017, Submódulo 15.6), com tipo (programado ou outros/intempestivo), data/hora, duração, causa e classificação (indisponível × restrita).
- Parâmetros/ponderações do submódulo 15.12 - pesos, regras de agregação e limites de desconto para consolidação mensal e para a janela móvel de 12 meses. (ONS, 2020, Submódulo 15.12).

3.8.2 Fatores que compõem o cálculo da PV

Com base nesses dados de entrada, é possível quantificar o custo de uma falha em uma linha de transmissão, e dessa forma, ter o conhecimento do impacto que ele exerce sobre a receita da LT. O cálculo da Parcela Variável (PV) é realizado em etapas sucessivas pelo ONS, que qualifica os eventos, aplica as fórmulas do Submódulo 15.12, consolida os resultados por FT e agente e verifica os limites regulatórios de desconto. Em termos práticos, os principais fatores que compõem esse cálculo são:

- Apuração do evento (15.6) - o ONS qualifica cada ocorrência: indisponibilidade (candidata a PVI) ou restrição (candidata a PVRO), regista

duração e tipologia (programado/intempestivo) que afetam a ponderação posterior.

- Cálculo da parcela por evento (15.12) - o ONS aplica a fórmula e os fatores previstos ao evento apurado, gerando um desconto elementar referente àquela FT naquele mês. O 15.12 explicita que a PVI é o valor mensal a ser descontado da RAP “em virtude de um conjunto de desligamentos apurados” nas instalações do agente. (ver redações 2010/2017/2019).
- Consolidação mensal por FT e por agente - somam-se os valores de PVI e PVRO dos eventos do mês (por FT), obtendo-se a PV total mensal do agente e o demonstrativo (que é disponibilizado aos agentes para análise/consistência). (15.12, seções de processo).
- Verificação de limites (“cap”) regulatórios - versões do 15.12 preveem limites ao desconto acumulado (p.ex., 25% do somatório dos PB da FT na janela contínua de 12 meses – redação 2017.09). Ou seja, ainda que haja muitos eventos, o desconto acumulado naquela janela não ultrapassa o cap. (Conferir a versão vigente para redação exata do limite).
- Aplicação na RAP mensal - o valor final de PV (PVI + PVRO) é então abatido da RAP/PB do mês de competência. (15.12).

3.9 Considerações finais do capítulo

Este capítulo demonstrou, sob três ângulos complementares - engenharia de ativos, regulação econômica e evidências documentais -, por que isoladores e seu conjunto de ferragens/acessórios figuram entre os principais determinantes de indisponibilidade de linhas de transmissão e, portanto, de exposição financeira via Parcela Variável (PV). Partimos do pano de fundo técnico, mostrando os mecanismos de falha mais recorrentes (*flashover* por poluição/umidade, sobretensões de impulso, degradação superficial, perfuração, ruptura mecânica e falhas de interface), e relacionamos esses mecanismos a condições brasileiras que os potencializam (salinidade litorânea, poluição industrial solúvel, períodos de chuva leve persistente, alta densidade de raios, vôos longos e ambientes de difícil acesso). A conclusão prática é inequívoca: isoladores têm baixo peso no CAPEX, mas

altíssimo efeito no OPEX e no risco de PV quando a especificação, o ambiente e a O&M não estão harmonizados.

No eixo regulatório, explicitamos que a PV - em especial a PVI (Parcela Variável por Indisponibilidade) - é um desconto mensal aplicado à RAP conforme as indisponibilidades apuradas pelos Procedimentos de Rede do ONS, com regras de classificação, ponderação e consolidação. Mostramos ainda que tipologia (intempestivo × programado), duração e relevância operativa são variáveis que têm maior impacto no valor final, e que existem excludentes de responsabilidade (p. ex., sabotagem/força maior) analisados caso a caso pela ANEEL. Esse enquadramento torna clara a ponte entre decisões de engenharia e desfecho econômico-regulatório: cada hora adicional de LT indisponível por evento ligado ao conjunto de isolação é receita não recebida.

Do ponto de vista metodológico, o capítulo também deixou um roteiro replicável: (a) codificar eventos por causa-raiz (isolador, ferragens, externo), (b) relacionar cada evento a suas variáveis de contexto (classe de poluição, regime de umidade, Ng, altitude, geometrias, anéis anticorona, plano de lavagem, tempo de recomposição), e (c) vincular essa base ao demonstrativo mensal de PV. Esse encadeamento de dados permite medir a contribuição dos isoladores para a indisponibilidade, priorizar intervenções e simular a redução potencial de PV quando se altera o “mix” de material, perfil e O&M. Tal abordagem apoia tanto decisões de retrofit (troca dirigida de cadeias e ferragens) quanto de projeto (coordenação de isolamento e seleção do material por trecho).

Há, contudo, limitações e incertezas a reconhecer: (i) a heterogeneidade da frota (idade, materiais, perfis) dificulta generalizações; (ii) a escassez ou desatualização de ESDD/NSDD em muitos trechos faz com que *proxies* ambientais precisem de fatores de segurança; (iii) mudanças de uso do solo (novas fontes de poeira/indústria) e climatologia (variações na sazonalidade de chuva leve/neblina) exigem revisões periódicas de classificação; e (iv) a dinâmica de resposta operacional (acesso, janela de manutenção, logística de lavagem) pode superar a qualidade do projeto—ou, ao contrário, anulá-la, se mal executada. Essas limitações não invalidam o método; apenas indicam a necessidade de ciclos de realimentação (medir–aprender–ajustar).

Com isso, este capítulo cumpre seu papel de quantificar e qualificar o problema (falhas associadas a isoladores) e de traduzir suas consequências em impacto financeiro regulatório (PV), além de propor uma agenda de mitigação baseada em engenharia e dados.

4. CRITÉRIOS DE ESPECIFICAÇÃO DE ISOLADORES POR MATERIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO ESPECIFICIDADES REGIONAIS

4.1 Materiais de isoladores para linhas de transmissão: panorama técnico e evolução

Por mais de um século, os isoladores de porcelana foram maioria em linhas de transmissão e distribuição por combinarem corpo cerâmico vitrificado, esmalte estável e vida útil longa. A maturidade de fabricação, a padronização dimensional e a cadeia de suprimentos difundida explicam essa permanência. Com o avanço do controle de porosidade, da homogeneidade de queima e das geometrias de saias, a porcelana consolidou-se como sinônimo de robustez mecânica e estabilidade térmica. Porém, as qualidades da porcelana também trazem algumas desvantagens, como hidrofobicidade intrinsecamente baixa (a superfície tende a formar filme em reumidificação) e falhas difíceis de diagnosticar sem técnicas de inspeção direcionadas, aspecto relevante na operação, porque a falha raramente é identificada visualmente. Em ambientes de poluição severa e garoa ou neblina frequentes, a aplicação de revestimento RTV de silicone tornou-se prática recorrente para elevar o desempenho superficial sem alterar parâmetros de projeto já definidos (Looms, 2018). A Fotografia 16 ilustra um isolador de vidro revestido com silicone RTV na cor vermelha, empregado como solução de melhoria superficial em regiões de elevada poluição e umidade, visando aumentar a resistência ao escoamento e reduzir ocorrências de *flashover*.

Fotografia 16 – Isolador de vidro revestido com silicone RTV vermelho para ambientes de alta poluição



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

O vidro temperado tornou-se mais popular a partir do pós-guerra, ao oferecer repetibilidade geométrica, superfície lisa e um diferencial operacional que moldou as rotinas de manutenção: a auto sinalização. Quando ocorre dano crítico, o disco fragmenta e a deficiência fica imediatamente evidente, permitindo uma resposta rápida no campo e evitando longos períodos de operação com defeito “silencioso”. A qualidade industrial evoluiu muito (controle de inclusões, têmpera uniforme), mas permanecem duas vulnerabilidades estratégicas: o vidro possui baixa hidrofobicidade (mitigável com RTV em trechos severos) e sensibilidade a impacto intencional. Em regiões com vandalismo elevado, o vidro tende a se tornar a pior escolha por essa razão, mesmo que seu desempenho elétrico intrínseco seja adequado (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004).

Os compostos poliméricos (núcleo de fibra de vidro com invólucro de silicone/EPDM) vieram nos anos 1970–80 e se disseminaram fortemente nas últimas duas décadas. O que os torna competitivos é a hidrofobicidade elevada e dinâmica (recuperação de hidrofobicidade), o baixo peso que facilita seu transporte, a instalação e a substituição, e o bom comportamento em cenários de reumidificação e poluição. As gerações mais recentes de isoladores poliméricos melhoraram a resistência a UV/ozônio, a vedação de terminais e a qualidade das interfaces, que eram pontos tradicionais de atenção técnica. Ainda assim, há dois alertas de campo

que não podem ser ignorados: (i) falha não auto sinalizante, exigindo critérios de inspeção claros (visual criteriosa, registros de corrente de fuga, inspeção UV/corona quando aplicável e inspeção por meio de scanner de campo eletromagnético), e (ii) sensibilidade a fauna em corredores com aves migratórias: dejetos criam ilhas condutivas e certas espécies “roem”/danificam aletas, reduzindo localmente o escoamento efetivo e acelerando erosão por arco. Por outro lado, quando a principal causa de falha é apenas vandalismo, o composto polimérico costuma ser mais favorável que a porcelana, por apresentar menor fragilidade e logística de reposição mais simples (Vosloo et al., 2004).

Do ponto de vista físico, todos os materiais se submetem ao mesmo roteiro ambiental: deposição (ESDD/NSDD) associada a reumidificação (garoa, neblina, chuvas leves) gera um aumento da condutividade do filme superficial que tem como consequência correntes de fuga e risco de eventos superficiais. A diferença está em como cada superfície responde a essa sequência de eventos. O silicone mantém gotas e trilhas descontínuas por hidrofobicidade, quebrando caminhos de condução. O vidro e a porcelana são hidrofílicos e tendem a formar um filme contínuo, por isso o valor do RTV é alto nesses dois materiais quando o trecho é severo. Fatores lentos, como UV/ozônio (envelhecimento do polímero), abrasão e ataque químico (chuva ácida/industrial), também modulam o desempenho a longo prazo. A bio-contaminação de aves e morcegos adiciona um mecanismo próprio nestes locais: reumidificação localizada persistente e deposição assimétrica, que cobra do material capacidade de drenagem, autolimpeza e integridade geométrica das saias dos isoladores.

Considerando a ótica da manutenção, as diferenças práticas ficam claras. Porcelana e vidro exibem histórico de vida útil longa e ampla intercambialidade no mercado brasileiro. O vidro facilita a inspeção quando falha. Já a porcelana é confiável, mas é difícil de diagnosticar sem uma rotina de supervisão específica. O composto é leve e simples de transportar e instalar, frequentemente exigindo menos lavagem em poluição clássica, mas pedindo atenção à fauna, flora e a procedimentos de inspeção que capturem envelhecimento superficial e defeitos de interface. No aspecto ambiental, o composto se destaca em hidrofobicidade, resistência à poluição e autolimpeza; o vidro tem superfície lisa e boa autolimpeza, porém hidrofobicidade baixa; a porcelana oferece boa resistência a UV e

estabilidade térmica, mas depende mais de RTV quando a reumidificação é frequente, devido a característica hidrofóbica do composto de revestimento aumentar seu desempenho em regiões com essas características (Vosloo et al., 2004).

4.2 Isoladores de vidro

O uso de vidro em isoladores externos nasceu junto com a própria expansão das redes aéreas. Os primeiros isoladores de vidro, ainda maciços, para redes de distribuição, aparecem no fim do século XIX. O seu uso para a transmissão veio no pós-guerra, quando o disco de vidro temperado se consolidou como alternativa à porcelana nas tensões altas e extra-altas. A combinação de temperatura de fusão industrialmente acessível, moldagem por prensagem e têmpera controlada permitiu fabricar discos com geometria muito repetível e superfície excepcionalmente lisa, duas qualidades que a literatura técnica destaca como responsáveis pela previsibilidade elétrica e pela facilidade de manutenção em campo. Mas a principal razão da popularização do vidro foi a auto sinalização: em um dano crítico, o vidro temperado fragmenta de modo característico, tornando a falha imediatamente visível durante inspeções de rotina. Esse aspecto moldou décadas de práticas de O&M por inspeção visual, reduzindo a chance de operação prolongada com defeitos “silenciosos”. A Fotografia 17 apresenta um isolador tipo disco de vidro temperado, amplamente utilizado em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, cuja geometria e superfície lisa garantem desempenho elétrico previsível e fácil detecção de falhas por fragmentação característica (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004).

Fotografia 17 – Isolador tipo disco de vidro temperado para linhas de transmissão



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Do ponto de vista industrial, o processo de fabricação é hoje altamente automatizado. A composição do vidro (geralmente sílica com aditivos para estabilidade química) é dosada, fundida e condicionada; um glóbulo é então prensado em molde para formar a calota de vidro com sua borda aerodinâmica e o “botão” central. Em sequência imediata, ocorre a têmpera por ar: um resfriamento rápido e uniformemente distribuído cria uma camada superficial em compressão e um miolo em tração, estado de tensões que confere ao disco sua resistência a impacto e, sobretudo, sua “assinatura” de fragmentação previsível quando o limite é ultrapassado. O passo seguinte é a montagem *cap-and-pin*: capa metálica (aço galvanizado/zincado) e pino são cimentados ao vidro com cimentos especiais (cimento Portland de baixa retração, aluminosos ou formulações resistentes a sulfatos), técnicas refinadas ao longo do século para minimizar tensões residuais, intrusão de umidade e corrosão por frestas. A qualidade é controlada por ensaios não destrutivos e destrutivos (dimensional, inspeção óptica de inclusões, verificação do padrão de têmpera, mecânicos) e ensaios de rotina elétricos e mecânicos, o que explica a homogeneidade de desempenho entre lotes, sendo um dos trunfos do material (Looms, 1988). A Fotografia 18 mostra o processo industrial de prensagem e têmpera do vidro durante a fabricação de isoladores tipo disco, etapa fundamental para obtenção da resistência mecânica e da característica de fragmentação controlada que distinguem esse material.

Fotografia 18 – Etapa de prensagem e têmpera na fabricação de isoladores de vidro



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

A geometria do disco evoluiu com as exigências ambientais. Os perfis comuns do período pós-guerra, projetados para clima limpo e chuvas fracas, cederam espaço às variantes “anti-fog” (anti-neblina), com saia mais profunda, gotejamento mais eficiente e creepage maior por unidade, para retardar a formação de filmes contínuos durante garoa, neblina ou chuvas leves. Nos sistemas EHV, a adoção de anéis de controle de campo (*grading/corona rings*) fez o trabalho eletrogeométrico de uniformizar o campo no conjunto, poupano o vidro de estresses locais por corona; embora a definição desses acessórios pertença ao projeto elétrico do conjunto (especificado pelo fornecedor das ferragens) a evolução dos perfis e do acabamento superficial do disco de vidro sempre dialogou com o objetivo de cortar os caminhos de água, facilitar a drenagem e a autolimpeza. Para ambientes severos, a aplicação de revestimentos RTV de silicone sobre o vidro se difundiu: o RTV não altera valores de projeto (distâncias, RIV, etc.), mas confere hidrofobicidade à superfície, interrompe a continuidade do filme d’água e costuma reduzir lavagens em trechos com reumidificação persistente.

Esse ponto - hidrofobicidade - é central para entender o comportamento do vidro. Por natureza, o vidro é hidrofílico: em presença de depósito condutivo (ESDD/NSDD) e umidade leve recorrente, forma-se um filme contínuo que aumenta correntes de fuga e antecipa eventos superficiais. Em climas litorâneos (salinidade) ou industriais finos (SO_x/NO_x/particulados), a literatura recomenda duas linhas de ação: rotina de limpeza na estação crítica (quando a precipitação é insuficiente para limpar a camada depositada sobre o isolador) ou o uso de RTV nos vãos/torres com

pior estatística. Em ambientes limpos a médios, a superfície lisa do vidro e seu escoamento aerodinâmico costumam ser suficientes, necessitando de poucas lavagens, sobretudo quando a chuva vem em eventos bem formados (sem reumidificação persistente). A presença de fauna (aves) adiciona uma preocupação à parte: dejetos e nidificação geram biofilmes tenazes e trilhas úmidas duradouras, mas no vidro não há “aletas” para aves roerem (como nos compósitos), o que é uma vantagem. Mesmo assim, o planejamento de limpeza sazonal é decisivo nos trechos mais pressionados.

Os modos de falha mais relevantes no vidro temperado refletem tanto o material quanto o contexto. Em primeiro lugar está a fratura por impacto, sendo que o vandalismo é o fator mais crítico e, isoladamente, o que mais desqualifica o vidro em certos trechos. A auto sinalização ajuda a responder rapidamente nos eventos de perda do isolador, mas quebra recorrente eleva o custo de ciclo de vida. Um segundo modo, hoje raro em fabricantes qualificados, são as fraturas retardadas por inclusões, por exemplo, sulfeto de níquel. Os controles modernos de composição e têmpera reduziram drasticamente o problema. No plano elétrico-ambiental, o mais comum é a recorrência de eventos superficiais (pré-falhas) em classe de poluição severa com reumidificação, sendo uma consequência da hidrofobicidade baixa, mitigável com RTV e/ou lavagens estratégicas. O *Puncture* verdadeiro do dielétrico (perfuração elétrica do vidro) é estatisticamente raro; quando o estresse supera a margem, o disco tende a fragmentar, característica que, paradoxalmente, protege contra uma falha “oculta” e mantém o conjunto diagnosticável a olho nu. As fotografias a seguir apresentam a verificação da têmpera de um isolador de vidro por meio de polariscópio, ensaio óptico amplamente utilizado em laboratório para observar as tensões internas geradas pelo processo de têmpera e avaliar a uniformidade estrutural do material. Na Fotografia 19, vê-se um isolador com boa têmpera, comprovada pela distribuição das cores ao longo do dielétrico. Já o isolador na Fotografia 20 pode ser considerado um isolador com têmpera de qualidade inferior, por possuir uma distribuição irregular de tensões internas.

Fotografia 19 – Verificação da têmpera de isolador de vidro em polariscópio, evidenciando distribuição uniforme de tensões internas (boa têmpera)



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Fotografia 20 – Verificação da têmpera de isolador de vidro em polariscópio, evidenciando distribuição irregular de tensões internas (têmpera ruim)



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Em operações e manutenção, as qualidades que mantêm o vidro competitivo são bem conhecidas: vida útil longa quando corretamente aplicado, estoques e intercambialidade amplos no mercado brasileiro, instalação/substituição diretas e, sobretudo, inspeção visual simples graças à auto sinalização. A homogeneidade dimensional e a superfície lisa explicam por que muitos operadores mantêm cadeia

de isoladores de vidro em trechos limpos e o custo de O&M permanece sob controle. O contraponto aparece nos extremos. Em vandalismo alto, o vidro é, dentre os três materiais, o mais penalizado; em poluição severa com reumidificação persistente, sem RTV ele exigirá mais lavagens e exibirá maior variabilidade ao longo do ano.

Resumindo, o vidro possui vantagens e limitações, em síntese técnica: (a) auto sinalização, um diferencial operacional único, que reduz o risco de convivência prolongada com defeitos e simplifica a inspeção; (b) superfície lisa e repetível, boa drenagem e previsibilidade elétrica; (c) cadeia de suprimentos consolidada, alta disponibilidade e padronização. Na lista das limitações, pode-se citar: (d) hidrofobicidade intrinsecamente baixa, causando dependência de RTV e/ou lavagem em ambientes severos com reumidificação; (e) sensibilidade a impacto, de modo que o vandalismo possa inviabilizar o material em certos trechos, apesar da auto sinalização; (f) biofilme por fauna, que requer janelas de limpeza nos picos sazonais. A literatura de referência (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004) é consistente ao indicar que, quando o ambiente não é extremo e o risco de vandalismo é baixo, o vidro rende muito bem e oferece gestão simples. Permanece viável em ambientes severos quando associado a RTV nos pontos críticos e a um plano de limpeza realista. O vidro deixa de ser preferível quando o vandalismo domina o cenário ou quando a bio-contaminação é tão intensa que o esforço de limpeza supera alternativas de outros materiais.

4.3 Isoladores de porcelana

A porcelana foi, por décadas, a principal opção para isolamento externo em alta tensão. A combinação de corpo cerâmico vitrificado e esmalte vítreo deu origem a um material com elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e vida útil longa, capaz de atravessar ciclos de chuva, insolação e variações de temperatura com degradação lenta e previsível (Looms, 1988).

Os primeiros isoladores de porcelana surgiram ainda no início do século XX, em formatos maciços para distribuição. Na transmissão, a trajetória evoluiu do *cap-and-pin* cerâmico (discos cerâmicos) para os *long-rod* (haste cerâmica com saias integradas). O passo para o *long-rod*, consagrado a partir de tensões

elevadas, permitiu reduzir interfaces metal–cerâmica, alongar o caminho de escoamento sem multiplicar conexões e adotar perfis de saias mais eficientes contra reumidificação (saias mais profundas, ângulos que favorecem drenagem e autolimpeza) (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004).

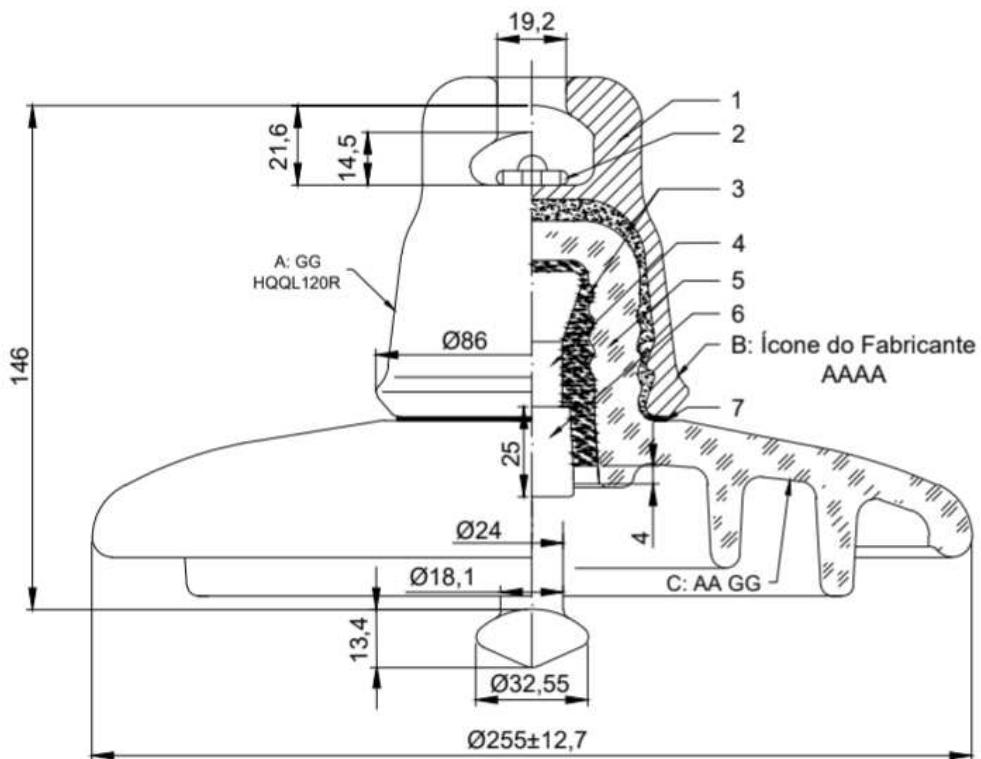
A Fotografia 21 apresenta isoladores de porcelana durante ensaio de medição da distância de escoamento, procedimento que verifica a conformidade dimensional e o desempenho superficial do material frente a condições de contaminação e umidade. A Fotografia 22 mostra o desenho de um arranjo de isolador de disco (*cap&pin*).

Fotografia 21 – Isolador de porcelana em ensaio de medição da distância de escoamento



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Fotografia 22 – Desenho de isolador de disco em detalhe a montagem da campânula e pino



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

A fabricação do isolador de porcelana define muito do desempenho que se observa só em campo. A “receita” parte de caulim, argilas plásticas e feldspato (eventualmente quartzo), moídos e preparados com umidade controlada. O corpo é conformado por extrusão, prensagem ou isostática, seguido de secagem em regime que evite gradientes de umidade e tensões internas. A etapa crítica é a queima em fornos de alta temperatura (tipicamente 1.200–1.300 °C), na qual se obtém a vitrificação (fase vítreia que liga os grãos) e o fechamento de poros residuais. A seguir, aplica-se o esmalte (*glaze*), que sela a superfície, controla a rugosidade e confere química estável diante de chuva ácida e poluentes industriais. Em desenhos cap-and-pin, a conexão às partes metálicas é feita por cimentação (cimentos especiais com baixa retração e boa compatibilidade térmica), enquanto no *long-rod* a porção cerâmica íntegra, de uma só peça, a haste e as saias, e a conexão metálica se limita às pontas. Em ambos os casos, o controle de qualidade (densidade aparente, absorção de água, exame visual de microfissuras, aderência do esmalte, teste dielétrico e mecânico) define a confiabilidade de longo prazo.

O desenho dos perfis de saias acompanhou o entendimento sobre poluição e reumidificação descrito na literatura técnica de referência. Os primeiros perfis “normais” funcionavam bem em clima limpo com chuvas fracas. Com a consciência de que garoa/neblina e chuvas leves formam filmes contínuos sobre superfícies hidrofílicas, ganharam espaço os perfis *anti-fog* (anti-neblina) que possuem saias mais profundas, passos maiores e ângulos que cortam o escoamento laminar, favorecem gotejamento e criam zonas de sombra hídrica. Em aplicações de tensões mais elevadas, o uso de anéis para uniformizar o campo (*grading/corona rings*), que é uma decisão de projeto elétrico do conjunto, conviveu com porcelanas cada vez mais homogêneas e estáveis, o que diminuiu pontos quentes de campo em extremidades e interfaces.

A resposta elétrica-ambiental da porcelana em serviço decorre de dois fatos simples: sua superfície esmaltada é hidrofílica e sua química é inerte. Em trechos limpos a médios, a boa auto limpeza trazida por eventos de chuva bem formados costuma manter a corrente de fuga baixa. Em ambientes severos, com alta salinidade litorânea, ou alta densidade de particulados finos industriais e/ou poeira agrícola fina, a sequência deposição junto com reumidificação cria filmes condutivos, elevando a corrente de fuga e a probabilidade de eventos superficiais. A prática que consolidou a porcelana nesses cenários foi o revestimento RTV de silicone sobre as saias: o RTV não altera parâmetros já definidos em projeto (distância de escoamento, RIV/corona, arco a seco), mas altera o regime de superfície (hidrofobicidade), quebrando filmes contínuos e reduzindo o esforço de lavagem no pior período do ano. Operadores que evitam RTV, por política ou custo, costumam compensar com rotinas de limpeza programada nas janelas sazonais críticas, uma estratégia igualmente reconhecida na literatura (Vosloo et al., 2004; IEC, 2008). A Fotografia 23 mostra um estudo conduzido pela TEXPI sobre o comportamento de revestimento RTV de silicone aplicado sobre superfícies poluentes, destacando a formação de filme hidrofóbico e a alteração da molhabilidade da porcelana em comparação com o estado original hidrofílico.

Fotografia 23 – Estudo da ação do RTV de silicone sobre camada poluente em superfície cerâmica



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Nos modos de falha, a porcelana é robusta, mas não infalível. O cenário clássico é o *puncture* por defeitos internos (porosidade residual, inclusão, falta de vitrificação local) que, sob estresse elétrico e térmico, acabam por conduzir ou propagar uma microtrinca até o colapso dielétrico da parede cerâmica. Há também o *cracking* do esmalte (microfissuras superficiais na camada vítreia), que geralmente é superficial, mas pode, em casos extremos e combinados com ataque químico local, abrir caminho para umidade alcançar o corpo cerâmico. Em desenhos *cap-and-pin*, falhas de cimentação ou corrosão por frestas na interface com a capa metálica podem introduzir tensões e permitir caminhos de umidade. Em configuração *long-rod*, a menor quantidade de interfaces ajuda a mitigar esses riscos. Impactos mecânicos e choques térmicos (por exemplo, jato d'água frio sobre superfície muito aquecida ao sol) podem gerar trincas. Diferentemente do vidro, a porcelana não torna a falha visível a olho nu. A peça com trinca pode continuar em serviço até que um estresse maior cause a falha. Esse é, operacionalmente, o principal ponto negativo da tecnologia: a dificuldade de detecção de defeitos sem inspeção dedicada.

Da perspectiva de operação e manutenção, a porcelana oferece um pacote atraente: longevidade comprovada, estabilidade térmica e mecânica, cadeia de

suprimentos ampla e intercambialidade de formatos. Em contrapartida, o diagnóstico de falhas exige método: inspeção visual criteriosa (busca de marcas, escurecimentos, lascas), ensaios de detecção acústica local (o “toque” que revela descolamentos), uso de câmeras de UV/corona para flagrar caminhos anômalos em condições úmidas, monitoramento de corrente de fuga para localizar cadeias defeituosas e, quando aplicável, termovisão para flagrar aquecimentos atípicos em interfaces e até mesmos scanners de campo elétrico. Em poluição severa com reumidificação, ou se a experiência local comprova benefício, o RTV costuma elevar a previsibilidade do regime superficial sem alterar a filosofia de projeto (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004).

A Fotografia 24 ilustra o ensaio de tensão disruptiva aplicado a uma cadeia de isoladores de porcelana, realizado para verificar o desempenho dielétrico sob esforços elétricos crescentes e reproduzir em laboratório as condições de arco observadas em campo.

Fotografia 24 – Ensaio de tensão disruptiva em cadeia de isoladores de porcelana



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Em relação ao vandalismo, a porcelana situa-se melhor do que o vidro e pior do que o composto quando analisa-se apenas essa variável. É menos propensa à

fragmentação explosiva por impacto que o vidro e, portanto, sobrevive melhor a arremessos moderados. Porém, a porcelana ainda é um material frágil: tiros ou impactos fortes podem provocar trincas que não se denunciam visualmente, exigindo inspeção mais atenta. Em relação à fauna, a porcelana costuma ser favorável: não possui aletas poliméricas para aves “roerem”, resiste bem a dejetos e nidificação tende a ser mitigada por limpeza. O ponto de atenção é a reumidificação persistente gerada por biofilme, que deve ser tratada com janelas de lavagem ou, onde fizer sentido técnico-econômico, usar RTV. No aspecto ambiental, a porcelana sem RTV é hidrofílica; em classes médias com boa pluviometria, costuma bastar; em pesadas/muito pesadas, o RTV frequentemente se paga pela redução de variabilidade e de lavagens.

Qualidades e limitações da porcelana na prática: (a) vida útil longa e robustez. Esse é o argumento histórico que mantém porcelana como referência; (b) resistência a UV e estabilidade térmica, possui degradação lenta; (c) auto limpeza razoável em climas com chuva bem formada; (d) versatilidade de perfis (*cap-and-pin* e *long-rod*) para diferentes assinaturas ambientais. Por outro lado, a porcelana possui as seguintes desvantagens: (e) hidrofobicidade intrinsecamente baixa (depende de lavagem e/ou RTV em severos com reumidificação); (f) falha pouco evidente. Sem auto sinalização, a operação precisa de rotina de inspeção; (vii) em vandalismo alto, embora melhor que vidro, fica atrás do composto quando o critério isolado é resistência a danos e logística de reposição.

4.4 Isoladores compostos (poliméricos)

A adoção de isoladores compostos (núcleo em fibra de vidro com invólucro e aletas em silicone (HTV/LSR) ou EPDM) mudou a lógica do desempenho superficial ao ar livre. O que os torna diferentes não é apenas a baixa massa e a facilidade de manuseio; é, sobretudo, a hidrofobicidade intrínseca do silicone e o fenômeno de recuperação da hidrofobicidade (*Low Molecular Weight - LMW migration*): após umedecimento ou contaminação, moléculas de baixo peso molecular migram da matriz para a superfície e restauram a repelência à água, interrompendo filmes contínuos e quebrando caminhos condutivos. Essa característica explica por que,

em ambientes com reumidificação persistente (garoa, neblina, chuvas leves), os compósitos tendem a sustentar correntes de fuga menores e variabilidade operacional reduzida em comparação a superfícies hidrofílicas, especialmente quando a poluição é fina e uniformemente depositada (marinha e industrial). A literatura clássica (Looms, 1988; Vosloo et al., 2004) descreve esse comportamento como o marco físico que distingue os compósitos na prática de campo.

Historicamente, os primeiros projetos (décadas de 1970–80) com hastes relativamente curtas, invólucros com EPDM e formulações de silicone ainda imaturas para ciclos longos de UV/ozônio. A curva de aprendizado foi rápida: nos anos 1990–2000 consolidaram-se núcleos de fibra de vidro com melhor controle de qualidade, terminações cravadas (*crimped end-fittings*) com selagens mais robustas e silicones HTV com carga ATH (trihidróxido de alumínio) para resistência a *tracking/erosion*. Em paralelo, os perfis de aletas evoluíram: passo maior, geometria *anti-fog* e perfis que drenam e fragmentam lamelas d'água, potencializando o efeito hidrofóbico. O resultado foi um produto com capacidade de serviço eficiente em alta e extra-alta tensão e difusão global na última década, inclusive no Brasil, onde as vantagens logísticas (peso, transporte e instalação) são particularmente relevantes em linhas extensas e acessos difíceis (Vosloo et al., 2004).

Essa arquitetura, porém, impõe novas atenções à engenharia. Em um compósito, o dielétrico estrutural é o núcleo; o silicone é o invólucro que governa o regime de superfície. Quando o invólucro é violado ou perde integridade (por corte, abrasão profunda, erosão severa, “roer” de aletas por fauna ou defeito de selagem nas extremidades), a umidade pode alcançar o núcleo e iniciar mecanismos irreversíveis: descargas parciais internas na interface, *stress corrosion* do bastão e, em casos extremos, a chamada *brittle fracture* (ruptura frágil do núcleo) associada a caminhos preferenciais de ácido nítrico gerado por corona localizada. A literatura dedica capítulos a esse tema: não por ser frequente em fabricantes qualificados, mas porque é crítico quando os pré-requisitos de qualidade não são cumpridos (selagem, adesão núcleo-invólucro, controle das terminações). Daí a ênfase, em guias práticos, na homologação de fornecedor, na qualidade do silicone (tipo, reticulação e teor de ATH) e no ensaio de resistência a *tracking/erosion* e envelhecimento acelerado antes de escalar qualquer solução (Vosloo et al., 2004). A Fotografia 25 apresenta um exemplo de fratura frágil observada em isolador

polimérico durante inspeção de campo, evidenciando o colapso do núcleo de fibra de vidro após perda de integridade do invólucro e penetração de umidade, um dos mecanismos mais críticos de falha em compósitos.

Fotografia 25 – Fratura frágil em isolador polimérico observada em inspeção de campo



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

No aspecto superficial, o silicone oferece três vantagens operacionais. Primeiro, a hidrofobicidade propriamente dita (ângulos de contato elevados), que mantém gotas discretas e reduz pontes condutivas. Segundo, a recuperação após eventos: mesmo quando a superfície fica momentaneamente hidrofílica (lavagem intensa, solventes nocivos, certos dejetos), a migração de LMW (partículas de baixo peso molecular) tende a restaurar o comportamento hidrofóbico em horas/dias, dependendo da formulação e da temperatura. Terceiro, a resiliência a abrasão e a impactos difusos, que preservam a geometria das aletas. Em conjunto, isso se traduz em menos lavagens e menor sensibilidade a chuvas fracas do que materiais hidrofílicos nas mesmas condições de poluição. Por outro lado, o silicone envelhece: UV/ozônio promovem *chalking* (esbranquiçamento), micro craqueamento e evolução de *tracking/erosion* se a formulação e a carga ATH (carga mineral que aumenta a resistência a tracking/erosão e ao fogo) não forem adequadas; o livro *The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators* é claro ao relacionar clima e especificação (HTV, teor de ATH, espessura do invólucro e desenho de aletas) com vida útil real. A

Fotografia 26 mostra um isolador polimérico após ensaio de tracking, no qual são aplicadas tensões e contaminantes controlados para avaliar a resistência do material à formação de trilhas condutivas e à erosão superficial, parâmetros fundamentais para sua especificação em ambientes severos.

Fotografia 26 – Isolador polimérico após ensaio de tracking e erosão superficial



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

A fauna é, no Brasil, um divisor de águas. Em corredores com aves migratórias e espécies que pousam e “roem” aletas (bicos agressivos, comportamento territorial), compósitos sofrem danos mecânicos localizados que reduzem o escoamento efetivo e criam hotspots de reumidificação. Some-se a isso dejetos de alta acidez e condutividade que envenenam temporariamente a hidrofobicidade, retardando sua recuperação. Na prática, esse conjunto torna o composto desfavorável em trechos de fauna abundante, algo repetido por operadores e alinhado à experiência compilada nos compêndios técnicos. Já em vandalismo, ocorre o oposto: ao isolar apenas essa variável, o composto é, entre os três materiais, o mais favorável; resiste melhor a impacto difuso, não fragmenta como o vidro e sua baixa massa simplifica a reposição, superando inclusive a porcelana nesse critério isolado.

No padrão de falhas observadas em campo, quatro categorias concentram a atenção: (i) *tracking/erosion* por esforços superficiais repetidos sob

poluição/umidade e correntes de fuga; (ii) envelhecimento UV/ozônio com *chalking*, microtrincas e perda de massa superficial (dependente de formulação e clima); (iii) defeitos de interface/selagem com intrusão de umidade, levando a descargas parciais internas e, em progressão, *brittle fracture* do FRP; (iv) danos mecânicos de fauna (perda parcial de aletas, cortes) que criam assimetrias hidráulicas e elétricas. *Puncture* do núcleo é raro, porque o bastão trabalha principalmente em compressão/tração, não como dielétrico “a granel” exposto; quando há colapso, costuma ser mecânico (FRP) precedido por sintomas de interface. A Fotografia 27 apresenta um isolador polimérico seccionado após ensaio de aderência entre o núcleo de fibra de vidro e o invólucro de silicone, realizado para verificar a integridade da interface e a eficácia da selagem, parâmetros essenciais para evitar descargas internas e falhas por ruptura frágil (Vosloo et al., 2004).

Fotografia 27 – Isolador polimérico após ensaio de aderência entre núcleo e invólucro de silicone



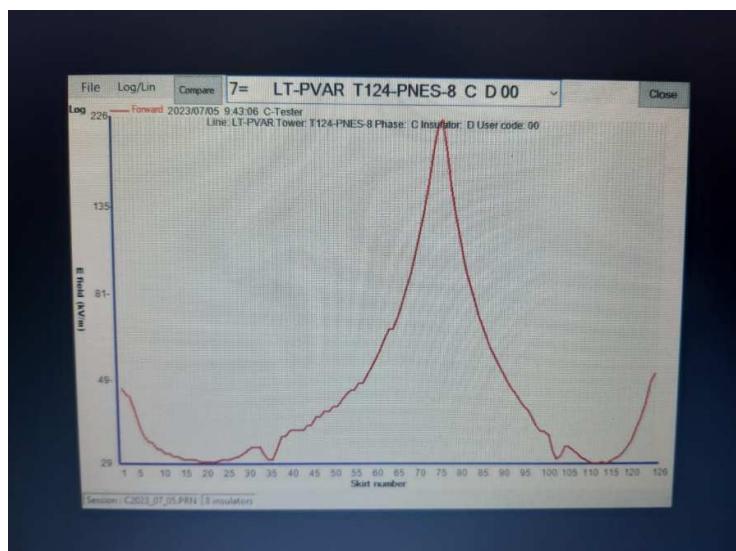
Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

Em inspeção e O&M, a “fraqueza” operacional dos compósitos é conhecida: não demonstram falhas de maneira visível na maioria dos casos. A estratégia precisa combinar inspeção visual criteriosa (procura de *tracking/erosion*, *chalking*, perdas de aleta, cortes, manchas de dejetos persistentes), ferramentas óticas (câmeras UV/corona para flagrar atividade em condições úmidas), indicadores elétricos (scanners de campo elétrico como da fabricante Positron), e, quando necessário, ensaios em amostra retirados de serviço para diagnóstico laboratorial. O

ganho no uso dos compósitos vem dos seus aspectos positivos: cadeias mais leves, instalação/substituição mais rápidas, redução de lavagens em poluição clássica e robustez diante de vandalismo. A chave é posicionar o isolador composto onde sua vantagem física importa e evitá-lo onde a fauna neutraliza essa vantagem.

A Fotografia 28 apresenta o registro de leitura de campo elétrico ao longo de um isolador, obtido por scanner portátil durante inspeção em linha de transmissão. A variação anômala do campo indica descontinuidade dielétrica associada a defeito localizado, ferramenta essencial para diagnóstico preditivo em isoladores compostos.

Fotografia 28 – Leitura de campo elétrico ao longo de isolador com defeito (ida e volta)



Fonte: Acervo Texpi Equipamentos (2025)

A qualidade do silicone e das terminações decide a vida útil. Formulações HTV com ATH suficiente resistem melhor a *tracking/erosion*; LSR de boa linhagem tem acabamento superior, mas requer controle fino de adesão ao núcleo. A espessura do invólucro e o desenho de aletas (passo, altura, ângulo) calibram drenagem e sombra hídrica. Nas pontas, as selagens e a interface precisam impedir umidade e RIV. Quando o projeto do conjunto exigir, anéis de controle de campo protegem a região metálica. O processo de limpeza do núcleo, primer, vulcanização/adição, cura deve assegurar aderência íntima núcleo–invólucro e impermeabilidade a longo prazo. Os guias práticos insistem em ensaios de

tipo/rotina que realmente envelheça a peça (ciclos UV/umidade, poluição, PD(*Partial Discharge*)), visto que o composto de baixa qualidade envelhece cedo e rápido.

Qualidades e limitações dos isoladores compostos, em termos diretos ao projeto por trecho: (a) hidrofobicidade dinâmica e resposta superior em reumidificação sob mesma poluição, resultando em menos lavagens e menor variabilidade; (b) logística leve, que resulta em transporte e instalação mais simples, ganhos em acessos difíceis; (c) melhor escolha contra o vandalismo, analisando isoladamente essa variável; (d) versatilidade de perfis com aletas que “quebram” lamelas d’água. Em contrapartida: (e) não auto sinalizam, exigindo plano de inspeção; (f) são sensíveis a fauna alta (aves migratórias e espécies que danificam aletas), tornando-se desfavoráveis nesses corredores; (g) dependem fortemente de qualidade de fabricação (interfaces, selagens, silicone/ATH), sem a qual *tracking/erosion* e *brittle fracture* podem surgir precocemente; (h) envelhecem ao sol. A especificação tem de considerar UV/ozônio do clima local e a classe de desempenho do material.

4.5 Síntese do capítulo

O Brasil possui várias condições ambientais que impactam equipamentos de transmissão, como litoral salino por uma costa de 7 mil km, Amazônia úmida com reumidificação diária, cerrado com poeira fina na seca e garoas leves na transição, faixas industriais com particulados ácidos e cinturões urbanos onde há vandalismo e fauna urbana. Em poucas centenas de quilômetros, uma LT pode sair de uma restinga arenosa (ρ alta quando seca, vento de mar e névoa salina) e entrar em aluviões encharcados (ρ baixa) sob tempestades convectivas, atravessar um vale urbano sujeito a arremesso de objetos e terminar em uma região agrícola com rotas de aves migratórias. Essa diversidade territorial faz com que “uma única resposta” para o isolador raramente seja a melhor resposta: decisões por trecho são a diferença entre uma cadeia que opera estável por décadas e outra que oscila entre lavagens, falhas superficiais e trocas corretivas.

A diversidade territorial impacta diretamente os três eixos que definem a escolha do material do isolador. Regiões costeiras e industriais oferecem a

combinação crítica de depósito fino mais reumidificação leve (garoa, neblina, brisa marítima) que prejudicam o desempenho de superfícies hidrofílicas. No interior do país, o depósito de pó agrícola/mineral é acentuado no fim da estiagem. Na Amazônia, a chuva “lava” os isoladores, mas a reumidificação constante exige uma estabilidade superficial quase diária. No contexto social, a proximidade de áreas urbanas ou de lazer aumenta o fator vandalismo (onde, isoladamente, o compósito supera a porcelana, e o vidro é a pior opção). Considerando o risco biológico, aves migratórias e colônias mudam a hierarquia das opções: a porcelana torna-se preferida, vidro fica intermediário com limpeza/RTV e o compósito perde preferência pelos danos às aletas e dejetos. Somando-se a estes fatores, tem-se a variabilidade da resistividade de solo (ρ) e, portanto, da resistência de aterramento da torre (R_{foot}): em terrenos arenosos secos e afloramentos rochosos (ρ alta), a elevação de potencial na ocorrência de raios tende a aumentar a sobretensão no topo da cadeia de isoladores no “pior dia”. Em aluviões ou terrenos argilosos úmidos (ρ baixa), essa sobretensão é menor. Todos estes aspectos considerados neste trabalho não propõem alteração dos parâmetros do projeto elétrico (NBI, distâncias, R/V-atributos do projetista), mas indicam a importância da especificação do isolador, pois o regime de superfície do material escolhido precisa ser mais estável onde o ambiente é mais severo.

Características ambientais tão diversas pedem critérios, rastreabilidade e “governança” da decisão. Algumas ações necessárias incluem: padronizar a coleta de evidências (ESDD/NSDD quando houver; *proxies* defensáveis quando não houver), escrever por trecho um diagnóstico curto e verificável (classe ambiental e estação crítica, níveis de vandalismo e fauna com fotos/boletins, leitura qualitativa de R_{foot} com nota de sazonalidade) e aplicar regras claras de material: compósito domina em áreas de poluição somadas a reumidificação, sem fauna abundante; porcelana domina em fauna abundante e onde a robustez cerâmica compensa; vidro é excelente quando a inspeção rápida e a auto sinalização trazem valor e o fator vandalismo é baixo, mantendo competitividade em ambientes severos com RTV e limpeza pontual.

A variação climática no Brasil aponta para o planejamento da sazonalidade: o trecho “moderado” de Julho a Setembro pode evoluir para condição de “severidade elevada” por três meses e voltar a “baixa severidade” com as chuvas. A

recomendação adequada inclui mitigação no isolador (RTV ou limpeza) exatamente nessa janela de tempo. E, por fim, o país exige revisão periódica dos projetos: mudança de uso do solo, abertura de polo industrial, surgimento de um lixão ou de um píer com colônias de aves podem inverter, em dois anos, a decisão que ontem era ótima.

Uma análise por trecho reduz a variabilidade de corrente de fuga nos piores dias, elimina lavagens desnecessárias, evita trocas frequentes por vandalismo mal mapeado, e encolhe o risco de operar longamente com defeitos não percebidos (porcelana e compósito exigem plano de inspeção; vidro auto sinaliza). Em contrapartida, a penalidade por erro é alta: escolher compósito em corredor de aves migratórias custa a integridade das aletas; insistir em vidro em faixa de vandalismo transforma manutenção em rotina de emergência; adiar RTV em trecho salino com garoa perpetua “dias ruins” sem necessidade. Na escala continental do Brasil, o detalhe vira estratégia: a mesma concessionária pode, com o mesmo catálogo de materiais, entregar ciclos de vida muito diferentes se respeitar (ou não) a assinatura local de ambiente, sociedade, fauna e solo.

Considerando o exposto acima, conclui-se este capítulo reforçando a importância de uma análise qualitativa a respeito do material a ser aplicado em cada trecho de uma LT. Para fins de orientação, foi elaborado o Quadro 1, que serve de apoio para a realização de tal análise, fornecendo critérios para a escolha do tipo de isolador de acordo com as características da região na qual o trecho da linha se encontra.

Quadro 1 - Desempenho de isoladores por especificidade regional

ESPECIFICIDADE DA REGIÃO	VIDRO	PORCELANA	COMPOSTO
Alta incidência de vandalismo	Ruim	Bom	Bom
Alto índice de poluição (grandes distâncias de escoamento)	Ruim	Ruim	Bom
Chuvas intensas	Bom	Bom	Ruim
Região úmida	Ruim	Ruim	Bom
Aves migratórias	Bom	Bom	Ruim
Vegetação densa	Bom	Bom	Ruim
Região com baixa frequência de chuvas (clima árido)	Ruim	Ruim	Bom
Polos industriais	Ruim	Ruim	Bom
Facilidade de inspeção	Bom	Ruim	Ruim

Fonte: Autoria Própria (2025)

Com base nos critérios apresentados no Quadro 1, fica evidente que não existe um material de isolador “universalmente melhor”, mas sim combinações mais adequadas a cada contexto ambiental e operacional. A leitura conjunta das características: classe de poluição, presença de fauna, risco de vandalismo e condições de aterramento mostra que o desempenho real em campo resulta da interação entre essas variáveis e o material escolhido, reforçando a necessidade de tratar a especificação sempre de forma segmentada por trecho.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que a especificação de isoladores para linhas de transmissão no Brasil é mais eficiente quando tratada por trecho, baseada em evidências e dados verificáveis. Ao invés de buscar um “material universal”, o trabalho propõe que a decisão seja feita em torno de três pilares práticos: (a) severidade ambiental (poluição associada com a reumidificação); (b) vandalismo e (c) fauna, considerando ainda um quarto aspecto operacional relevante ao país: a resistividade de solo e seu efeito indireto no risco de *back-flashover*, e a garantia que o aterrramento da estrutura esteja dentro dos parâmetros aceitáveis. Ao longo do Capítulo 4, foram descritos e analisados os mecanismos físicos que governam o desempenho superficial dos isoladores, a evolução tecnológica de porcelana, vidro e compostos poliméricos, seus modos de falha mais comuns e as mitigações no próprio isolador (como RTV e limpeza sazonal), sem reabrir parâmetros de projeto que são de responsabilidade do projetista, como distância de escoamento, RIV/corona e arco a seco.

5.1 Principais conclusões técnicas

Não existe um material superior. Há condições de dominância claras:

- O composto polimérico domina quando a assinatura ambiental é poluição somada a reumidificação e não há fauna abundante capaz de causar dano às aletas; também é superior quando se analisa apenas o vandalismo, por possuir menor fragilidade e logística facilitada, devido a seu peso reduzido.
- A porcelana é mais eficaz em áreas de fauna abundante (aves migratórias, dejetos e ataque mecânico) e mantém longevidade, porém a falha é difícil de detectar, exigindo rotinas de inspeção. Em ambientes severos, o uso de RTV estabiliza o regime superficial.
- O vidro é altamente competitivo quando o vandalismo é baixo e o diagnóstico rápido é determinante (auto sinalização), permanece viável em ambientes severos com RTV e plano de limpeza. Porém, o vidro torna-se desfavorável onde o vandalismo é elevado.

As mitigações no isolador melhoram a confiabilidade sem alterar o projeto elétrico: aplicações de RTV em vidro/porcelana reduzem variabilidade em trechos salinos/industriais com reumidificação. A limpeza sazonal corrige biofilme gerado por fauna.

No Brasil, devido a suas proporções continentais, as linhas longas podem ter diversas especificidades, exigindo assim que os critérios de decisão de projeto e operação sejam ajustados a cada trecho que a LT atravessa. Uma mesma LT pode atravessar biomas e usos do solo distintos, litoral salino, cinturões industriais, agro-cerrado com poeira, Amazônia úmida e serras rochosas. Por isso, o particionamento da linha em trechos homogêneos, a identificação do pior caso e revisões periódicas para identificação de novos polos emissores ou rotas de aves, deveriam ser requisitos de planejamento e operação das linhas , não ações opcionais.

A resistividade de solo (ρ) e R_{foot} não influenciam diretamente a escolha do material ou altera o projeto, mas causam aumento de sobretensão sobre os isoladores em solos de alta ρ (terrenos arenosos secos ou rochosos). Nesses cenários, faz sentido preferir materiais com regime superficial mais estável no local mais crítico do trecho (mantendo intactos os parâmetros de projeto). Dessa forma, uma das prioridades é garantir que a resistência de pé de torre esteja adequada para que o conjunto isolante apresente o desempenho desejado.

O&M precisa ser coerente com o material:

- Vidro: inspeção visual simples (auto sinaliza) e atenção ao vandalismo.
Porcelana: maior longevidade, mas defeitos pouco evidentes, pedindo um plano de inspeção periódica, como inspeção visual criteriosa, utilização de métodos de inspeção como UV/corona/termografia, detecção de correntes de fuga).
- Compósito: não auto sinaliza e exige política de inspeção e homologação rigorosa de fornecedor (interfaces, selagens, silicone/ATH). Como vantagem, possui desempenho notável em reumidificação sem fauna agressiva.

5.2 Contribuições práticas

O desenvolvimento deste TCC trouxe as seguintes contribuições para a área acadêmica e profissional de projetos de linhas:

- Apresentou critérios objetivos de escolha de material do isolador de acordo com as características de cada região;
- Classificou os isoladores dentro de um quadro regional para o Brasil (litoral, industrial/urbano, agro-cerrado, Amazônia, semiárido, serras rochosas), indicando como cada contexto define a preferência de material e quando aplicar RTV/limpeza.

Além disso, tem-se como contribuição as sugestões para trabalhos futuros:

- Montar um banco de dados de falhas por trecho, material, ocorrência e sazonalidade, para refinar pesos e calibrar indicadores preditivos. Estabelecendo assim uma forma de realizar uma análise quantitativa sobre qual material deve ser aplicado.
- Desenvolver um índice composto de decisão (*score*) e teste de sensibilidade.
- Integrar monitoramentos elétricos (corrente de fuga, UV/corona) a dados operacionais que antecipem a estação crítica.
- Pesquisar materiais e revestimentos de nova geração (silicones otimizados, híbridos e RTVs avançados).
-

5.3 Considerações Finais

Os critérios estabelecidos neste trabalho são replicáveis, incorporando a diversidade territorial brasileira em decisões técnicas objetivas sobre qual material de isolador usar em cada trecho. O resultado destas recomendações é o aumento da confiabilidade, O&M mais previsível e custo de ciclo de vida reduzido, sem perder a simplicidade operacional de quem precisa inspecionar, lavar, revestir ou substituir isoladores na rede.

A confiabilidade nasce quando a decisão técnica encontra o contexto certo.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. (e atualizações). Informações públicas sobre a norma em:
<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5702/abnt-nbr7117-medicao-da-resistividade-e-determinacao-da-estratificacao-do-solo>. Acesso em: 6 nov. 2025.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5032**: Isoladores elétricos – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Relatório de sustentabilidade**. Brasília: ABRADEE, 2023. Disponível em:
<https://abradee.org.br/wp-content/uploads/2023/12/Relatorio-Sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2022. Disponível em:
<https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/34949?guid=1734134409522&i=132&returnUrl=%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1734134409522%26quantidadePagina%3D1%26codigoRegistro%3D34949%2334949>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Despacho nº 408, de 9 de fevereiro de 2022**. Brasília: ANEEL, 2022. Disponível em:
<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp2022408.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Despacho nº 1.196, de 2 de maio de 2023**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em:
<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp20231196.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Despacho nº 4.558, de 28 de novembro de 2023**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em:
<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp20234558.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 729, de 28 de junho de 2016**. Brasília: ANEEL, 2022. Disponível em:
<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.html>. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Voto – Processo nº 48500.000402/2022-13**. Brasília: ANEEL, 13 set. 2022. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20222588_1.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Voto – Processo nº 48500.006222/2023-26**. Brasília: ANEEL, 28 nov. 2023. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20234558_1.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Voto – Processo nº 48500.001803/2023-71**. Brasília: ANEEL, 2 maio 2023. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20231196_1.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. **Mapa de resistividades (estudo técnico)**. Florianópolis: CELESC, 2016. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Mapa-de-Resistividades-CELESC.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2025.

CHINA. Administração Nacional de Energia - **DL/T 626-2015**: Regulamento para detecção de isoladores suspensos deteriorados. Pequim. DL/T, 2015. Disponível em: <https://www.biaozhuns.com/archives/20170325/show-164803-86-1.html> . Acesso em: 10 nov. 2025.

CIGRÉ. WG C4. **Quantifying the lightning response of tower-footing electrodes of transmission OHL**: methods of measurement. Paris: CIGRÉ, 2024. Disponível em: https://www.cigre.org/userfiles/files/News/2021/TOR-WG%20C4_69_Quantifying%20the%20lightning%20response%20of%20tower-footing%20electrodes%20of%20transmission%20OHL_methods%20of%20measurement-rev1.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

CONCEIÇÃO, D.; ALÍPIO, R.; PAES, R.; et al. **Lightning Backflashover Rate Estimation**: Sensitivity to the Cumulative Current Distribution and Tower-Footing Grounding Impedance. Energies, v. 16, n. 18, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/c5355b6f-c1df-4956-93e0-7eb5d6b1c2eb/content>. Acesso em: 6 nov. 2025.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do Brasil**. Brasília: Embrapa, [s.d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 6 nov. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2024**: Ano Base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesAquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

EPRI - Electric Power Research Institute (EPRI). **Understanding the Physics and PQ Impacts of Lightning**. Palo Alto: EPRI, 2024. Disponível em: <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000000001019461/0/Product> . Acesso em: 6 nov. 2025.

G1. **[Fotografia de torres de transmissão de energia]**. 2025. Disponível em: [https://s2-g1.glbimg.com/-Kcs3iAGPy6qGAfDvDWuG1kmntU=/0x0:493x398/984x0/smарт/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2025/V/N/tYPgUdQbKnfYo7Xpg67Q/torres.jpg](https://s2-g1.glbimg.com/-Kcs3iAGPy6qGAfDvDWuG1kmntU=/0x0:493x398/984x0/smарт/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2025/V/N/tYPgUdQbKnfYo7Xpg67Q/torres.jpg). Acesso em: 6 nov. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomas**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html>. Acesso em: 6 nov. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomas brasileiros (Educa IBGE)**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomas-brasileiros.html>. Acesso em: 6 nov. 2025.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Relatório de rotas e áreas de concentração de aves migratórias no Brasil**: 3ª edição. Brasília: ICMBio, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/relatorio_de_rotas_e_areas_de_concentracao_de_aves_migratorias_brasil_3edicao_2019.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60168**: Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1 000 V. Geneva: IEC, 2001.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60273**: Characteristics of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1 000 V. Geneva: IEC, 1998.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60383-1**: Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1 000 V – Ceramic or glass insulator units for a.c. systems – Definitions, test methods and acceptance criteria. Geneva: IEC, 2019.

IEC – International Electrotechnical Commission. **IEC 60815-1**: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles. Geneva: IEC, 2008. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/2229>. Acesso em: 14 abr. 2025.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61109**: Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria. Geneva: IEC, 2008.

IEEE - Institute of Electrical And Electronics Engineers. **IEEE Std 1243-1997** — IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. Nova Iorque: IEEE, 1997. Disponível em: <https://www.elecenghub.com/NewSamples/IEEE/139774799/IEEE-1243-1997-1.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2025.

KIZILCAY, M.; et al. **Backflashover Analysis for 110-kV Lines at Multi-Circuit Steel Towers**. In: International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2007. Lyon: IPST, 2007. Disponível em: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2007/07IPST054.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

LOOMS, J. S. T. **Insulators for high voltages**. London: The Institution of Engineering and Technology, 1988.

MAPBIOMAS BRASIL. **Coleções MapBiomass**: Cobertura e Uso da Terra (Coleção 10) e demais módulos. São Paulo: Rede MapBiomass, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas>. Acesso em: 6 nov. 2025.

MODENA, Jobson; SUETA, Hélio Eiji. **Medição da resistividade do solo: O Setor Elétrico**, n. 70, p. 30–35, 2011. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/01/Ed70_fasciculo_aterramentos_cap11.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

MODENA, Jobson; SUETA, Hélio Eiji. **Métodos normalizados para medição de resistência de aterramento: O Setor Elétrico**, n. 67, 2011. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2011/09/Ed67_fasc_aterramento_cap8.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O sistema em números**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Perturbação no Sistema Interligado Nacional – SIN no dia 10/11/2009 às 22h13min**. Brasília, 16 dez. 2009.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede: Módulo 15 – Submódulo 15.12** – Apuração mensal das parcelas variáveis aplicáveis à Receita dos Agentes de Transmissão. Rio de Janeiro: ONS, 2016. Disponível em: <https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2015%2FSubm%C3%B3dulo%2015.12%2FSubm%C3%B3dulo%2015.12%20-%202019.12.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede: Módulo 15 – Submódulo 15.16** – Apuração das Indisponibilidades e Restrições de Operação das Instalações da Rede Básica e Demais Instalações de Transmissão. Rio de Janeiro: ONS, 2016. Disponível em: <https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2015%2FSubm%C3%B3dulo%2015.6%2FSubm%C3%B3dulo%2015.6%202016.12.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Relatório anual 2023**. Rio de Janeiro: ONS, 2024. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2023-Relatorio-Anual-acessivel_21032024.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação. **Relatório de áreas de concentração de aves migratórias no Brasil (compilação regional)**. Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202303/07114430-relatorio-25876474-relatorio-migratorias-2022-opt.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2025.

SEDIVER. **CIGRE 2024 Aging Infrastructure Evaluation**. [S.I.]. Sediver, 2024. Disponível em: <https://www.sediver.com/wp-content/uploads/CIGRE2024-Aging-Infrastructure-Evaluation.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

VALLE, Daniel H. R. et al. **ANEEL decide, por unanimidade, que atos de sabotagem e queda de balões tripulados em ativos de transmissão não são**

passíveis de aplicação de PVI. CanalEnergia, 30 ago. 2022. Disponível em:
https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/08/Valle_2022_08_30.pdf
Acesso em: 13 nov. 2025

VARLI, Kübranur. **Maintenance of Composite Insulators:** Utility Perspective & European Initiative (Part 1 & Part 2). INMR, 7 nov. 2025. Disponível em:
<https://www.inmr.com/utility-perspective-on-maintenance-of-composite-insulators/>
Acesso em: 10 nov. 2025.

VOSLOO, W. L. ; MACEY, R. E. ; TOURREIL, C. de. **The practical guide to outdoor high voltage insulators**, 2004.

YADEE, P.; PREMRUDEEPREECHACHARN, S. **Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System.** In: International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2007. Lyon: IPST, 2007. Disponível em:
https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2007/07IPST110.pdf. Acesso em: 6 nov. 2025.