

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

LEANDRO HENRIQUE BONA PUCHALE

**METODOLOGIA PARA MITIGAÇÃO DE DESLIGAMENTOS  
INTEMPESTIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
CORRELACIONADOS A UMIDADE ELEVADA**

São Leopoldo

2019

Leandro Henrique Bona Puchale

Metodologia para mitigação de desligamentos intempestivos em linhas de transmissão correlacionados a umidade elevada

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 29 de abril de 2019

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira - UNISINOS

---

Dr. Andre Della Rocca Medeiros - ONS

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos (Orientador)

Visto e permitida a impressão  
São Leopoldo,

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira  
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

P977m Puchale, Leandro Henrique Bona.  
Metodologia para mitigação de desligamentos intempestivos em linhas de transmissão correlacionados a umidade elevada / Leandro Henrique Bona Puchale. – 2019.  
89 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, 2019.  
“Orientador: Dr. José Vicente do Canto.”

1. Isoladores e isolamentos elétricos. 2. Energia elétrica - Transmissão. 3. Falhas de energia elétrica. 4. Umidade. I. Título.

CDU 621.3

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Bruna Sant'Anna – CRB 10/2360)

*Aos meus filhos Henrique e Laura.*

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”  
Albert Einstein*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelas oportunidades e conquistas alcançadas.

A minha esposa Sibebe pela compreensão e apoio incondicional, além das importantes contribuições na revisão textual desse trabalho.

Ao amigo e professor Dr. Thair Ibrahim Abdel H. Mustafa, por todo o incentivo e apoio para eu realizar o curso e todas contribuições na realização desse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) – UNISINOS, em especial aos professores Dr. José Vicente do Canto (orientador desse trabalho) e Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira (coordenador do PPGEE).

Ao amigo e colega de empresa e de mestrado profissional Eng. Gustavo B. Vier pela ótima e essencial parceria ao longo desses dois anos de curso.

Ao apoio financeiro da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT através do projeto de P&D ANEEL PD-5785-4202/2015.

A equipe do projeto de P&D da Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB, coordenada pelo professor Dr. Thair Ibrahim Abdel H. Mustafa, cujos estudos antecedentes desenvolvidos tiveram fundamental importância para esse trabalho.

Aos profissionais das equipes de manutenção de linhas de transmissão da CEEE-GT, os quais tiveram papel fundamental na atividade de instalação dos isoladores, em especial ao colega Téc. Davi Santos dos Santos que coordenou essa atividade em campo.

Ao amigo e colega de trabalho Eng. José Eduardo M. Cereja pelas contribuições na revisão desse trabalho.

Aos demais colegas da CEEE-GT, em especial ao chefe do Departamento de Engenharia de Manutenção Eng. Fernando Timm Flores e aos colegas da Engenharia de Linhas de Transmissão.



## RESUMO

Esse trabalho versa sobre o desenvolvimento de metodologia para mitigar o problema de desligamentos intempestivos em linhas de transmissão, mais especificamente de natureza transitória, que ocorrem em regime normal de operação e condições climáticas não adversas. O referido problema é observado com maior intensidade em linhas de transmissão compostas por isoladores cerâmicos (vidro ou porcelana), durante os períodos climáticos mais úmidos. A hipótese analisada nessa dissertação é de que a capacidade de umedecimento desses isoladores possa ocasionar a formação de uma película d'água que, combinada com a contaminação na superfície do isolador, provoque o aumento da corrente de fuga ou a distribuição não uniforme de tensão elétrica na cadeia de isoladores, resultando na descarga disruptiva (*flashover*) momentânea pela mesma. Diferentes métodos desenvolvidos por pesquisadores, empresas e fabricantes são utilizados para melhorar o desempenho dos isoladores nessas condições. A aplicação de revestimento de silicone RTV (*Room Temperature Vulcanizing*) em isoladores de vidro é um método que já apresenta bons resultados em vários países. Esta prática alia a resistência mecânica e dielétrica dos isoladores cerâmicos à hidrofobicidade da superfície polimérica que repele a água, reduzindo assim a corrente de fuga e a consequente possibilidade de descarga disruptiva (desligamento forçado da linha de transmissão). O escopo desta pesquisa é analisar o desempenho da implantação de 4 (quatro) diferentes configurações de cadeias de isoladores com RTV numa linha de transmissão que opera em 230 kV, como solução para mitigar os desligamentos transitórios. O desempenho das novas configurações é avaliado mediante a comparação do número de desligamentos ocorridos nos locais de instalação de cada tipo de configuração, antes e depois da referida implantação. De um modo geral, os resultados obtidos com as novas configurações mostram a melhoria no desempenho, atrelado principalmente a eficácia do RTV frente a questão da umidade/contaminação. Além disso, durante a etapa de monitoramento da linha de transmissão verificou-se que alguns desligamentos transitórios têm ainda ocorrido, não pelo efeito umidade/contaminação da superfície dos isoladores, mas em função de um mecanismo peculiar causado por pássaros, o *bird streamer* (jato de excremento). Nesse contexto, a metodologia desenvolvida caracteriza-se pela aplicabilidade prática, e poderá servir de referência para a mitigação de desligamentos transitórios em linhas de transmissão de outras concessionárias do setor elétrico.

**Palavras chaves:** Desligamento. Falha Transitória. Linha de Transmissão. Descarga Disruptiva. Isolador. RTV.



## ABSTRACT

This work deals about the development of methodology to mitigate the problem of unplanned outage in transmission lines, more specifically of transitory nature, that occur in normal operation regime and non-adverse climatic conditions. This problem is observed with greater intensity in transmission lines composed of ceramic insulators (glass or porcelain) and during in wet conditions. The hypothesis analyzed in this dissertation is that the wetting ability of these insulators may cause the formation of a water film that, combined with the contamination on the surface of the insulator, results in momentary flashover in the string. Different methods developed by researchers, companies and manufacturers are used to improve the performance of insulators under these conditions. The application of RTV (Room Temperature Vulcanizing) silicone coating on glass insulation is a method that already shows good results in several countries. This practice combines the mechanical and dielectric strength of the ceramic insulators with the hydrophobicity of the water repellent polymer surface, thus reducing the leakage current and the consequent possibility of disruptive discharge (transmission line outage). The scope of this research is to analyze the performance of the implementation of four (4) different configurations of insulators string with RTV in a transmission line that operates in 230 kV as a solution to mitigate transient outages. The performance of the new configurations is evaluated by comparing the number of outages occurring at the installation locations of each type of configuration, before and after such deployment. In general, the results obtained with the new configurations show the improvement in performance, mainly reflecting the RTV's effectiveness in relation to humidity / contamination. In addition, during the line monitoring stage it was observed that some transient outages have still occurred, not due to the moisture / contamination effect of the insulators surface, but due to a peculiar mechanism caused by birds: the bird streamer. In this context, the methodology developed is characterized by practical applicability, and may serve as a reference for the mitigation of transient outages in transmission lines of other utilities in the electric sector.

**Keywords:** Outage. Transient Fault. Transmission line. Flashover. Insulator. RTV.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Isoladores utilizados em linhas de transmissão.....	29
Figura 2 – Detalhes construtivos de um isolador de vidro .....	30
Figura 3 – Detalhes construtivos de um isolador polimérico .....	30
Figura 4 – Passo e diâmetro de isolador de cerâmico.....	31
Figura 5 – Perfil típico de isoladores de vidro.....	31
Figura 6 – Distância de arco a seco (a) e distância de escoamento (b) de uma cadeia de isolador .....	32
Figura 7 – Comparação da atividade elétrica em cadeias de isolador de porcelana com baixa umidade (esquerda) e quando umedecidas (direita). .....	33
Figura 8 – Relação entre DDSE/DDNS e o correspondente nível de SPL para disco de isolador perfil normal .....	34
Figura 9 – Representação esquemática da ocorrência de <i>flashover</i> pela ação da poluição e umidade .....	37
Figura 10 – Cadeia de isoladores com <i>flashover</i> por poluição reproduzido em laboratório ....	37
Figura 11 – Cadeia de isoladores com presença de contaminação por excrementos de pássaros .....	38
Figura 12 – Comparativo da distribuição de tensão na cadeia de isoladores em condições de baixa e alta umidade .....	40
Figura 13 – Processo de lavagem de isoladores com linha de transmissão energizada .....	41
Figura 14 – Ângulos de contato característicos de material hidrofílicos e hidrofóbicos .....	43
Figura 15 – Guia de classificação para hidrofobicidade superficial de materiais poliméricos	44
Figura 16 – Perda e recuperação de hidrofobicidade em materiais de silicone.....	45
Figura 17 – Recuperação da hidrofobicidade após exposição a névoa salina.....	45
Figura 18 – Graxa de silicone: 01 (um) ano após a aplicação.....	46
Figura 19 – Isolador cerâmico recoberto com borracha de silicone RTV.....	46
Figura 20 – Ilustração da supressão da corrente de fuga em isoladores recobertos com RTV testado em câmara de névoa salina.....	47
Figura 21 – Tensão de <i>flashover</i> de um isolador recoberto com RTV em função do DDSE...	48
Figura 22 – Aplicação de recobrimento de silicone RTV em isoladores de equipamento de subestação.....	49
Figura 23 – Aplicação de revestimento de silicone RTV em isoladores instalados em linhas de transmissão .....	50
Figura 24 – Detalhe da embalagem com caixa de papelão e plástico .....	50
Figura 25 – Fluxograma da metodologia.....	52
Figura 26 – Localização geográfica da LT 230 kV objeto de estudo.....	57

Figura 27 – Região característica da LT com a presença de umidade nas primeiras horas da manhã .....	57
Figura 28 – Cadeia de isoladores típica da LT e a poluição não uniforme dos isoladores localizados em diferentes pontos ao longo da cadeia .....	59
Figura 29 – Problema característico: indícios de <i>flashover</i> na cadeia de isoladores.....	60
Figura 30 – Meses do ano e número de desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017 .....	61
Figura 31 – Hora do dia e número de desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017 .....	61
Figura 32 - Correlação entre a umidade relativa do ar e número de desligamentos na LT objeto de estudo.....	62
Figura 33- Umidade relativa do ar e desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017 .....	63
Figura 34 – Silhueta de uma torre de suspensão típica da LT 230 kV UPME-CAM e suas distâncias de espaçamento de projeto.....	64
Figura 35 – Localização de falta estimada ao longo da LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2012 .....	67
Figura 36 – Substituição de cadeia de isoladores com técnica de trabalho para linha energizada .....	68
Figura 37 – Substituição de cadeia de isoladores com linha desenergizada .....	69
Figura 38 – Cadeia na configuração C3 e o detalhe da hidrofobicidade no recobrimento em RTV .....	69
Figura 39 – Registador de Perturbação por Ondas Viajantes instalado na LT UPME-CAM ..	70
Figura 40 – Procedimento para análise de desligamento forçados em LT .....	71
Figura 41 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C1 entre 2011 e 2018 .....	73
Figura 42 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C2 entre 2011 e 2018 .....	74
Figura 43 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C3 entre 2011 e 2018 .....	75
Figura 44 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C4 entre 2011 e 2018 .....	76
Figura 45 – Cadeia de isoladores retirada de serviço com presença de contaminantes na parte inferior dos discos.....	77
Figura 46 – Contaminação por excremento de pássaros .....	79
Figura 47 – <i>Flashover</i> causado por jato de excrementos de pássaros nas configurações C3 (a) e C4 (b).....	80
Figura 48 – Ilustração do <i>flashover</i> causado por jato de excrementos de pássaros ( <i>bird streamer</i> ) .....	81
Figura 49 – Dispositivo anti-pouso para evitar permanência de pássaros sobre a cadeia .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre isoladores cerâmicos e poliméricos .....	29
Tabela 2 – Distância de escoamento específica unificada recomendada em função do nível de poluição do local.....	32
Tabela 3 – Níveis de poluição e respectivo ambiente típico, conforme IEC/TS 60815-1 (2008). .....	35
Tabela 4 – Características básicas do isolador de vidro instalado na LT .....	58
Tabela 5 – Distâncias de escoamento específica unificada da LT UPME-CAM x IEC/TS 60815-1 .....	58
Tabela 6 – Número de desligamentos forçados na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017 .....	59
Tabela 7 – Causas dos desligamentos forçados na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017 .....	60
Tabela 8 – Características básicas do isolador de vidro perfil plano e perfil normal com RTV .....	64
Tabela 9 - Características técnicas das configurações de cadeia de isoladores.....	66
Tabela 10 – Locais de instalação das configurações C1, C2, C3 e C4.....	67
Tabela 11 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C1 .....	73
Tabela 12 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C2.....	74
Tabela 13 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C3.....	75
Tabela 14 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C4.....	76
Tabela 15 – Resultado da análise físico-química no isolador da amostra .....	78



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATH	Alumina Trihidratada
CA	Corrente Alternada
CAM	Camaquã
CC	Corrente Contínua
CEEE-GT	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DEEU	Distância de Escoamento Específica Unificada
EPDM	Etileno Propileno Dieno Monomérico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Internacional de Eletrotécnica)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMR	<i>Insulator News and Market Report</i> (Notícias de Isoladores e Relatório de Mercado)
km	Quilômetro
kV	Quilovolt
LT	Linha de Transmissão
mg/l	Miligrama por litro
MI	Marco de Instalação
MPEE	Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica
NaCl	Cloreto de Sódio
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RS	Rio Grande do Sul
RTV	<i>Room Temperature Vulcanizing</i> (Vulcanizado a Temperatura Ambiente)
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPL	Severidade da Poluição Local
TS	<i>Technical Specifications</i> (Especificação Técnica)
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
UPME	Usina Presidente Médici



## LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
TD	Taxa de Desligamento (deslig./ano/km)
ND	Número de Desligamentos
P	Período (anos)
E	Extensão (km)
$Y_1, Y_2$	Conjunto de Dados
$\sigma_{Y1}, \sigma_{Y2}$	Desvios Padrões do Respectivo Conjunto de Dados
$Cov$	Covariância
$\mu_{Y1}, \mu_{Y2}$	Valores Médios dos Conjuntos de Dados



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Problema</b> .....	<b>23</b>
<b>1.2 Relevância do Trabalho</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3 Tema</b> .....	<b>25</b>
<b>1.4 Delimitação do Tema</b> .....	<b>25</b>
<b>1.5 Objetivos</b> .....	<b>25</b>
1.5.1 Objetivo Geral .....	25
1.5.2 Objetivos Específicos .....	25
<b>1.6 Estrutura da Dissertação</b> .....	<b>26</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>28</b>
<b>2.1 Isoladores para Linhas de Transmissão</b> .....	<b>28</b>
2.1.1 Detalhes construtivos .....	30
2.1.2 Principais características dos isoladores utilizados em linhas de transmissão .....	30
2.1.3 Condições ambientais: umidade e contaminação .....	33
<b>2.2 Mecanismos de descargas disruptivas em isoladores (<i>flashover</i>)</b> .....	<b>35</b>
2.2.1 <i>Flashover</i> por poluição e umidade .....	36
2.2.2 <i>Flashover</i> por distribuição não homogênea de campo elétrico .....	39
<b>2.3 Técnicas adotadas para solução de <i>flashover</i> em cadeia de isoladores</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4 Hidrofobicidade e o Revestimento de Silicone RTV</b> .....	<b>42</b>
2.4.1 Hidrofobicidade .....	42
2.4.2 Revestimento de silicone RTV .....	45
<b>2.5 Estado da arte do revestimento de silicone RTV</b> .....	<b>48</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1 Análise do problema</b> .....	<b>52</b>
3.1.1 Características da linha de transmissão .....	52
3.1.2 Características dos desligamentos forçados da linha de transmissão .....	53
3.1.3 Influência da umidade elevada .....	53
<b>3.2 Proposta de solução</b> .....	<b>54</b>
3.2.1 Premissas para aplicação da solução proposta .....	54
3.2.2 Novas configurações de cadeia com isoladores recobertos com RTV .....	54
<b>3.3 Definição dos locais de instalação e aplicação em campo</b> .....	<b>55</b>
<b>3.4 Análise do desempenho</b> .....	<b>55</b>
<b>4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA</b> .....	<b>56</b>
<b>4.1 Análise do problema para uma LT 230 kV</b> .....	<b>56</b>
4.1.1 Características da linha de transmissão – objeto de estudo .....	56
4.1.2 Características dos desligamentos forçados da linha de transmissão – objeto de estudo .....	59
4.1.3 Influência climática da umidade elevada na linha de transmissão – objeto de estudo .....	62
<b>4.2 Proposta de solução: melhoria da isolação com a aplicação de isoladores recobertos com RTV</b> .....	<b>63</b>
4.2.1 Premissas para aplicação da solução proposta .....	63
4.2.2 Novas configurações de cadeia com isoladores recobertos com RTV .....	64
<b>4.3 Definição dos locais de instalação e aplicação em campo</b> .....	<b>66</b>
4.3.1 Instalação da configuração C1 .....	68
4.3.2 Instalação da configuração C2 .....	68
4.3.3 Instalação da configuração C3 .....	68
4.3.4 Instalação da configuração C4 .....	70
<b>4.4 Análise do desempenho das novas configurações</b> .....	<b>70</b>
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1 Análise do desempenho de cada configuração</b> .....	<b>72</b>
5.1.1 Resultados da configuração C1 .....	72
5.1.2 Resultados da configuração C2 .....	73
5.1.3 Resultados da configuração C3 .....	74
5.1.4 Resultados da configuração C4 .....	75

<b>5.2 Evidências e constatações</b> .....	<b>77</b>
5.2.1 Análise laboratorial dos contaminantes presentes nas cadeias .....	77
5.2.2 <i>Flashover</i> por jato de excremento de pássaros ( <i>bird streamer</i> ) .....	79
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>84</b>
6.1 Trabalhos Futuros.....	86
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas de energia elétrica, as interrupções no fornecimento podem acarretar prejuízos aos usuários e a própria empresa concessionária, principalmente no caso de desligamentos intempestivos ou não programados causados por falhas de equipamentos ou componentes. De acordo com o Operador Nacional do Sistema – ONS (2016) – um desligamento não programado<sup>1</sup> pode ser de natureza permanente ou fugitiva (transitória). Em desligamentos de natureza transitória o retorno do equipamento ao serviço ocorre a partir do sucesso do religamento, sem a necessidade de reparo ou reposição de componentes. Em contrapartida, um desligamento de natureza permanente somente é restabelecido após as intervenções necessárias para a correção do problema, implicando em tempo de indisponibilidade de equipamentos e podendo acarretar cortes no abastecimento de energia elétrica. Esse fato é maximizado quando tratamos do sistema de transmissão de energia elétrica, uma vez que esse é responsável pela interligação de grandes blocos de energia entre a geração e os centros de cargas.

Desligamentos transitórios no sistema de transmissão, embora não sejam tão impactantes como os desligamentos permanentes, afetam a qualidade do fornecimento de energia elétrica e provocam solicitações nos componentes e equipamentos da instalação, como disjuntores, chaves seccionadoras e outros, devido as elevadas correntes de curto-circuito circulantes durante o intervalo de tempo de atuação da proteção.

Atualmente, a legislação aplicável ao setor elétrico brasileiro, especialmente às instalações sob responsabilidade de concessionárias de transmissão integrantes da Rede Básica, estabelece através da resolução normativa da ANEEL número 729 de 28 de junho de 2016 os requisitos de qualidade de transmissão de energia elétrica associada à disponibilidade das instalações (ANEEL, 2016). A referida normativa dispõe sobre valores de penalização severos às concessionárias de transmissão, por exemplo, um desligamento não programado devido uma falha tem um custo na ordem de 20% da receita mensal por cada hora indisponível da função transmissão. Ou seja, independentemente se houver corte de carga a indisponibilidade de uma instalação de transmissão pode acarretar descontos financeiros significativos, dessa forma, a concessionária é obrigada a manter níveis de disponibilidade altíssimos sob pena de perder grande parte da receita com descontos através da parcela variável por indisponibilidade ou multas aplicadas pelo agente regulador.

Adicionalmente, em ANEEL (2016) são estabelecidos os padrões de duração de desligamentos (programado e outros) e os padrões de frequência de outros desligamentos com duração igual ou superior a 1 (um) minuto para linhas de transmissão e equipamentos. Por exemplo, para linhas de transmissão (LTs) com nível de tensão de 230 kV e extensão superior a 50 km o padrão de duração de desligamentos não programados é 1,5 horas/ano e o padrão de frequência é 3 (três) desligamentos não programados/ano.

Visando atingir os padrões de qualidade exigidos e evitar perdas de receita, as empresas concessionárias de transmissão de energia elétrica precisam identificar corretamente os fatores que influenciam nos índices de confiabilidade do seu sistema, e assim, planejar os investimentos necessários para um contínuo melhoramento, reduzindo a frequência e a duração de desligamentos não programados.

---

<sup>1</sup> Neste trabalho os termos desligamento “não programado”, “forçado” ou “intempestivo” têm o mesmo significado.

Conforme ANEEL (2017), no período de 1º de julho de 2015 a 30 de junho de 2016, ocorreram 3.771 desligamentos forçados em equipamentos e linhas de transmissão da Rede Básica e da Rede Complementar do Sistema Interligado Nacional – SIN, sendo que 76,1% desses desligamentos ocorreram em linhas de transmissão. Esses resultados da análise incluem desligamentos forçados automáticos ou manuais, independentemente de serem desligamentos permanentes ou transitórios.

O índice elevado de desligamentos de linhas de transmissão em relação a outros equipamentos (transformadores, banco de capacitores, barramentos, etc.) é explicado principalmente pela exposição a questões climáticas e ambientais, o que contribui para ocorrência de desligamentos, na sua maior, parte de natureza fugitiva devido a falhas de isolamento. Conforme Frontin (2010), um tema que tem sido amplamente abordado na literatura é com relação ao desempenho de isoladores de linhas de transmissão em situações de contaminação, tanto por poluição do ar, quanto por salinidade ou simplesmente devido ao efeito da umidade.

## 1.1 Problema

Dados da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT, concessionária de transmissão de energia elétrica que atua no Estado do Rio Grande do Sul (RS), apontam para um elevado número de desligamentos forçados de natureza transitória em linhas de transmissão sob sua concessão (138 e 230 kV), o que resulta num desempenho aquém do desejado de determinadas linhas de transmissão. Esse problema dos desligamentos transitórios na concessionária ocorre de longa data, conforme relatório interno elaborado por Rech (1983).

De modo geral, esses desligamentos transitórios costumam ocorrer devido a curtos-circuitos monofásicos para terra ao longo da linha de transmissão sob condição normal de operação, clima não adverso e período noturno. Historicamente, as equipes de manutenção da companhia têm enfrentado o desafio de identificar sua causa e estabelecer ações que pudessem reduzir ou mitigar esse tipo de ocorrência. Na maioria das vezes, as inspeções pós ocorrência não costumam encontrar evidências claras do problema e a causa é classificada como desconhecida ou indeterminada. Consequentemente, as ações de manutenção realizadas no passado, como por exemplo, melhoria de aterramento, aumento do número de isoladores na cadeia, dentre outras, não foram efetivas. Porém, os indícios de sinais de descargas em isoladores apontam que o problema se concentra nesse componente da linha de transmissão, quando associado a determinadas condições climáticas e ambientais.

Conforme Mustafa et al. (2012), os estudos de uma LT 230 kV específica da concessionária apontam a forte correlação dos desligamentos com a condição climática de umidade elevada. O tipo de clima encontrado no Estado do Rio Grande do Sul (RS) favorece a criação de condições de intensa umidade sustentada, especialmente no período de inverno, quando os desligamentos então se intensificam.

O problema é observado com maior intensidade em linhas de transmissão compostas por isoladores de vidro ou de porcelana, que embora sejam excelentes dielétricos e possuam boa resistência superficial às intempéries, apresentam um caráter hidrofílico. A hipótese analisada nessa dissertação é que a capacidade de umedecimento desses isoladores possa ocasionar a formação de uma película de água que, combinada com a contaminação na

superfície do isolador, resulte na descarga disruptiva (*flashover*<sup>2</sup>) momentânea pela cadeia de isoladores e o consequente desligamento da LT.

## 1.2 Relevância do Trabalho

O desempenho de uma linha de transmissão é fortemente influenciado pelos isoladores empregados, sendo que muitos desligamentos são decorrentes de problemas de isolamento associados as questões climáticas e ambientais, mais especificamente umidade e poluição. Esses fatores afetam o desempenho dos isoladores e são uma das causas mais significativa de ocorrência de desligamentos de natureza transitória em condições normais de operação da linha.

De acordo com artigos e trabalhos técnicos que referenciam esse estudo, quando contaminantes de diversas naturezas depositados na superfície dos isoladores são diluídos pela ação da umidade (orvalho, chuveiro ou nevoeiro), é criada uma solução condutora que pode levar ao *flashover* da cadeia. As normativas de projeto de linhas de transmissão atuais buscam levar em consideração o nível poluição da região para estabelecer uma isolamento compatível visando o bom desempenho das instalações. Entretanto, essa não é uma ciência exata e na prática observa-se que o desempenho de algumas linhas tem ficado aquém dos padrões estabelecidos pela regulação. Nessa situação, as alternativas de solução para o problema, em termos de dimensionamento e melhoria do projeto de isolamento, acabam ficando limitadas a premissas (características) do projeto original da linha de transmissão, principalmente no que se refere a distâncias elétricas entre parte energizada e aterradas.

O presente trabalho busca avaliar uma solução baseada na melhoria da isolamento de uma linha de transmissão existente, principalmente no que se refere ao aspecto da umidade. Para tanto, faz uso de uma prática ainda pouco aplicada no Brasil, mas que vem sendo bastante utilizada em vários países, que é a utilização de cadeias com isoladores de vidro ou de porcelana, revestidos com borracha de silicone RTV (*Room Temperature Vulcanizing* – vulcanizado à temperatura ambiente). Esta prática alia a resistência mecânica e dielétrica dos isoladores cerâmicos à hidrofobicidade da superfície polimérica que repele a água e retarda o aparecimento da corrente de fuga, evitando assim, uma descarga disruptiva (desligamento da LT).

Dentro desse contexto, o caráter inovador do presente estudo está em fazer uma análise do desempenho em campo de diferentes configurações de cadeias utilizando isoladores recobertos com RTV numa linha de transmissão que opera em 230 kV. O desempenho de cada tipo de configuração será avaliado mediante a comparação do número de desligamentos ocorridos nos locais de instalação antes e depois da implantação.

Para tanto, a metodologia desenvolvida caracteriza-se pela aplicabilidade prática e poderá servir de referência para a mitigação de desligamentos intempestivos de natureza transitória e que ocorrem em condições normais de operação, conforme caracterização do problema (item 1.1), em outras linhas de transmissão da concessionária ou mesmo de outras empresas do setor elétrico.

---

<sup>2</sup> Nome dado porque o curto-circuito é provocado por um arco voltaico (*flash*) que contorna (*over*) toda a cadeia de isoladores (BEZERRA, 2014)

### 1.3 Tema

Desligamentos intempestivos (não programados ou forçados) em linhas de transmissão de alta tensão.

### 1.4 Delimitação do Tema

Falhas transitórias em linhas transmissão por descarga disruptiva em cadeia de isoladores sob condições normais de operação e umidade elevada.

### 1.5 Objetivos

#### 1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é estabelecer uma metodologia para mitigar os desligamentos forçados transitórios em linhas de transmissão correlacionados a condição climática de umidade elevada, através da aplicação de isoladores de vidro recobertos com silicone RTV (*Room Temperature Vulcanizing* – vulcanizado à temperatura ambiente).

#### 1.5.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar os mecanismos de falhas que, associado a questão da umidade elevada, possam contribuir para que ocorra a falha de isolação na cadeia de isoladores;
- b) Analisar possíveis soluções para o problema de falha em isolação na cadeia de isoladores;
- c) Realizar estudo do perfil característico dos desligamentos de uma linha de transmissão de 230 kV, em relação as características da falta, sazonalidade, horário do dia e condições climáticas associadas;
- d) Implantar em campo a proposta de solução baseada na melhoria da isolação com a aplicação de isoladores de vidro recobertos com silicone RTV na linha de transmissão – objeto do estudo;
- e) Monitorar o desempenho e analisar os resultados da implantação de 4 (quatro) diferentes configurações de cadeias utilizando isoladores de vidro recobertos com silicone RTV.

## 1.6 Estrutura da Dissertação

No presente capítulo, faz-se uma apresentação do problema, da relevância do trabalho e dos objetivos pretendidos com o estudo. No capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica com as principais características dos isoladores que compõem as linhas de transmissão e a influência do nível de contaminação no dimensionamento das cadeias de isoladores. Também são apresentados os mecanismos de falha de isolamento em condições climáticas de umidade elevada e as possíveis técnicas para minimizar o problema do *flashover* em cadeias de isoladores, com foco na utilização de isoladores recobertos com silicone RTV. Na sequência do capítulo é abordada a questão da hidrofobicidade, especialmente do silicone e por fim, é apresentado o estado da arte na aplicação dos isoladores recobertos com RTV.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia proposta, descrevendo as 4 (quatro) partes principais que a compõe: análise do problema, proposta de solução, implantação em campo e avaliação do desempenho.

O capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia em uma LT 230 kV. Inicialmente são analisados os dados técnicos e o histórico de desligamentos forçados da LT objeto de estudo visando caracterizar o problema. A seguir é apresentado as quatro diferentes configurações de cadeias de isoladores compostas por isoladores com RTV (C1, C2, C3 e C4), as quais foram definidas para aplicação em campo nos locais definidos. Por fim é apresentado o procedimento para análise do desempenho em campo das novas configurações.

No capítulo 5 tem-se a análise dos resultados obtidos com a implantação da metodologia na LT objeto de estudo. São apresentados os resultados obtidos com as novas configurações de cadeias de isoladores C1, C2, C3 e C4, bem como as evidências e constatações obtidas com a etapa de avaliação do desempenho. Por fim, no capítulo 6 descreve-se as considerações finais do trabalho e sugere-se possíveis trabalhos futuros relacionados ao tema de estudo.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos que serviram de base para a execução deste trabalho, cujos temas fundamentam a proposta dessa pesquisa:

- Isoladores para linhas de transmissão;
- Mecanismos de descargas disruptivas (*flashover*);
- Hidrofobicidade e materiais hidrofóbicos.

Por fim é apresentado o estado da arte quanto a aplicação de isoladores recobertos com silicone RTV em linhas de transmissão, solução essa adotada como base para o desenvolvimento da metodologia para mitigar desligamentos intempestivos em linhas de transmissão.

### 2.1 Isoladores para Linhas de Transmissão

Conforme Fuchs (1977), os isoladores são os componentes da LT que permitem que os cabos condutores sejam mantidos isolados eletricamente das estruturas e ao mesmo tempo sejam suportados por elas. Estes isoladores devem suportar esforços mecânicos e elétricos de forma a garantir a integridade estrutural da linha de transmissão, assim como a continuidade do serviço. Os esforços mecânicos podem ser devido a cargas de trabalho constante ou eventuais devido a:

- Forças verticais: são aquelas compostas pelos pesos dos condutores e, para o caso de regiões frias, pelo peso da neve ou do gelo acumulado;
- Forças horizontais axiais: atuam no sentido longitudinal das linhas, sendo necessárias para manter os cabos suspensos;
- Forças horizontais transversais: surgem devido à ação do vento, atuando ortogonalmente aos cabos.

Já os esforços elétricos são em função de:

- Tensões nominais e sobretensões em frequência industrial;
- Sobretensões de manobra;
- Sobretensões de origem atmosférica.

O bom desempenho de uma LT está diretamente ligado ao seu isolamento. Fatores como: classe de tensão, surtos de tensão, resistência de aterramento, contaminação, incidência de descarga atmosférica, densidade relativa do ar e pressão atmosférica, devem ser levados em consideração para dimensionamento do isolamento da LT.

Em relação ao material construtivo, os isoladores empregados em LTs podem ser classificados como: cerâmicos (material dielétrico de vidro temperado ou porcelana vitrificada) ou poliméricos (silicone ou EPDM - Etileno Propileno Dieno Monomérico). A Figura 1 ilustra os isoladores de vidro, porcelana e poliméricos, comumente utilizados em linhas de transmissão.

**Figura 1 – Isoladores utilizados em linhas de transmissão**

Isolador de porcelana

Isolador de vidro

Isolador polimérico

Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

Os isoladores cerâmicos têm sido utilizados desde o século XIX e mostraram boa confiabilidade ao longo dos anos. Isoladores de vidro e de porcelana eram os únicos tipos disponíveis até a segunda metade do século XX, antes da introdução dos isoladores poliméricos. O desempenho em campo para ambas as classes de isoladores (cerâmicos e poliméricos) difere muito devido às propriedades do material. Conforme Kiessling et al. (2003) os isoladores cerâmicos não são afetados pela luz ultravioleta (UV), mas alguns materiais poliméricos são. A radiação UV da luz solar, a longo prazo, pode degradar as superfícies de isoladores de polímero.

A Tabela 1 a seguir, mostra o comparativo entre isoladores cerâmicos e poliméricos.

**Tabela 1 – Comparação entre isoladores cerâmicos e poliméricos**

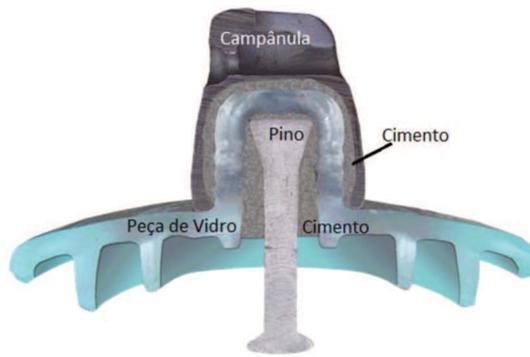
<b>Cerâmicos (vidro e porcelana)</b>	<b>Poliméricos</b>
Material é resistente a ultravioleta, degradação e ao envelhecimento.	Material suscetível à degradação e ao envelhecimento. Risco de fratura frágil do núcleo.
O material isolante é hidrofílico, que possui pior desempenho em ambiente de poluição.	O material possui boa hidrofobicidade. Melhor desempenho em ambiente de poluição.
Os isoladores de cerâmica são pesados e quebradiços e, portanto, exigem técnicas de manipulação cuidadosa.	O material é leve e resistente ao choque e é fácil de manusear.
Defeitos facilmente detectáveis na inspeção visual (vidro).	Defeitos ocultos e de difícil detecção.
Flexibilidade de uso e facilmente intercambiável com técnicas de linha viva.	Específico para cada nível de tensão e menor intercambiabilidade.
Atrativo/susceptível ao vandalismo.	Menos atrativo ao vandalismo.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Kiessling et al. (2003) e Garcia (2017).

### 2.1.1 Detalhes construtivos

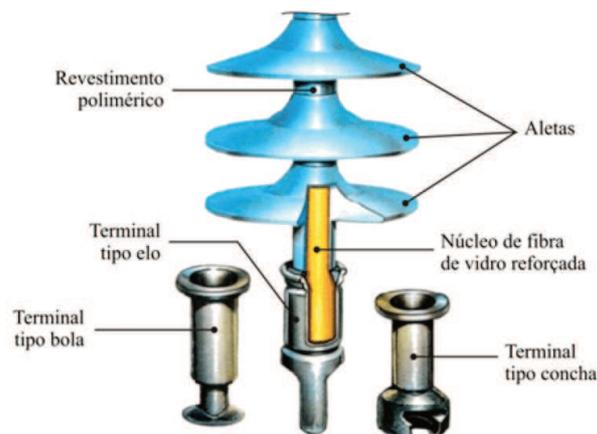
Basicamente, os isoladores para linhas de transmissão são constituídos de materiais isolantes combinados com acessórios metálicos, que possibilitam a ligação entre os próprios isoladores e/ou entre os isoladores e ferragens da parte energizada (condutor) ou ferragens da parte aterrada (torre). Os isoladores de vidro são compostos por 3 (três) partes básicas: campânula, dielétrico (vidro) e o pino (Figura 2), sendo que a cadeia de isoladores de vidro é formada pela associação de diversas peças de isoladores, de acordo com o nível de tensão da LT. Os isoladores poliméricos por sua vez, são formados por um núcleo de fibra de vidro, recoberto com o revestimento polimérico e ferragens terminais conforme o tipo de engate desejado (Figura 3).

**Figura 2 – Detalhes construtivos de um isolador de vidro**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

**Figura 3 – Detalhes construtivos de um isolador polimérico**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

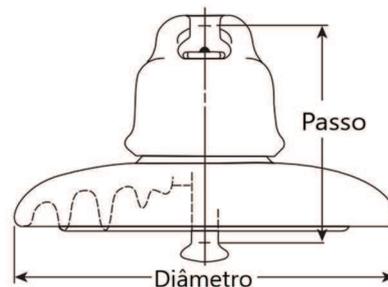
### 2.1.2 Principais características dos isoladores utilizados em linhas de transmissão

Dentre as características mínimas estabelecidas para os isoladores de LTs, de acordo com os organismos de normalização, algumas têm importante relação com o tema descargas disruptivas:

- Perfil do isolador (diâmetro, passo, formato, inclinação das saias, etc.);
- Distância de arco a seco;
- Distância de escoamento;
- Distância de escoamento específica.

**Perfil do isolador:** define as características básicas do isolador quanto a dimensões e o formato das saias, variam conforme a aplicação e as condições de poluição do local onde serão inseridos. A Figura 4 apresenta o diâmetro e o passo de um isolador cerâmico de perfil normal.

**Figura 4 – Passo e diâmetro de isolador de cerâmico**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

A Figura 5 ilustra os perfis típicos de isoladores de vidro atualmente empregados em linhas de transmissão. Destaca-se o perfil normal, o mais utilizado em linhas de transmissão, o perfil anti-poluição, recomendado para ambientes altamente poluídos devido sua maior distância de escoamento, e o perfil plano, que evita acúmulo de detritos devido a limpeza automática pela ação do vento, normalmente utilizado em regiões de deserto.

**Figura 5 – Perfil típico de isoladores de vidro**

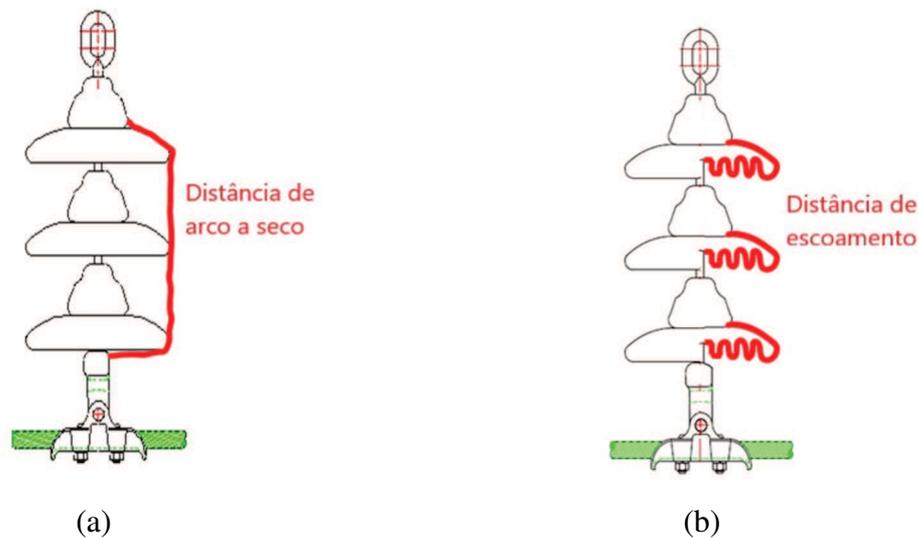


Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

**Distância de arco a seco** - É a menor distância no ar, externa ao isolador, entre as ferragens integrantes metálicas que normalmente estão submetidas à tensão de operação do sistema (GARCIA, 2017) – Figura 6(a).

**Distância de escoamento (DE)** - É a menor distância, ou a soma das menores distâncias, ao longo da superfície dielétrica dos isoladores submetida à tensão de operação do sistema (GARCIA, 2017) – Figura 6(b).

**Figura 6 – Distância de arco a seco (a) e distância de escoamento (b) de uma cadeia de isolador**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

**Distância de escoamento específica unificada (DEEU)** – Relação entre a distância de escoamento (DE) e o valor eficaz fase-terra<sup>3</sup> da tensão máxima de operação (GARCIA, 2017), conforme equação (1).

$$DEEU = \frac{DE}{Máx\ kV_{Fase-Terra}} \quad (1)$$

Quando do projeto de uma linha de transmissão torna-se necessário o conhecimento dos níveis de poluição das regiões do seu traçado, com o objetivo de estabelecer corretamente este parâmetro de tal forma a se obter o menor risco de falha em isoladores pelo acúmulo de contaminantes. A Tabela 2, a seguir, estabelece os valores de DEEU recomendados na norma IEC/TS 60815-1 (2008) – a qual fornece as diretrizes para o projeto e a seleção de isoladores a serem aplicados em áreas poluídas – conforme o nível da severidade de poluição do local (SPL).

**Tabela 2 – Distância de escoamento específica unificada recomendada em função do nível de poluição do local**

Nível de poluição (SPL)	Muito leve	Leve	Médio	Pesado	Muito pesado
DEEU (mm/kV <sub>Fase-T</sub> )	22	28	35	44	55

Fonte: IEC/TS 60815-1 (2008)

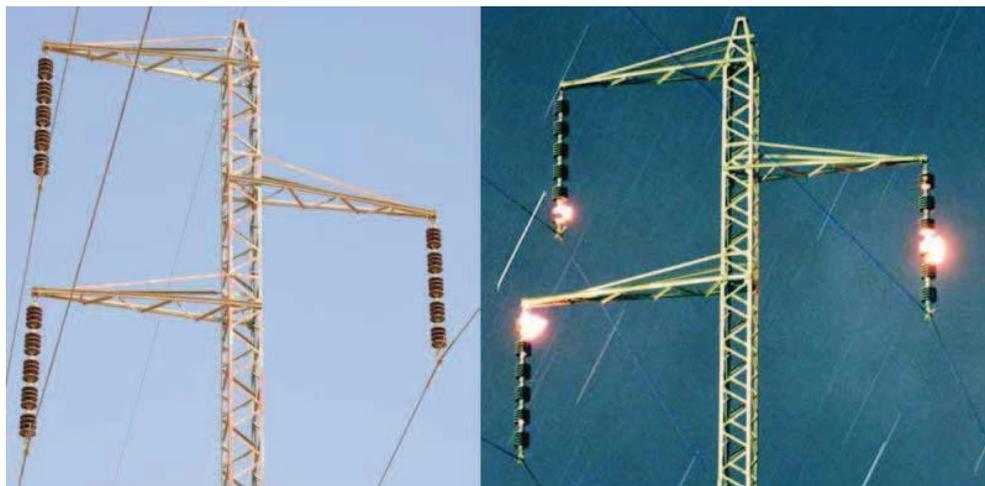
<sup>3</sup> O valor de tensão fase-terra foi adotado para cálculo desse parâmetro a partir da revisão da IEC 60815 [2008]. Na versão anterior da norma era adotado o valor fase-fase, por isso o termo “unificado” da versão atual.

### 2.1.3 Condições ambientais: umidade e contaminação

Conforme Mello et al. (2001), a suportabilidade dielétrica de uma superfície isolante se reduz, substancialmente, quando submetida a determinadas condições climáticas de alta umidade. Tal redução pode se tornar mais acentuada quando a superfície isolante é exposta a um ambiente poluído. O processo de umidificação dissolve os sais contidos na camada de poluição, parcial ou totalmente, ocasionando a formação de arcos sobre a superfície e iniciando um processo que poderá culminar na descarga disruptiva (*flashover*) na cadeia. Além disso, os arcos formados geram ozônio (agente oxidante) – um dos responsáveis pela corrosão elétrica nos isoladores.

No caso de camadas de poluição com alta condutividade, associada a condições de umidade elevada, os isoladores podem estar sujeitos a *flashover* já em tensão operacional fase-terra. A Figura 7 ilustra um exemplo de cadeias de isoladores de porcelana de linha de transmissão submetida a duas condições de umidade distintas. Em baixa umidade não há qualquer atividade elétrica na cadeia, enquanto que em condições de umidade elevada há intensa atividade elétrica e alguns elementos já sofrem a ruptura dielétrica.

**Figura 7 – Comparação da atividade elétrica em cadeias de isolador de porcelana com baixa umidade (esquerda) e quando umedecidas (direita).**



Fonte: INMR Magazine (<http://www.inmr.com>, acessado em 19/01/2018).

Segundo Mello (2017), além da névoa, neblina e chuva, a formação de umidade na superfície do isolador ocorre principalmente por 3 (três) mecanismos: condensação, absorção e choque térmico.

A condensação sobre uma superfície ocorre quando a temperatura na superfície cai abaixo da temperatura de ponto de orvalho. A umidificação devido à condensação do orvalho é uma das principais causas de descarga disruptiva nos isoladores em serviço. Quanto à absorção, os sais são higroscópicos e absorvem umidade quando a umidade relativa está acima de 80%. Consequentemente, os sais que cobrem a superfície do isolador podem começar a se umidificar antes da temperatura do ponto de orvalho. O choque térmico ocorre nas primeiras horas da manhã, antes do nascer do sol. A baixa temperatura da madrugada reduz a temperatura do isolador, principalmente os cerâmicos. Assim sendo a umidade ambiente matinal se condensa rapidamente sobre esta superfície resfriada.

De acordo com Kiessling et al. (2003), os fatores que influenciam na formação das camadas de poluição são:

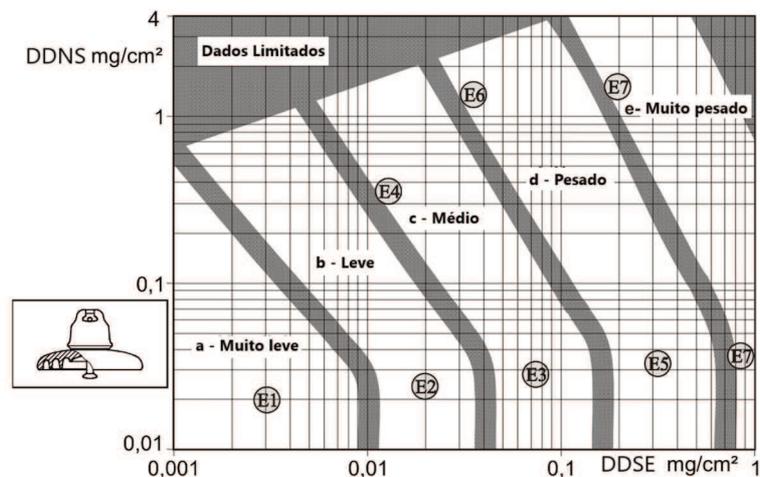
- Tipo e quantidade de materiais sólidos, líquidos ou gasosos no ar, juntamente com forças que afetam o movimento de tais materiais ou partículas;
- Perfil e condições do isolador que determinam a adesão dos materiais ou partículas nas superfícies isolantes, bem como a possibilidade de autolimpeza por vento ou chuva;
- Umedecimento das camadas de poluição.

A identificação de parâmetros que caracterizam o ambiente para que os mesmos possam ser usados para determinar o isolamento é um dos problemas fundamentais na etapa de projeto para permitir a correta seleção dos equipamentos a serem utilizados e reduzir o índice de falhas e custos de manutenção. Existe ampla faixa de condições possíveis que depende de cada tipo de ambiente (costeiro, industrial, agrícola e desértico), o que torna o processo bastante complexo.

A norma IEC/TS 60815-1 (2008) fornece diretrizes para uma avaliação dos 5 (cinco) níveis de severidade da poluição local (SPL). A determinação de parâmetros de poluição, segundo a referida norma, é importante para selecionar e dimensionar isoladores de acordo com o ambiente onde serão instalados, bem como para analisar um projeto específico, após um intervalo de tempo em serviço.

Há vários métodos de medição para uma definição quantitativa do nível de SPL, sendo que dependem, fundamentalmente, do tipo de poluição do local. Para locais com depósitos de componentes solúveis e não solúveis, o mais recomendado é o método de medição de DDSE (densidade de depósito de sal equivalente) e DDNS (densidade de depósito não-solúvel) da superfície de cadeias de isoladores. A Figura 8 apresenta a relação DDSE/DDNS correspondente a cada nível de SPL para isoladores de perfil normal. A norma IEC/TS 60815-1 (2008) ainda prevê fatores de correção para os diferentes perfis de isoladores.

**Figura 8 – Relação entre DDSE/DDNS e o correspondente nível de SPL para disco de isolador perfil normal**



Fonte: Adaptado de IEC/TS 60815-1 (2008).

A Tabela 3 apresenta a caracterização dos ambientes E1 a E7 apresentados na Figura 8 de uma forma qualitativa, entretanto, é recomendado sempre que possível, a medição dos

parâmetros de poluição conforme IEC/TS 60815-1 (2008) para uma melhor definição dos níveis de isolamento necessários.

**Tabela 3 – Níveis de poluição e respectivo ambiente típico, conforme IEC/TS 60815-1 (2008).**

Nível de poluição	Ambiente típico	Caracterização do ambiente típico
Muito leve	E1	Áreas distantes mais de 50 km do mar, deserto ou terra plana árida <sup>(a)</sup> . Áreas distantes mais de 10 km de fontes de poluição humanas <sup>(b)</sup> .
Leve	E2	Áreas distantes entre 10 a 50 km do mar, deserto ou terra plana árida <sup>(a)</sup> . Áreas distantes entre 5 a 10 km de fontes de poluição humanas <sup>(b)</sup> .
Médio	E3	Áreas distantes entre 3 a 10 km do mar, deserto ou terra plana árida <sup>(c)</sup> . Áreas distantes entre 1 a 5 km de fontes de poluição humanas <sup>(b)</sup> .
	E4	Mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E3, mas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• neblina densa (ou chuvisco) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses);</li> <li>• e/ou a presença de chuva forte com elevada condutividade;</li> <li>• e/ou existência de elevado valor da DDNS, entre 5 e 10 vezes o valor da DDSE;</li> </ul>
Pesado	E5	Áreas distantes menos de 3 do mar, deserto ou terra plana árida <sup>(c)</sup> ; Áreas distantes menos de 1 km de fontes de poluição humanas <sup>(b)</sup> .
	E6	Mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E5, mas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• neblina densa (ou chuvisco) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses);</li> <li>• neblina densa (ou chuvisco) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses);</li> <li>• e/ou existência de elevado valor da DDNS, entre 5 e 10 vezes o valor da DDSE.</li> </ul>
Muito pesado	E7	Dentro da mesma distância das fontes de poluição especificadas para áreas "pesadas" e: <ul style="list-style-type: none"> <li>• mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E5, mas:</li> <li>• diretamente submetida a borrifos de água do mar ou névoa salina densa;</li> <li>• ou submetida diretamente a contaminantes com elevada condutividade, ou poeira de cimento com elevada densidade e frequente umidificação por névoa ou chuvisco;</li> <li>• áreas desérticas com rápida acumulação de areia e sal e condensação regular.</li> </ul>

<sup>(a)</sup> Durante uma tempestade com ventos fortes, o nível de DDSE, nesta distância do mar, pode atingir um nível muito mais elevado.

<sup>(b)</sup> Presença de uma cidade grande terá influência por uma distância maior.

<sup>(c)</sup> Dependendo da topografia da área costeira e da intensidade do vento.

Fonte: Adaptado de IEC/TS 60815-1 (2008)

## 2.2 Mecanismos de descargas disruptivas em isoladores (*flashover*)

Atualmente, verifica-se na literatura que o mecanismo mais comum de *flashover* em cadeias de isoladores de linhas de transmissão sob condições normais de operação (ou seja, não relacionadas a sobretensões atmosféricas ou de chaveamento), é devido a contaminação da cadeia associado ao aumento da corrente de fuga na presença de umidade na superfície dos

isoladores. Casos específicos de *flashover* por contaminação são destacados, como por exemplo, relacionados à contaminação da cadeia por excrementos de pássaros, ou ainda por componentes de alta condutividade (áreas próximas a costa marítima).

Entretanto, há também uma proporção de *flashover* em isoladores que não podem ser facilmente atribuídas aos casos supracitados, pois ocorrem em isoladores com nível leve e não uniforme de contaminação, associados também a presença de umidade (normalmente névoa ou orvalho). De acordo com alguns autores, esse mecanismo de falha está relacionado à distribuição não uniforme de campo elétrico ao longo da cadeia de isoladores.

Nas seções seguintes são apresentados maiores detalhes dos mecanismos citados.

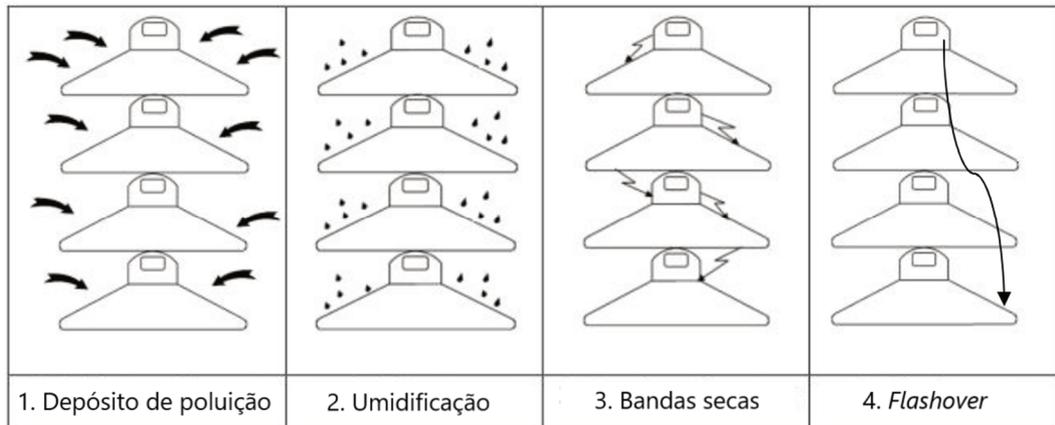
### 2.2.1 *Flashover* por poluição e umidade

Conforme Kiessling et al. (2003), na existência de camadas de poluição com alta condutividade os isoladores podem estar sujeitos a *flashover* já na tensão de operação. Poluição salina costeira, diversos tipos de poeira em áreas industriais como, por exemplo, de fábricas de cimento, siderúrgicas ou de usinas, areia do deserto, todos eles podem ter componentes altamente condutores quando umedecidos. Nas áreas agrícolas, os fertilizantes podem ser transportados pelo vento e se depositar nos isoladores. Todas essas precipitações sólidas ou líquidas podem acumular camadas de poluição no isolador que se tornam condutora em condições úmidas, reduzindo assim a capacidade de isolamento do dielétrico. Portanto, o comportamento do isolador na presença de tais camadas de poluição tem um significado decisivo do ponto de vista do desempenho.

De acordo com Abdelaziz et al. (2004), a macrodinâmica de formação de *flashover* por contaminação associado ao umedecimento da cadeia de isoladores seguem as etapas descritas abaixo, as quais estão ilustradas esquematicamente na Figura 9.

1. **Deposição de contaminantes:** correntes de ar levam poluição (micropartículas) à superfície do isolador. Essas camadas de poluição não têm efeito prejudicial, desde que permaneçam secas e, portanto, praticamente não condutoras.
2. **Umidificação da superfície:** a ação dos agentes umidificadores dissolve os contaminantes e forma um eletrólito condutor. Este eletrólito diminui a capacidade de isolamento e causa um grande aumento da corrente de fuga pela superfície dos isoladores da cadeia.
3. **Aquecimento ôhmico e formação de bandas secas:** a energia é dissipada pela corrente de fuga na forma de calor, o resultado é a evaporação da umidade. Devido à geometria do isolador a corrente tende a se concentrar em determinadas regiões (loais de menor secção reta), com isso, estas são secas mais rapidamente. A secagem não uniforme na superfície do isolador forma bandas secas, interrompendo o fluxo de corrente ao longo da superfície.
4. **Formação de arcos parciais e descargas disruptivas:** a tensão existente entre as bandas secas, que podem ter apenas alguns centímetros de altura, gera descargas no ar e a banda seca é ultrapassada por arcos elétricos. O *flashover* ocorre quando as descargas ultrapassam as regiões úmidas ainda existentes no isolador, ocorrendo inicialmente em alguns isoladores individuais, depois se desenvolvendo na cadeia completa.

Figura 9 – Representação esquemática da ocorrência de *flashover* pela ação da poluição e umidade



Fonte: Adaptado de Abdelaziz et al. (2004).

Em síntese, a atmosfera poluída favorece a formação de uma camada constituída por substâncias que, dissolvidas em água, produzem soluções condutoras sobre a superfície do isolador. Enquanto a camada mantém-se seca não há alteração no comportamento dielétrico, no entanto, durante um processo de umidificação em que os sais contidos na camada não sejam removidos podem ocorrer arcos sobre a superfície iniciando um processo que pode chegar a uma descarga disruptiva completa da cadeia (*flashover*) – Figura 10.

Figura 10 – Cadeia de isoladores com *flashover* por poluição reproduzido em laboratório



Fonte: INMR Magazine (<http://www.inmr.com>, acessado em 11/02/2018).

De acordo com Santos Filho (2007), os desligamentos não programados associados a *flashover* por contaminação em isoladores são normalmente de natureza temporária (transitória) e ocorrem principalmente nas primeiras horas da manhã quando existem maiores concentrações de umidade (orvalho ou neblina).

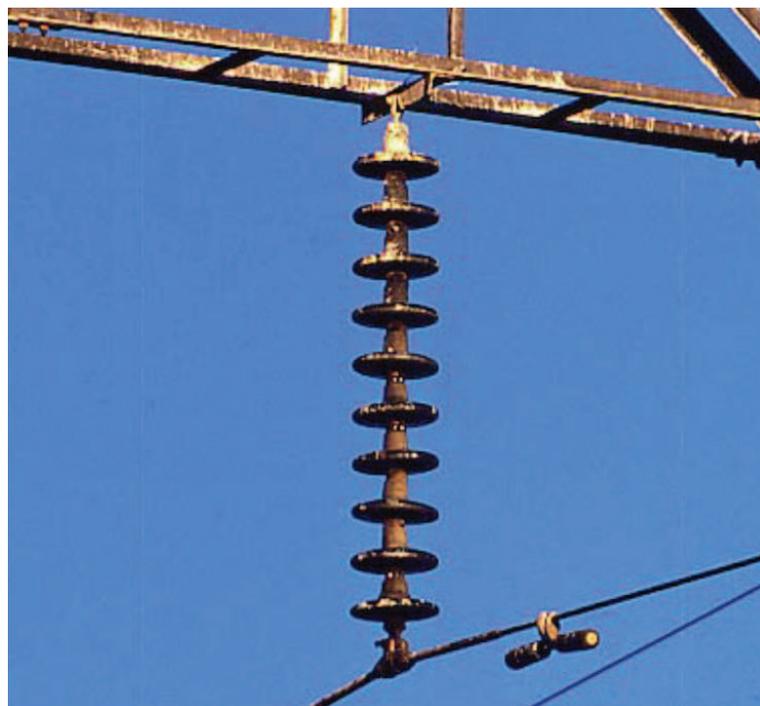
A natureza transitória do desligamento pode ser explicada pelas condições pré-falta e pós-falta serem diferentes. O próprio *flashover* é responsável por desumidificar a cadeia e retirar

depósito dos contaminantes, dessa forma ao atuar o religamento da LT o defeito inicial não existe mais, conseqüentemente o restabelecimento da linha ocorre com sucesso.

Destaca-se, ainda, a existência de casos particulares de *flashover* por poluição:

- **Flashover por contaminação instantânea de alta condutividade:** conforme a norma IEC/TS 60815-1 (2008), pode ocorrer também a contaminação instantânea de alta condutividade, a qual se deposita rapidamente sobre superfícies do isolador, resultando na condição em que o mesmo muda de um estado aceitável limpo e de baixa condutividade para *flashover* em um curto intervalo de tempo e depois retorna a um nível baixo de condutividade quando o evento passou. Aplica-se o mesmo processo descrito acima e ilustrado na Figura 9, entretanto, a poluição instantânea é normalmente depositada como uma camada altamente condutora de eletrólito líquido, por exemplo, névoa salina ou ácido industrial, assim o processo começa na fase “2” e pode avançar rapidamente para a fase “4”. Na natureza, essas fases não são distintas, mas elas se fundem. Esta situação refere-se apenas a superfícies hidrofílicas (isoladores cerâmicos). As áreas com maior risco são aquelas situadas perto de plantas químicas, ou áreas próximas à costa.
- **Flashover por contaminação de excrementos de pássaros:** esse tipo de *flashover* é causado pelo acúmulo de excremento de pássaros sobre a cadeia ao longo do tempo. Os excrementos de pássaros, altamente condutivos sobre isoladores, sob condições de umidade reduzem a resistência de superfície de tal forma que a tensão nominal da linha facilmente estabelece um arco elétrico através dos isoladores, do mesmo modo que as outras formas de poluição destacadas anteriormente. A Figura 11 ilustra uma situação típica encontrada em campo de cadeia de isoladores com indícios de contaminação por excrementos de pássaros.

Figura 11 – Cadeia de isoladores com presença de contaminação por excrementos de pássaros



Fonte: INMR Magazine (<http://www.inmr.com>, acessado em 17/12/2019).

Cabe salientar que mesmo não causando um *flashover*, e conseqüentemente desligamento da LT, a corrente de fuga elevada e os arcos parciais diminuem consideravelmente a vida útil dos componentes metálicos afetados, tanto da própria cadeia de isoladores (corrosão de pino de isoladores), como do sistema de aterramento por onde escoam a corrente de fuga (corrosão em aterramento e pés de torre). Conforme Mello et al. (2001), a corrente de fuga é responsável pela corrosão eletrolítica no isolador, enquanto os arcos aceleram a corrosão atmosférica/galvânica devido a atividade elétrica na campânula e pino dos isoladores.

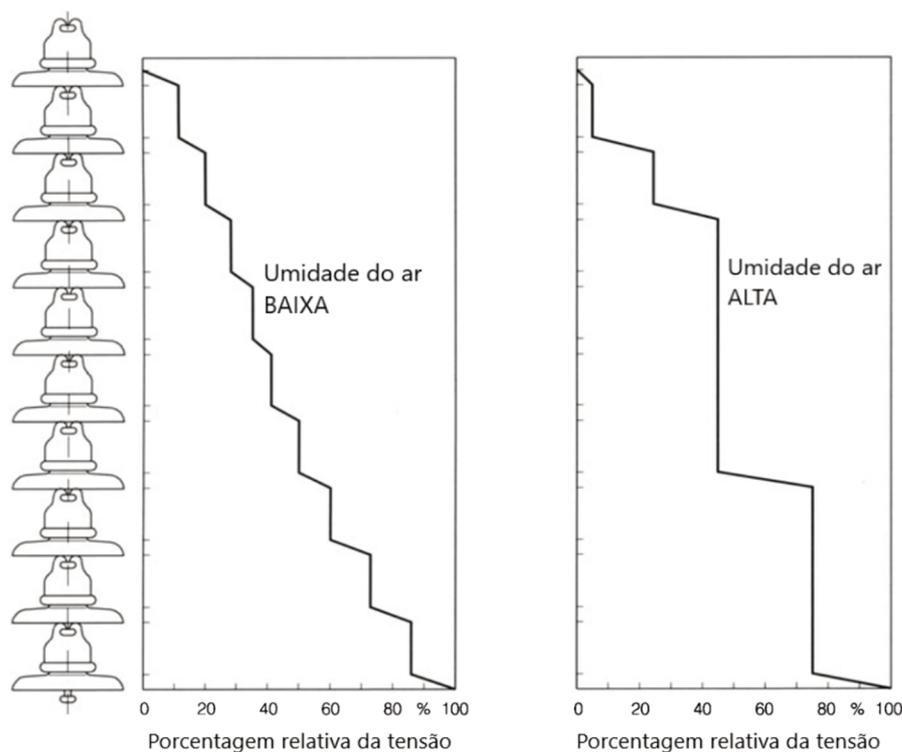
Por fim, pode-se afirmar que o problema da poluição é estudado de longa data e seu impacto nos isoladores de linha de transmissão é bem entendido, assim como as medidas pelas quais ele pode ser combatido.

### 2.2.2 *Flashover* por distribuição não homogênea de campo elétrico

O mecanismo de falha em questão é baseado numa particular combinação de umidade com o depósito de poluição leve e não uniforme na superfície dos isoladores. Essa condição provoca uma distribuição de tensão não homogênea ao longo da cadeia, concentrando a tensão nos isoladores menos úmidos (mais limpos), normalmente nos elementos da cadeia mais próximos do condutor, estressando eletricamente estes elementos de forma mais acentuada e criando um “ponto fraco” na cadeia, no qual pode se iniciar um processo de ruptura dielétrica (*flashover*). Na literatura alguns autores, como por exemplo Gorur et al. (1997), tratam o fenômeno em questão como um *flashover* repentino – do termo em inglês “*sudden flashover*”, ou ainda como um mecanismo desconhecido de *flashover*, do termo em inglês “*unknown flashover*”, conforme abordado por Gutman, Solomonik e Vosloo (2011) e Sklenicka (2015).

O efeito de níveis altos e baixos de umidade na distribuição de tensão numa cadeia de isoladores formada por discos de isoladores cerâmicos (vidro ou porcelana) é apresentado na Figura 12, conforme Kiessling et al. (2003). Observa-se que em condições de alta umidade a distribuição de tensão não diminui uniformemente ao longo da cadeia, influenciado, principalmente, pelo efeito da alta condutividade da camada de poluição. Por exemplo, se os isoladores do topo da cadeia estiverem mais poluídos, como normalmente se observa na prática, em condições de umidade elevada o potencial de terra transfere-se até os isoladores mais limpos e com maior capacidade de isolação. Nessas condições esses isoladores mais limpos estarão sob uma condição de estresse elétrico (diferença de potencial) que pode ser superior ao que ele pode suportar.

**Figura 12 – Comparativo da distribuição de tensão na cadeia de isoladores em condições de baixa e alta umidade**



Fonte: Adaptado de Kiessling et al. (2003)

Testes em laboratório realizados por Bologna et al. (2001) e Kleinhans (2005) demonstraram que, no caso de uma distribuição não uniforme de poluição, os isoladores menos poluídos irão ficar submetidos a um gradiente de tensão mais elevado, vindo a ocorrer a ruptura isolante da unidade submetida a essa condição e, posteriormente, podendo evoluir para o *flashover* completo da cadeia (embora este último ainda não comprovado em laboratório, em função das dificuldades de reproduzir as condições de campo).

Em Gutman, Solomonik e Vosloo (2011), também é sugerida a hipótese da não uniformidade de tensão ao longo da cadeia de isoladores como possível causa de *flashover*, baseado, principalmente, na experiência de serviço de empresas de alguns países como Suécia, Rússia e África do Sul, mesmo que essa teoria ainda não tenha sido totalmente confirmada em laboratório. Os autores citados recomendam ainda o uso de isoladores de borracha de silicone como uma possível maneira de solucionar o problema.

### 2.3 Técnicas adotadas para solução de *flashover* em cadeia de isoladores

Independentemente do mecanismo, o processo que leva ao *flashover* de uma cadeia de isoladores normalmente tem em comum a interação entre isolador, poluentes, umidade e a tensão aplicada. Com exceção da tensão, que é estabelecida pelas condições de operação da linha de transmissão, os demais fatores são passíveis de atuação. Nesse sentido, as principais técnicas adotadas na literatura são listadas a seguir:

- **Aumentar a distância de escoamento da cadeia:** atualmente uma distância mínima de escoamento (expressa em mm/kV) é adotada dependendo do grau de poluição existente, conforme preconiza a norma IEC/TS 60815-1 (2008). O aumento da distância de escoamento pode ser obtido simplesmente através do aumento do número de isoladores na cadeia, nesse caso, deve se ter atenção com relação redução da distância cabo solo e distâncias de espaçamento entre as partes energizadas e aterradas na torre. Outra possibilidade, mais recomendada, é a modificação do perfil do isolador da cadeia (plano ou antipoluição) que possibilitam maior distância de escoamento sem aumentar o tamanho da cadeia. Entretanto, mesmo com a utilização de grandes distâncias os *flashovers* nem sempre são evitados por completo.
- **Realizar lavagens periódicas da cadeia:** processo que tem por objetivo fazer a retirada da sujeira acumulada nos isoladores. Pode ser tanto através da retirada da cadeia com a linha energizada ou desenergizada, ou ainda através da lavagem com equipamentos de alta pressão sem efetuar a retirada da cadeia, com a linha energizada e utilizando água desmineralizada (Figura 13). O processo de lavagem além de dispendioso, também não soluciona por completo o problema, uma vez que o acúmulo de contaminantes se dá entre os períodos de limpeza.

**Figura 13 – Processo de lavagem de isoladores com linha de transmissão energizada**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

- **Utilizar isoladores poliméricos:** tem como vantagens a boa hidrofobicidade e, conseqüentemente, o melhor desempenho frente a questões de poluição e umidade. Possibilitam ainda ganho na distância de escoamento sem alterar a distância cabo-solo. A desvantagem desse tipo de isolador é que é menos confiável mecanicamente do que os isoladores de vidro, podem apresentar problemas internos de difícil detecção, vindo ao extremo de romper acarretando uma falha permanente da linha de transmissão.
- **Utilizar isoladores recobertos com esmaltes semicondutores:** a utilização de esmaltes semicondutores inibe a formação de arcos pelo aquecimento da superfície e, conseqüente, eliminação da umidade (PRETTE, 2006). O esmalte permite que uma pequena corrente flua, o que resulta em um aquecimento resistivo contínuo.

Isso tem uma tendência para manter grandes áreas da superfície do isolador secas, minimizando assim a corrente de fuga e reduzindo a atividade de arco que leva ao *flashover* (GORUR et al., 1995). Uma questão que por vezes surge com relação à utilização deste material diz respeito às perdas de potência decorrentes da corrente de fuga necessária para que se tenha o efeito resistivo e aquecimento de superfície, mas que segundo Prette (2006) são pequenas quando comparadas a outras, como por exemplo, o efeito corona na linha de transmissão. Do ponto de vista econômico, essa solução é restrita a poucos fornecedores, tornando-se bastante cara, quando comparada as demais alternativas.

- **Prevenir a formação de filme de água na superfície dos isoladores:** pelo fato dos materiais cerâmicos serem tipicamente hidrófilos, um filme de água é facilmente formado em sua superfície. A utilização de isoladores revestidos com superfície hidrofóbica repele as gotículas de água, o que dificulta a formação de uma película contínua condutora e a consequente passagem de corrente elétrica, mitigando assim, a ocorrência de *flashover*. Estes materiais podem ser aplicados na forma de graxas ou borracha de silicone RTV.

Todos os métodos mencionados acima podem ser bem-sucedidos em maior ou menor grau e a decisão de usar um método específico é normalmente baseada em fatores como características técnicas da instalação (número de isoladores, distâncias de elétricas), experiência da concessionária, localização e custos totais do ciclo de vida. O foco desse trabalho é estudar a alternativa que envolve a utilização de isoladores de vidro revestidos com borracha de silicone RTV, motivado pela experiência da concessionária em outras soluções, conforme será detalhado na seção 4.2.

## 2.4 Hidrofobicidade e o Revestimento de Silicone RTV

### 2.4.1 Hidrofobicidade

De acordo com Fontanella (2007), a tensão superficial de um líquido é causada pela força de atração entre as moléculas que o compõe. Na ausência de outras forças, essa força atrativa entre as moléculas faz com que o líquido coalesça em forma de uma gota esférica. Um líquido como água tende a se espalhar sobre uma superfície com alta energia superficial e a formar pequenas gotas sobre uma superfície de baixa energia superficial. Portanto, é necessária energia para superar a tensão superficial do líquido e essa energia vem da superfície na qual o repousa o líquido. Dessa forma, a razão fundamental pela qual a superfície dos isoladores cerâmicos é facilmente umedecida é porque elas têm alta energia superficial, o que significa que a umidade tende a se espalhar formando uma película ao invés de formar pequenas gotículas isoladas.

Conforme Farzaneh e Chisholm (2009), os materiais poliméricos possuem grandes moléculas que são fracamente ligadas pelas forças de *van der Waals*. Tem como desvantagem que eles podem se decompor a temperaturas moderadas de 300 a 500 °C. As desvantagens da ligação fraca e da mais baixa temperatura de decomposição comparada a outros materiais, entretanto, são compensadas por um baixo valor inicial de energia livre de superfície, que é hidrofóbica.

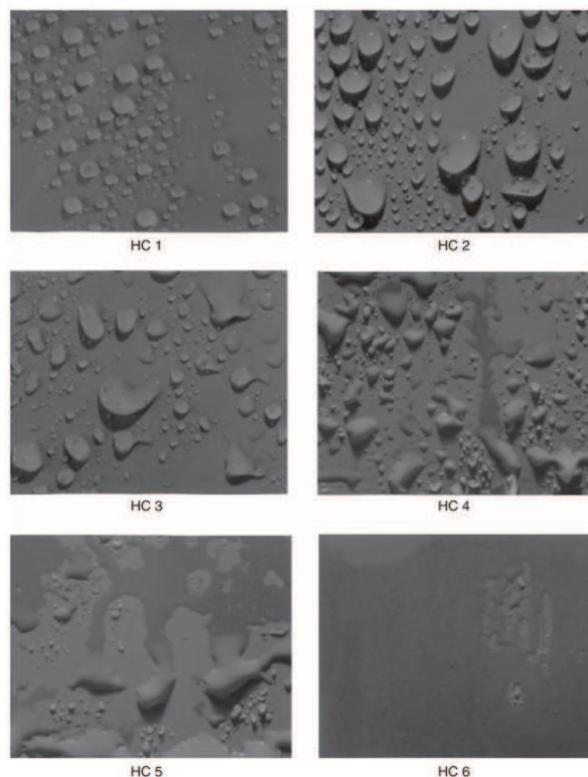
O método universalmente usado para determinar a hidrofobicidade de materiais é a medição de ângulos de contato entre as superfícies e uma gota d'água. A medição do ângulo de contato, formado por um líquido sobre uma superfície sólida, permite avaliar o umedecimento dessa superfície. Se esse líquido é a água, o ângulo de contato está diretamente relacionado com a hidrofobicidade da superfície (FONTANELLA, 2007). Quanto menor o ângulo de contato entre uma gota d'água e a superfície, maior o umedecimento, e o filme apresenta-se hidrofílico. Para ângulos elevados, o filme apresenta caráter hidrofóbico, repelindo as gotículas de água, evitando a formação de uma película contínua d'água na superfície. A Figura 14 apresenta os ângulos de contatos característicos de materiais hidrofílicos e hidrofóbicos.

**Figura 14 – Ângulos de contato característicos de material hidrofílicos e hidrofóbicos**



Fonte: CIGRE Brasil (Curso de Isoladores – 2017).

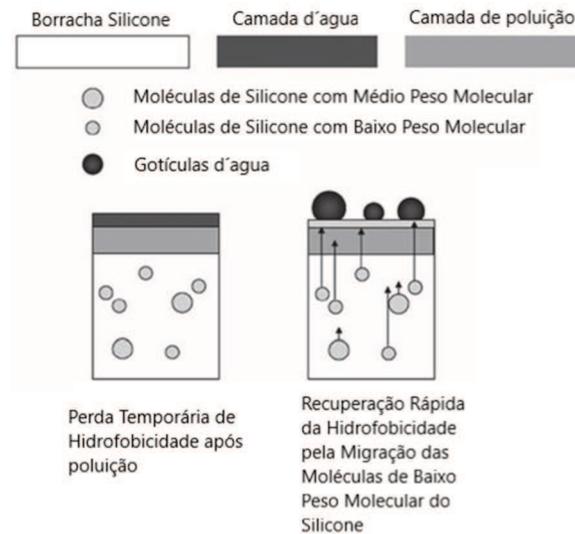
Os diferentes níveis de hidrofobicidade de materiais poliméricos são ilustrados na Figura 15, sendo que HC 1 corresponde a uma superfície que exibe uma característica hidrofóbica forte, enquanto HC 6 corresponde a uma superfície que é completamente hidrofílica. Esse método é uma maneira rápida e fácil de verificar a hidrofobicidade dos isoladores no campo.

**Figura 15 – Guia de classificação para hidrofobicidade superficial de materiais poliméricos**

Fonte: Farzaneh e Chisholm (2009).

Adicionalmente, conforme Farzaneh e Chisholm (2009), os melhores materiais isolantes de polímero, principalmente a borracha de silicone, tem a propriedade de recuperar rapidamente a perda temporária de hidrofobicidade que pode ocorrer devido a fatores como umidade, poluição, descargas elétricas ou radiação ultravioleta (UV). Essa propriedade decorre das características físicas do material polimérico, em que as cadeias de baixo peso molecular tendem a migrar continuamente para a superfície. Conforme ilustrado na Figura 16, a camada de poluição que causa uma perda temporária de hidrofobicidade acaba sendo “absorvida” pela migração das moléculas de baixo peso molecular do silicone para a superfície, restabelecendo a propriedade hidrofóbica do material.

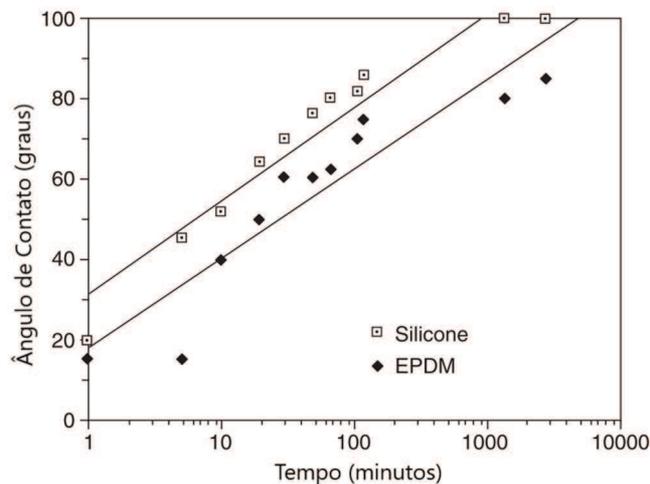
**Figura 16 – Perda e recuperação de hidrofobicidade em materiais de silicone**



Fonte: Adaptado Farzaneh e Chisholm (2009).

A Figura 17, apresenta os resultados obtidos em laboratório visando avaliar essa propriedade para o Silicone e do EPDM (Etileno Propileno Dieno Monomérico) que são os materiais comumente utilizados em isoladores. Destaca-se na referida figura a rápida capacidade de regeneração da hidrofobicidade do silicone, pela análise do ângulo de contato ao longo do tempo.

**Figura 17 – Recuperação da hidrofobicidade após exposição a névoa salina**



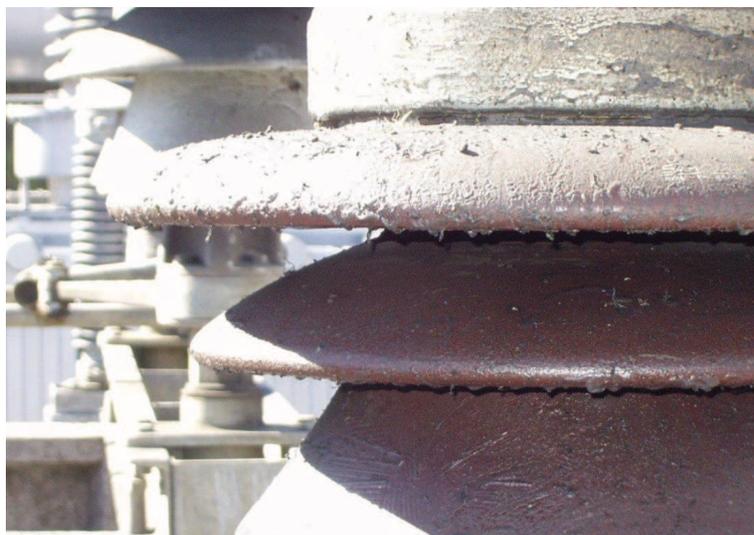
Fonte: Adaptado de Gorur, Chang e Amburgey (1990).

#### 2.4.2 Revestimento de silicone RTV

Como a hidrofobicidade é uma característica de superfície, os isoladores cerâmicos podem ter a sua característica de umedecimento alterada através da aplicação de um revestimento protetor de baixa energia superficial, o que torna a superfície repelente à água (hidrofóbica).

De acordo com Gorur et al. (1995), umas das primeiras técnicas desenvolvidas para melhorar a questão da hidrofobicidade de isoladores foi a aplicação de graxas a base de hidrocarbonetos ou silicone. Contudo, especialmente em ambientes com maior grau de contaminação, essa técnica exige frequentes reaplicações, envolvendo a remoção da graxa existente, o que costuma ser um trabalho demorado e com custos elevados de mão-de-obra. A Figura 18 ilustra a aplicação de graxa de silicone em um isolador de equipamento de subestação, após 01 (um) ano de sua aplicação. Outros compostos como ceras, tintas, lacas e vernizes também foram testados como revestimentos em isoladores cerâmicos. Mas o uso destes é bastante limitado devido ao desempenho a longo prazo. Eles são facilmente danificados em áreas de estresse elétrico elevado (efeito corona).

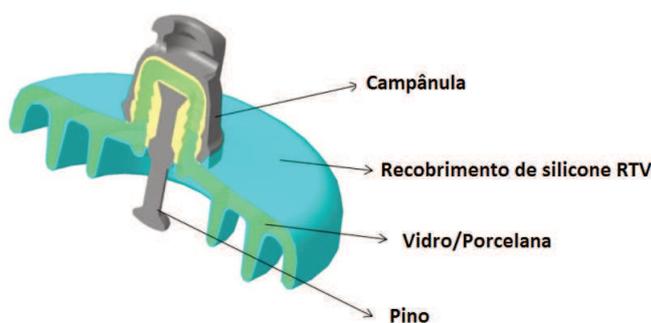
**Figura 18 – Graxa de silicone: 01 (um) ano após a aplicação**



Fonte: Santos Filho (2007).

A necessidade de um revestimento mais duradouro e com maior resistência à radiação ultravioleta e ao estresse elétrico, motivou o desenvolvimento do recobrimento de borracha de silicone vulcanizado à temperatura ambiente (RTV). A Figura 19 ilustra um isolador de disco cerâmico recoberto com RTV.

**Figura 19 – Isolador cerâmico recoberto com borracha de silicone RTV**



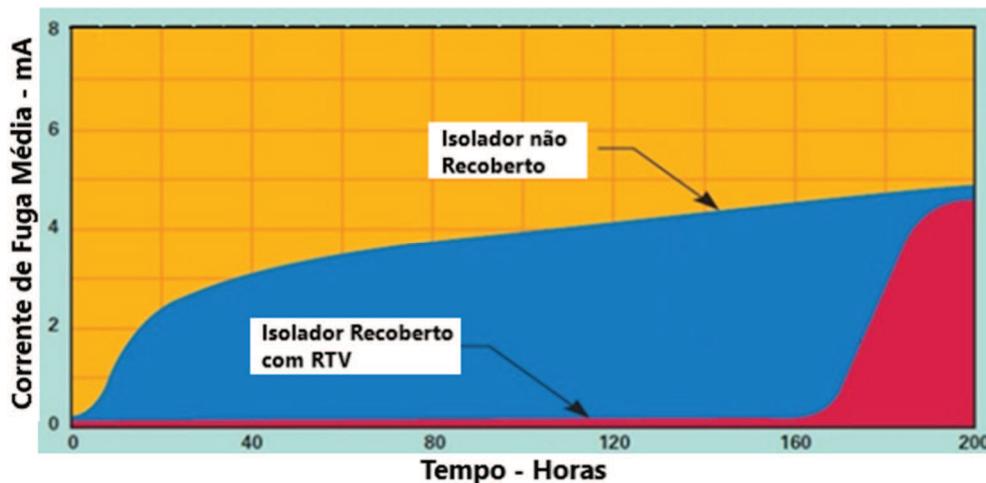
Fonte: Adaptado de Global Insulator Group ([www.gig-group.com](http://www.gig-group.com)).

A vulcanização é um processo de reticulação pelo qual a estrutura química da borracha, matéria-prima, é alterada. Conforme Cherney (1995), geralmente, as formulações dos revestimentos RTV são compostas pelo polímero polidimetilsiloxano (PDMS), reforçadas com

aditivos como a alumina trihidratada (ATH) e a sílica. As propriedades elétricas e físicas dos revestimentos RTV variam consideravelmente dependendo de sua formulação. Essas propriedades são, em grande parte, dependentes da quantidade ou do tipo de aditivo acrescentado e do grau de interligação entre o aditivo e a matriz polimérica. Três importantes propriedades necessárias para o bom desempenho dos revestimentos RTV são: a adesão da cobertura aos isoladores, a repulsão d'água e a resistência às descargas de banda seca. A capacidade de suprimir as correntes de fuga é a mais relevante característica em um revestimento RTV.

A supressão de correntes de fuga é totalmente regida pela natureza hidrofóbica da borracha de silicone. O efeito da maior hidrofobicidade sobre uma superfície isolante contaminada em condições de umidade será de maior resistência (menos condutiva), minimizando, assim, a corrente de fuga para níveis obtidos durante as condições secas. Um comparativo do comportamento da corrente de fuga em um teste em névoa salina para um isolador recoberto com silicone RTV e um isolador não recoberto é ilustrado na Figura 20.

**Figura 20 – Ilustração da supressão da corrente de fuga em isoladores recobertos com RTV testado em câmara de névoa salina**

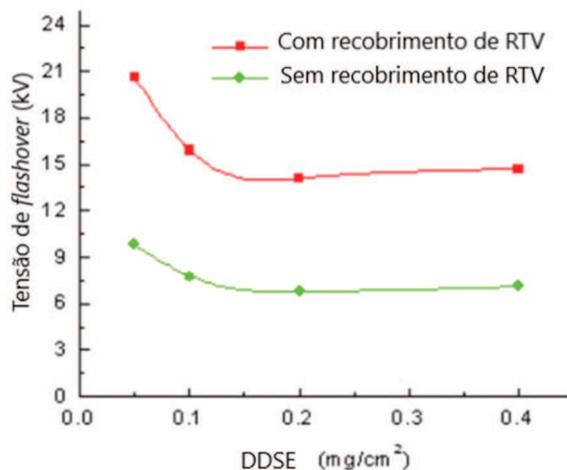


Fonte: Adaptado de Cherney (1995)

Observa-se que a corrente de fuga para um isolador recoberto com RTV é suprimida a valores próximo a zero por um período prolongado de horas sob teste. A Figura 20 também indica a perda de hidrofobicidade de um isolador revestido com RTV após 160 horas de teste em névoa salina. Conforme Cherney (1995), o umedecimento prolongado remove gradualmente o silicone livre da superfície e o revestimento perde sua propriedade hidrofóbica e, portanto, a capacidade de supressão da corrente de fuga. No entanto, durante o período seco, o fluido livre migra para a superfície e restaura a hidrofobicidade, conforme já ilustrado na Figura 16.

Em termos de suportabilidade à tensão de *flashover*, o efeito do recobrimento também pode ser avaliado. Conforme estudo realizado por Jia, Zhou e Wang (2002) a tensão de *flashover* de um isolador recoberto é praticamente o dobro de um isolador não recoberto para diferentes situações de contaminação (DDSE), ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Tensão de *flashover* de um isolador recoberto com RTV em função do DDSE



Fonte: Adaptado de Jia, Zhou e Wang (2002)

O revestimento RTV pode ser aplicado a isoladores cerâmicos por pulverização ou imersão. A aplicação pode ser feita *in loco* (pulverização) ou pré-revestido na própria fábrica dos isoladores ou em instalação especializada. A escolha do método de aplicação vai depender de cada situação. Não obstante, independentemente de como e onde é realizado o revestimento, é fundamental que alguns aspectos sejam considerados para um desempenho satisfatório a longo prazo dos revestimentos. Nesse sentido, o IEEE Standard 1523 (2002) é um guia desenvolvido para a aplicação, manutenção e avaliação de revestimentos RTV, baseado na experiência de utilização de RTV ao longo dos últimos anos. No referido guia são descritos métodos de aplicação *in loco*, aplicações pré-revestidas, problemas de manutenção em aplicações revestidas, fatores que afetam o desempenho a longo prazo, resistência à erosão, perda temporária de hidrofobicidade, envelhecimento, testes acelerados laboratoriais, isolamento parcialmente revestido e avaliação funcional ao ar livre.

## 2.5 Estado da arte do revestimento de silicone RTV

A aplicação de revestimentos de silicone RTV para isoladores de porcelana e de vidro em equipamentos de alta tensão é uma solução consagrada mundialmente e sua utilização é comum em áreas sujeitas à poluição industrial, névoa salina e/ou instalações litorâneas, com intuito de evitar a ocorrência de *flashover* em isoladores. De acordo com Cherney (1995), os primeiros testes em campo de utilização de RTV ocorreram em 1973 e as primeiras aplicações em larga escala, como produto comercial, ocorreram no final da década de 80.

Nos estudos de Cherney e Gorur (1999) são apresentados os resultados da experiência de algumas empresas localizadas nos Estados Unidos e no Canadá com a aplicação de RTV em isoladores de equipamentos de subestações realizado a partir de 1987. Em todos, exceto em alguns ambientes de extrema condição de contaminação, esses revestimentos duraram mais de 10(dez) anos sem manutenção e, quando foi necessária a manutenção a lavagem com água foi realizada em um cronograma significativamente reduzido. Os referidos autores abordam ainda as características importantes desses revestimentos e a atenção rigorosa que é necessária na sua aplicação, a fim de assegurar um bom desempenho.

No Brasil, há registro de uma das primeiras aplicações de RTV em nível mundial, a qual foi realizada em 1988 na Usina Hidrelétrica de Itaipu, para revestimento de buchas de 500 kV de transformadores de potência. Conforme Pisa (2012), a ocorrência de descargas disruptivas nas buchas dos transformadores causada pelo acúmulo de poluentes durante períodos de obra da usina motivou a aplicação do RTV, com isso a área de manutenção da Itaipu deixou de realizar as limpezas bimestrais e voltou a adotar a manutenção bienal com equipamento desligado, para inspeção e limpeza; manutenções quadrienais para realização de ensaios elétricos e verificações complementares. Desse modo, os transformadores operaram normalmente sem qualquer reincidência de descargas disruptivas externas nas buchas.

De acordo com Cherney et al. (2013), por muitos anos o revestimento de RTV foi visto como uma técnica de manutenção aplicada principalmente aos isoladores de equipamentos de subestações em que havia necessidade frequente de lavagem dos isoladores ou aplicação de graxas. No início, poucos isoladores de linha de transmissão foram revestidos. Conforme Pigni (2017), uma das razões pelas quais o uso em linhas de transmissão ficou relativamente limitado no passado foi devido ao trabalho de pulverização *in loco* ser realizado em altura e condições de campo que o tornavam um desafio para garantir a qualidade e a uniformidade do revestimento. O processo de aplicação de RTV por pulverização em isoladores de equipamentos de subestações e de linhas de transmissão estão ilustrados na Figura 22 e Figura 23, respectivamente.

**Figura 22 – Aplicação de recobrimento de silicone RTV em isoladores de equipamento de subestação**



Fonte: Santos Filho (2007).

**Figura 23 – Aplicação de revestimento de silicone RTV em isoladores instalados em linhas de transmissão**



Fonte: Zhidong et al. (2008).

A aplicação de RTV em linhas começou a ser mais difundida a partir da década de 90 com a utilização de isoladores pré-revestidos. Atualmente, os fabricantes de isoladores aplicam o revestimento na fábrica, ou em uma instalação separada que foi concebida para aplicar o revestimento RTV. Uma vez que o processo é realizado em ambiente controlado, pode-se obter melhor aderência e uniformidade do que a aplicação em campo, além disso, ensaios e testes garantem a qualidade da aplicação. Após o revestimento, os isoladores são adequadamente embalados e encaixotados (Figura 24) para evitar danos ao revestimento durante o transporte até a instalação dos mesmos.

**Figura 24 – Detalhe da embalagem com caixa de papelão e plástico**



Fonte: SEDIVER.

O estado da arte em 2013 em termos de aplicação de isoladores (pré-revestidos) com RTV em linhas de transmissão é apresentado em Cherney et al. (2013). Conforme os referidos autores, o uso de isoladores cerâmicos com RTV em linhas de transmissão tem sido utilizado principalmente em áreas costeiras e/ou de deserto, consideradas como condições extremas de contaminação. A experiência até a data da publicação do artigo foi muito boa em todos os lugares, com poucos problemas relatados. Destaca-se a seguir a experiência de alguns países:

- Catar: utiliza isoladores recobertos desde 1991, cuja aplicação do RTV eliminou a incidência de *flashover* e a necessidade de efetuar a lavagem dos isoladores que era realizada a cada 6 (seis) meses ou aplicação de graxas a cada 2 (dois) anos. Após este sucesso inicial, uma política foi estabelecida para que todas as novas linhas tenham isoladores de porcelana ou isoladores de vidro temperado pré-revestidos com RTV;
- China: iniciou as aplicações em larga escala dos revestimentos de RTV a partir de 1991. Atualmente, estão sendo usados em sistemas de Corrente Alternada (CA) e sistemas de Corrente Contínua (CC), e a classe de tensão de sua aplicação está na ampla gama de 10 a 500 kV. Em algumas áreas, como a cidade da província de Tianjin e Shandong, os revestimentos de RTV foram aplicados em quase todos os isoladores existentes de porcelana e de vidro;
- Estados Unidos da América: começaram a utilização de recobrimento de isoladores de porcelana no início dos anos 2000, principalmente em regiões costeiras onde eram aplicadas a graxa de silicone. Após as aplicações, não houveram registros de ocorrência de *flashover*, tampouco a necessidade de lavar isoladores;
- Itália: a empresa italiana TERNA aplicou primeiramente isoladores de vidro temperados pré-revestidos em 2003 para uma linha de transmissão de 380 kV ao longo de uma região costeira caracterizada por não haver chuva durante os meses de verão, exposição ao vento carregado com sal marinho e umedecimento por condensação no final da estação seca. A partir de 2005, o desempenho excepcionalmente bom de isoladores pré-revestidos levou a TERNA a expandir o uso de isoladores pré-revestidos para outras linhas de aproximadamente 57.000 unidades em 2005 para cerca de 528.000 unidades até o final de 2011. Ainda, desde a primeira instalação de isoladores pré-revestidos com RTV, a TERNA iniciou um programa de monitoramento, pelo qual, anualmente, conjuntos de isoladores de várias linhas localizadas em regiões poluídas, classificadas como pesadas e muito pesadas, foram removidos para testes laboratoriais com o objetivo analisar o comportamento de envelhecimento do revestimento.

Ainda conforme Cherney et al. (2013), algumas empresas como a peruana *Red del Energia del Peru*, SA (REP), que utilizaram na década de 1990 isoladores poliméricos para regiões de alto índice de poluição, tiveram problemas devido a falhas mecânicas nesse tipo de isolador (erosão da camada polimérica). Isso levou a referida empresa iniciar um processo de substituição dos isoladores poliméricos por isoladores de vidro pré-revestidos com isoladores RTV. Problema semelhante também é relatado em países do Golfo, onde o envelhecimento dos isoladores poliméricos tem levado a falhas mecânicas, com o completo de rompimento da cadeia de isoladores.

No Brasil a aplicação de revestimento RTV para isoladores em linhas de transmissão até o presente momento tem sido limitado ao caráter experimental. O único registro encontrado na literatura foi em Santos Filho (2007), referente a uma aplicação da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em 06 (seis) estruturas numa LT 138 kV em Minas Gerais, realizada no ano de 2001. Há relatos de fabricantes de aplicações no nordeste brasileiro, porém ainda sem registros na literatura técnica pesquisada no decorrer deste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo visa apresentar a metodologia utilizada no trabalho, a qual baseia-se em 4 (quatro) partes distintas, mas relacionadas entre si:

1. Análise do problema de desligamentos intempestivos na LT;
2. Proposta de solução;
3. Implementação da solução em campo;
4. Avaliação do desempenho da solução implantada.

De modo geral, a metodologia proposta consiste na análise dos dados disponibilizados por uma concessionária de energia elétrica, visando verificar o alinhamento do problema de desligamentos intempestivos em uma linha de transmissão, com a falha de isolamento conforme a fundamentação teórica apresentada no capítulo 2. A partir da análise dos dados é estabelecida a proposta de solução, e por fim parte-se para o viés prático do trabalho através a implantação em campo e a avaliação do desempenho das diferentes propostas de configurações de cadeias com isoladores de vidro recobertos com borracha de silicone RTV. A Figura 25 apresenta de forma resumida e ilustrativa as principais etapas da metodologia descrita.

**Figura 25 – Fluxograma da metodologia**



Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 3.1 Análise do problema

Esta etapa compreende a análise dos dados relevantes disponíveis objetivando a caracterização do problema com a fundamentação teórica apresentada. Destaca-se como fundamental a análise das características construtivas da LT, características dos desligamentos forçados e a influência climática (correlação com a umidade elevada).

##### 3.1.1 Características da linha de transmissão

Visa analisar as característica construtivas da linha de transmissão, com ênfase nos aspectos de isolamento: região na qual está inserida (influência do nível de poluição) e o nível de isolamento das cadeias sob a ótica da IEC/TS 60815-1 (2008).

### 3.1.2 Características dos desligamentos forçados da linha de transmissão

Objetiva analisar as causas e evidências encontradas em campo, distribuição estatística dos desligamentos ao longo dos meses do ano e os horários típicos. Os desligamentos característicos de falha de isolamento apresentam normalmente as seguintes características:

- Não apresentam uma causa externa evidenciada, normalmente identifica-se sinais de descarga em cadeia de isolador;
- Não apresentam impedância de falta significativa;
- São oriundos da atuação de proteção para faltas (curto-circuitos) monofásicas para terra;
- Normalmente, a operação da LT é restabelecida através do religamento automático após poucos milissegundos do distúrbio (natureza transitória);
- Ocorrem em clima não adverso e períodos de umidade elevada;

### 3.1.3 Influência da umidade elevada

Conforme verificado no capítulo 2, a condição de umidade elevada é fundamental para os mecanismos de *flashover* em cadeia de isolador. Nesse sentido a análise da condição climática visando confirmar essa condição durante o desligamento intempestivo é uma questão importante. Recomenda-se fazer essa análise com base em dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) obtidos na estação meteorológica mais próxima a LT objeto de estudo.

Pode-se ainda utilizar ferramentas matemáticas para avaliar o grau de correlação entre os desligamentos e parâmetros meteorológico. O fator de correlação pode ser obtido conforme definido por Miles e Shevlin (2001):

$$C(Y_1, Y_2) = \frac{Cov(Y_1, Y_2)}{(\sigma_{Y_1} \cdot \sigma_{Y_2})} \quad (2)$$

Onde  $Y_1$  e  $Y_2$  são dois conjuntos de dados,  $\sigma_{Y_1}$  e  $\sigma_{Y_2}$  são os respectivos desvios-padrão e  $Cov$  é a covariância, definida como:

$$Cov(Y_1, Y_2) = \frac{1}{N} \sum (Y_1(i) - \mu_{Y_1})(Y_2(i) - \mu_{Y_2}) \quad (3)$$

Onde  $\mu_{Y_1}$  e  $\mu_{Y_2}$  são os respectivos valores médios dos conjuntos de dados com  $N$  pontos para ambos.

De acordo com Miles e Shevlin (2001), o fator de correlação é +1 no caso de uma relação linear (correlação) direta perfeita (crescente), -1 no caso de uma relação linear (anticorrelação) decrescente perfeita (inversa) e qualquer valor no intervalo aberto (-1, 1) nos outros casos indicando o grau de dependência linear entre as variáveis. Quanto mais próximo de 0, mais fraca a correlação entre as variáveis (mais próximas de não correlacionados). Quando mais próximo de +1, mais forte a correlação entre as variáveis.

## 3.2 Proposta de solução

Considerando que a análise do problema, reforça a hipótese de que a causa dos desligamentos transitórios é decorrente de *flashover* momentâneos nos isoladores devido a combinação dos fatores umidade elevada e o depósito de resíduos de poluição, há duas maneiras de se atuar sobre o problema: evitar a contaminação do isolador ou evitar o efeito da umidade.

A contaminação das cadeias pode ser minimizada através de lavagens periódicas, ação essa que elimina o acúmulo de contaminantes na superfície do isolador. Entretanto, no caso da concessionária não parece ser a solução mais adequada, pois os isoladores já estão submetidos a um processo regular de autolavagem em função da chuva frequente, conforme índice de precipitação pluviométrica na região do estado do RS, com médias mensais entre 100 e 200 mm e média anual entre 1400 e 2000 mm, segundo dados disponíveis em Wrege et al. (2012).

Das soluções apresentadas na seção 2.2, no sentido de minimizar os efeitos da umidade e a conseqüente formação do eletrólito condutor na superfície do isolador, a estratégia adotada foi a substituição das cadeias originais por novas configurações com utilização de isoladores de vidro recobertos com silicone RTV, motivado em função de:

- O aumento do número de isoladores da cadeia por si só não foi efetivo, com base em estudos internos da própria concessionária realizados em Rech (1983);
- A experiência com a utilização de isoladores poliméricos apresentou históricos de falhas mecânicas (rompimento do isolador), o que ocasionaram falhas permanentes em outras linhas de transmissão da própria empresa concessionária;
- O isolador de vidro recoberto com RTV alia a resistência mecânica e dielétrica do isolador cerâmico ao melhor desempenho frente a umidade, devido a hidrofobicidade da camada polimérica.

### 3.2.1 Premissas para aplicação da solução proposta

Para uma LT em operação, há limitações no tamanho das cadeias em função do abaixamento do cabo condutor e as distâncias de espaçamento entre as partes energizadas e aterradas.

E ainda, considerando que os trabalhos de substituição de isoladores, normalmente, são realizados com a linha de transmissão energizada, deve-se evitar alterações significativas de tamanho entre a configuração existente e a nova configuração da cadeia, o que pode dificultar a execução dos trabalhos em campo.

### 3.2.2 Novas configurações de cadeia com isoladores recobertos com RTV

O uso de isoladores recobertos com RTV tem sido uma solução utilizada por muitas empresas para melhoria do desempenho de cadeias de isoladores de vidro ou de porcelana, conforme já apresentado no capítulo 2. Diversos artigos mostram os bons resultados obtido com a solução, entretanto, normalmente não é apresentado qual o tipo de isolador e a configuração de cadeias utilizadas.

A definição da configuração pode ser bastante ampla dada a gama de perfis de isoladores e as distâncias elétricas envolvidas (característica do projeto de cada LT). Por se tratar de um projeto de pesquisa, o trabalho procurou analisar configurações com cadeias totalmente formadas por isoladores recoberto com RTV e cadeias mista, com isoladores com RTV colocados em partes da cadeia (topo). O item 4.2 apresenta maiores detalhes das configurações utilizadas para a LT objeto de estudo.

### **3.3 Definição dos locais de instalação e aplicação em campo**

As novas configurações devem ser instaladas em trechos ao longo da LT para que se possa monitorar o desempenho e avaliar a eficácia de cada solução. Para definição dos trechos para implementação em campo, inicialmente, é importante determinar o perfil de ocorrências de desligamentos ao longo da referida LT. Nesse sentido, a informação do histórico da localização da falta é fundamental.

Normalmente, os dados de localização da falta baseiam-se em informações fornecidas pelos equipamentos de localização instalados nos terminais das subestações e pelo Registrador de Perturbações instalados na subestação. Além destas, utiliza-se a técnica de localização de faltas, oriundo das oscilografias disponíveis.

É importante que os locais de instalação de cada solução sejam suficientemente extensos para que se possa monitorar as ocorrências a partir da estimativa de localização de falta, observando-se o histórico de erro de localização da LT.

### **3.4 Análise do desempenho**

A análise do desempenho das novas configurações baseia-se em avaliar as ocorrências de desligamentos forçados (intempestivos) nos pontos onde foi instalado cada tipo de solução. Para tanto, as informações da análise de proteção são fundamentais, principalmente no que se refere a estimativa de localização da falta.

Visando garantir a precisão da análise, recomenda-se utilizar, além dos métodos tradicionais de localização de faltas, o Registrador de Perturbação por Ondas Viajantes. Essa tecnologia tem sido utilizada pelas concessionárias de transmissão como forma de melhorar a precisão de localização estimada da falha, bem como o tempo de atendimento por parte da manutenção. A precisão com esse método é na ordem de décimos percentuais, o que significa que para a LT de centenas de quilômetros, a estimativa de erro é na ordem de metros, portanto auxilia o trabalho de campo durante as inspeções pós ocorrência e possibilita melhor avaliação do desempenho de cada configuração.

Além disso, recomenda-se estabelecer um procedimento de análise de desligamentos forçados que envolva as áreas de engenharia de proteção, meteorologia, engenharia de LTs e equipes de campo. O procedimento deve estabelecer um fluxo de informações técnicas visando subsidiar as inspeções em campo para confirmar a causa dos desligamentos e os locais estimados do desligamento, resultando numa base de dados que possibilite analisar os resultados e atestar a eficácia das configurações propostas.

## 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo consiste na aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior com base nos dados disponibilizados por uma concessionária de energia elétrica do estado do Rio Grande do Sul (RS). Os dados são de uma linha de transmissão que opera em 230 kV e interliga as subestações da Usina Termoelétrica Presidente Médici e Camaquã.

### 4.1 Análise do problema para uma LT 230 kV

Os dados que foram utilizados no trabalho são delimitados a uma LT 230 kV específica, a qual será apresentada com mais detalhes na seção a seguir. Todavia, o problema de desligamentos intempestivos com características similares é encontrado, também, em outras linhas da concessionária.

#### 4.1.1 Características da linha de transmissão – objeto de estudo

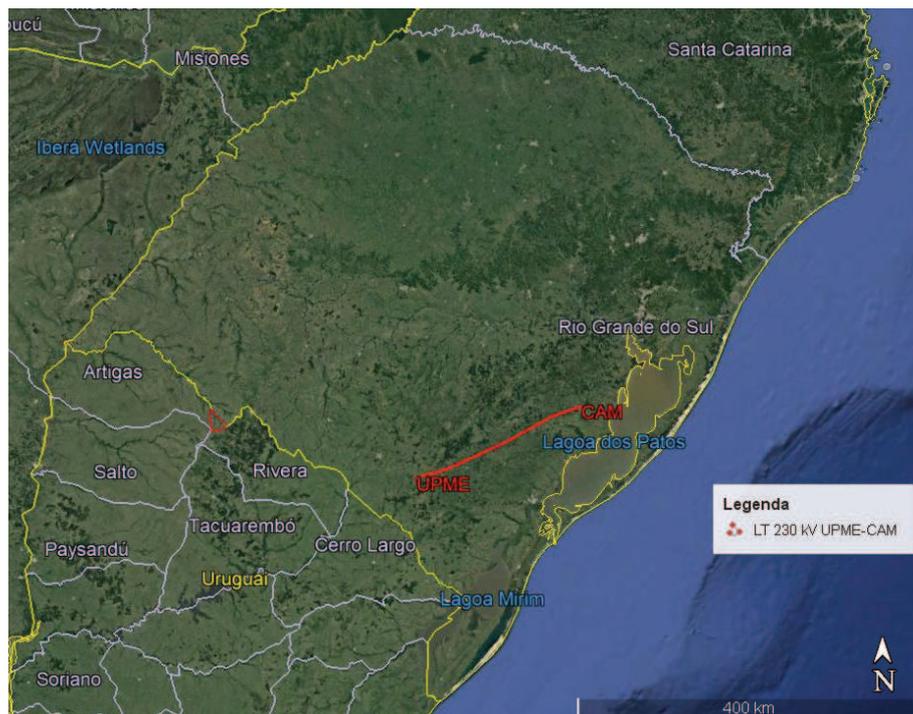
A linha de transmissão objeto de estudo situa-se no Estado do Rio Grande do Sul, interligando as subestações da Usina Termoelétrica Presidente Médici (UPME) e Camaquã (CAM) – doravante denominada LT UPME-CAM, cujas características construtivas são as que seguem:

- Tensão nominal de operação: 230 kV;
- Tensão máxima de operação: 245 kV;
- Ano de entrada em operação: 1974;
- Extensão da LT: 197 km;
- Total de estruturas: 427;
- Tipo de estrutura predominante na LT: metálica treliçada autoportante;
  - a. Ancoragens: 15;
  - b. Suspensão: 412;
- Disposição dos condutores na LT: predominantemente horizontal, com exceção de um trecho de 8,3 km com disposição vertical na chegada da subestação UPME;
- Cabo condutor: CAA 636 MCM, Grosbeak em configuração singela (01 condutor por fase);
- Cabo de cobertura: 2 x CAA 110,8 MCM Minorca;
- Cadeia de isoladores (configuração original da LT):
  - a. Suspensão: 13 discos tipo Normal
  - b. Ancoragem: 14 discos tipo Normal

A LT UPME-CAM situa-se entre 100 e 160 km do litoral, na mesorregião Sudeste Rio-Grandense (Figura 26). O relevo característico da região compreende um conjunto de

ondulações suaves a moderadas e cobertas por vegetação rasteira e herbácea, conhecidas como coxilhas, cujos níveis mais altos não ultrapassam muito além dos 500 m de altitude. As principais atividades econômicas são a agricultura, a silvicultura e a pecuária. A atividade industrial é resumida à Usina Termoelétrica no terminal de UPME e uma fábrica de cimento localizada aproximadamente a 1 km da LT UPME-CAM no ponto mais próximo, distante 13 km ao terminal de UPME. Destaca-se ainda, a presença de névoa e serração intensa, formando “bolsões” de umidade sustentada durante o período noturno até as primeiras horas da manhã, principalmente nos meses de inverno, conforme Figura 27.

**Figura 26 – Localização geográfica da LT 230 kV objeto de estudo**



Fonte: Google Earth e Mapa de LTs da CEEE-GT.

**Figura 27 – Região característica da LT com a presença de umidade nas primeiras horas da manhã**



Fonte: CEEE-GT.

Nesse contexto, a LT UPME-CAM é caracterizada por ambientes distintos ao longo de sua extensão. No que se refere a níveis de poluição, observa-se de forma qualitativa – baseado na distância às fontes de poluição (usina termoeletrica, fábrica de cimento), com base na Tabela 3 do item 2.1.3 – que varia de um nível leve (na sua maior parte da extensão) ao nível médio em localizações pontuais próximas as referidas fontes de poluição. Embora não seja o objetivo deste trabalho, é recomendável a medição quantitativa do nível de poluição conforme estabelece IEC/TS 60815-1 (2008).

Do ponto de vista do dimensionamento frente as questões de contaminação, as cadeias de isoladores existentes na LT UPME-CAM apresentam na sua configuração original 13 discos de vidro perfil normal com as características apresentada na Tabela 4, o que corresponde a uma distância de escoamento específica unificada (DEEU) de 29,41 mm/kV. Sob a ótica da IEC/TS 60815-1 (2008), as cadeias de isoladores estão dimensionadas para um ambiente de nível leve de contaminação (Tabela 5).

**Tabela 4 – Características básicas do isolador de vidro instalado na LT**

Perfil do isolador	Normal
Passo (mm)	146
Diâmetro (mm)	255
Distância de escoamento (mm)	320
Peso (kg)	4,0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

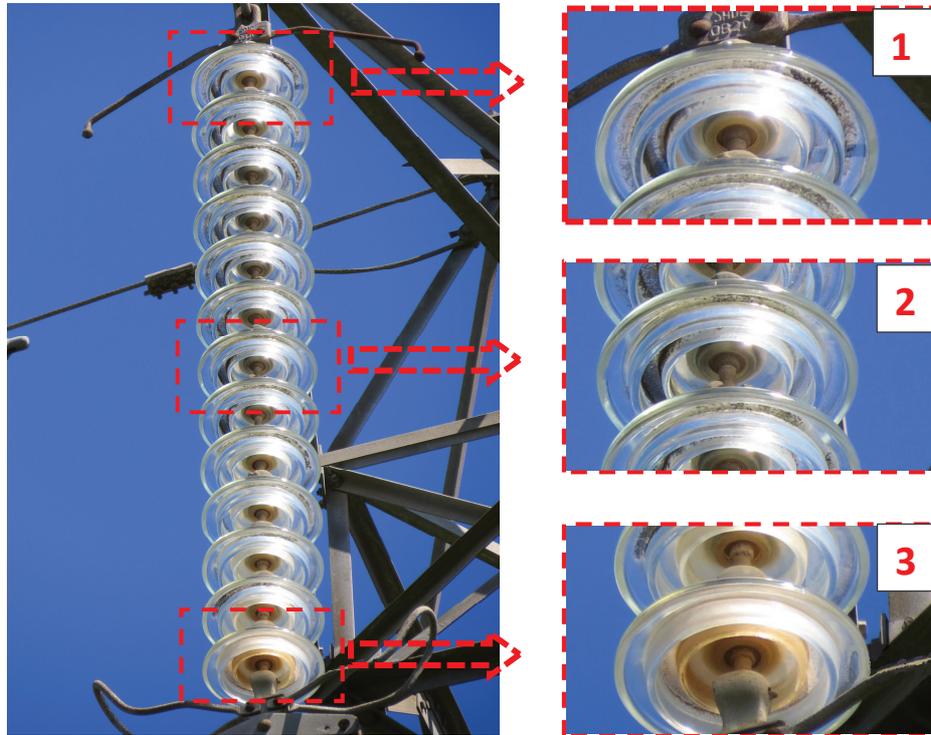
**Tabela 5 – Distâncias de escoamento específica unificada da LT UPME-CAM x IEC/TS 60815-1**

Nível Poluição	muito leve					leve					média					pesada					muito pesada																		
DEEU (mm/kV F-T)	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	DEEU Cadeias LT UPME-CAM																																						

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma cadeia de isoladores típica da LT UPME-CAM é apresentada na Figura 28. Observa-se que há um acúmulo de poluição não uniforme nos discos isoladores em função do processo de autolavagem que os mesmos estão submetidos (parte inferior do disco apresenta mais acúmulo de poluição). Outra constatação é que há diferentes graus de poluição nos isoladores ao longo da cadeia: isoladores localizados na parte superior (lado desenergizado – detalhe “1” na Figura 28) apresentam grau de contaminação maior do que os isoladores situados na parte intermediária (detalhe “2” na Figura 28) e na parte inferior da cadeia (lado energizado – detalhe “3” na Figura 28). Uma possível explicação para essa constatação é que os isoladores da parte inferior estão sob ação do campo elétrico mais intenso nessa parte da cadeia, ficando menos umedecidos que os isoladores da parte superior, consequentemente ocorrendo menor acúmulo de poluição nessas unidades.

**Figura 28 – Cadeia de isoladores típica da LT e a poluição não uniforme dos isoladores localizados em diferentes pontos ao longo da cadeia**



Fonte: CEEE-GT.

#### 4.1.2 Características dos desligamentos forçados da linha de transmissão – objeto de estudo

Para essa análise foi utilizado os dados de desligamentos forçados da LT 230 kV UPME-CAM disponibilizados pela concessionária para o período de 2011 a 2017, conforme resumo apresentado na Tabela 6.

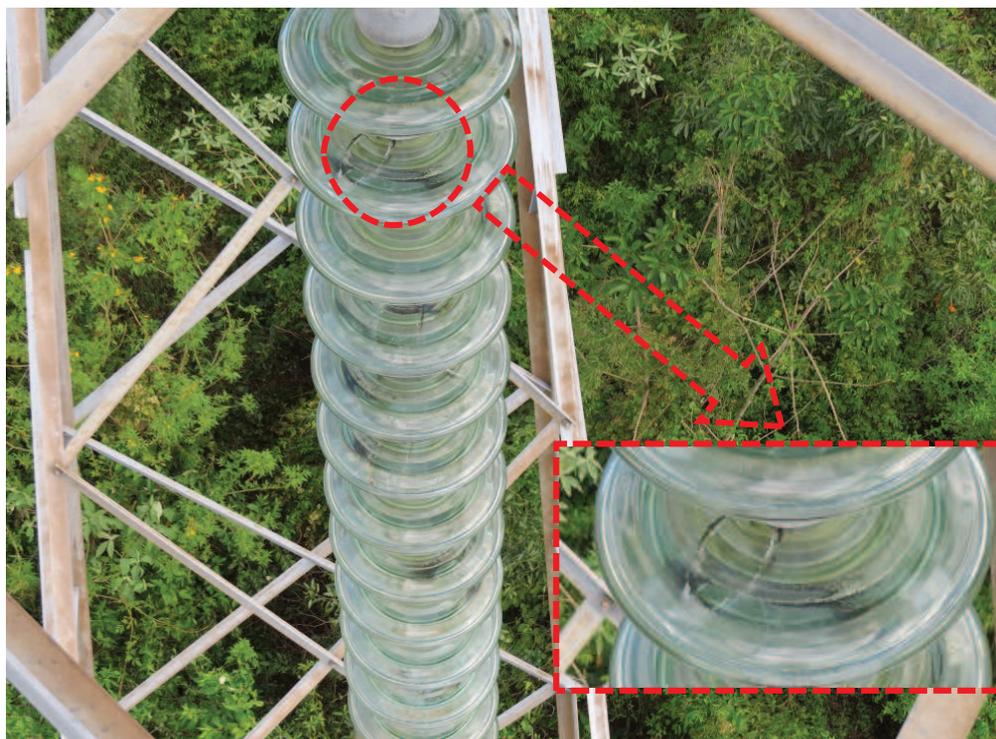
**Tabela 6 – Número de desligamentos forçados na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017**

Ano	Quantidade
2011	66
2012	54
2013	47
2014	59
2015	40
2016	45
2017	39
Total Geral	350

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inspeções pós-ocorrência, na maior parte das vezes, não identificam causas ou identificam apenas as cadeias isoladores com sinais de descargas (Figura 29), indicando que naquele ponto ocorreu um curto-circuito fase-terra (*flashover*) pela cadeia, mas sem evidências claras do que causou a ocorrência, o que leva o desligamento a ser classificado como indeterminado ou sem causa evidenciada.

**Figura 29 – Problema característico: indícios de *flashover* na cadeia de isoladores**



Fonte: CEEE-GT.

A Tabela 7 ilustra a classificação de causa para os dados de desligamentos forçados no período entre 2011 e 2017, conforme controle da equipe de engenharia de LTs da concessionária. Desligamentos “sem causa evidenciada” correspondem a 84,5% do total de desligamentos forçados na LT UPME-CAM.

**Tabela 7 – Causas dos desligamentos forçados na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017**

Causa	Quantidade	Percentual
Sem causa evidenciada	296	84,5%
Vegetação	21	6,0%
Pássaros (dejetos ou ninho)	17	4,9%
Temporal (vento ou descarga)	16	4,6%

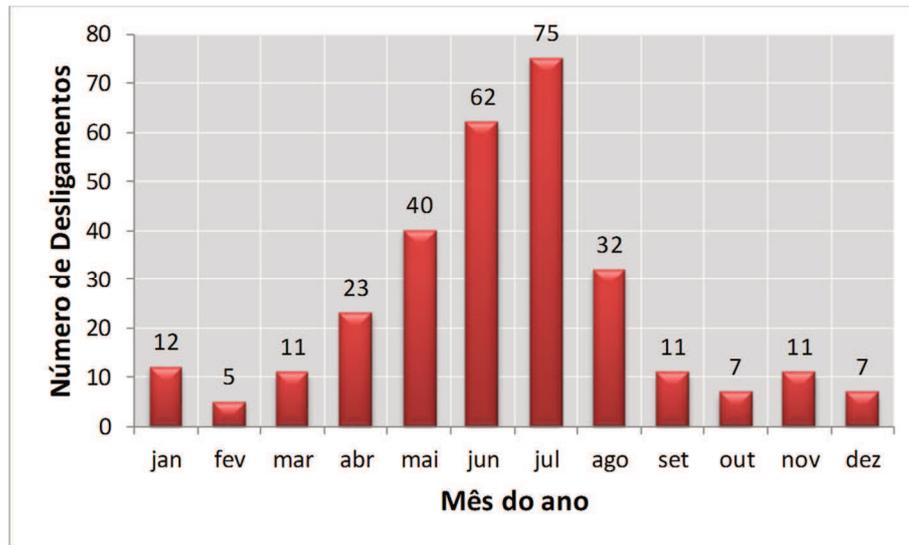
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos desligamentos listados na tabela acima como “sem causa evidenciada”, destaca-se algumas características comuns: **todos** são de natureza transitória, ocorrem em clima não adverso, não apresentam impedância de falta significativa, são oriundos da atuação de proteção para faltas (curto-circuitos) monofásicas para terra, que ocorrem em trechos diversos ao longo da LT UPME-CAM. Normalmente, a operação da LT é restabelecida através do religamento

automático após poucos ciclos (milissegundos) do distúrbio. Nesse sentido, esses desligamentos foram analisados sob o viés da hipótese de falha em cadeia de isoladores.

A sequência da análise é uma estratificação dos dados de desligamentos “sem causa evidenciada”. A Figura 30 apresenta a característica sazonal dessas ocorrências ao longo do ano: meses de inverno (maio, junho, julho e agosto) apresentam maior índice de ocorrência.

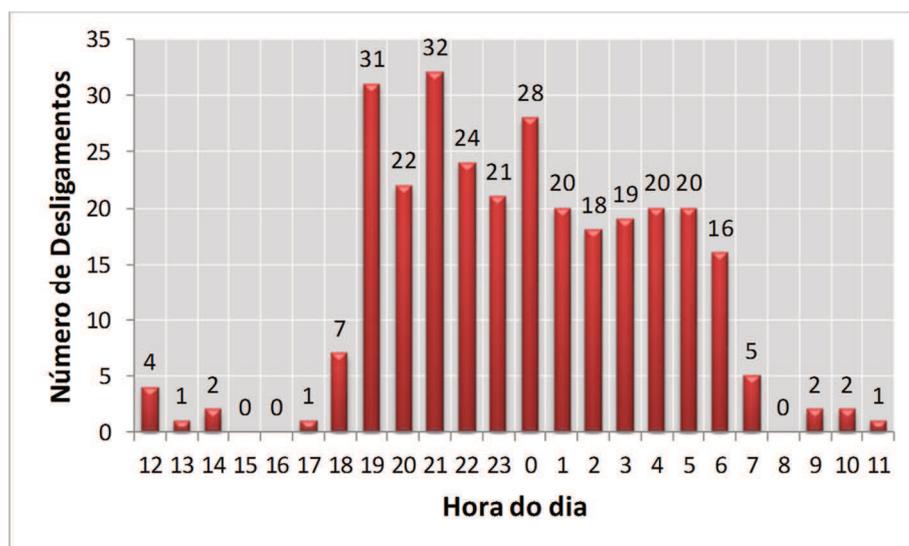
**Figura 30 – Meses do ano e número de desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 apresenta os horários característicos das ocorrências. Observa-se que mais de 90 % dos desligamentos ocorrem no período noturno: entre 19h e 6h.

**Figura 31 – Hora do dia e número de desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017**



Fonte: Elaborado pelo autor.

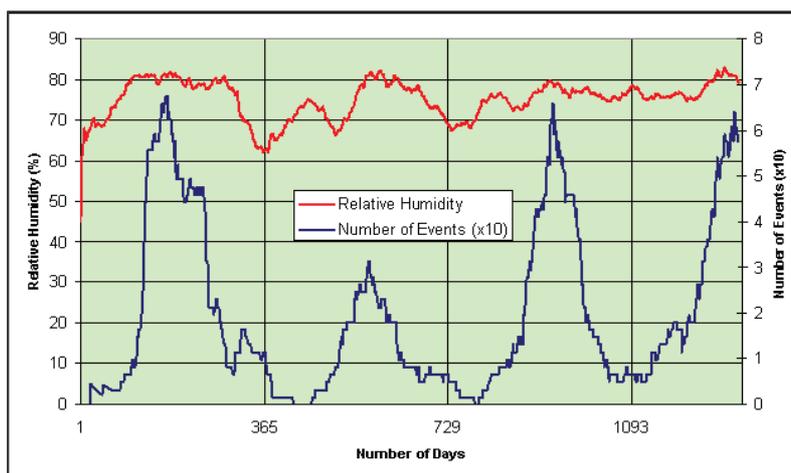
Problema semelhante é relatado em Bekker, Britten e Stevens (1999), em que a alta ocorrência de *flashover* no período entre 22h e 06h, levam a hipótese da poluição leve associada

a umidade é analisada como a causa dos desligamentos de linhas de transmissão do sistema da Eskom, empresa responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica na África do Sul.

#### 4.1.3 Influência climática da umidade elevada na linha de transmissão – objeto de estudo

A LT UPME-CAM foi objeto de estudo detalhado sobre a correlação de parâmetros climáticos (chuva, vento e umidade) com os desligamentos em Mustafa et al. (2012). A Figura 32 mostra a curva da correlação entre o número de eventos (desarmes) e a umidade relativa do ar entre 04 de janeiro de 2007 a 31 de julho de 2010, verifica-se qualitativamente a correlação entre os parâmetros. Sob um ponto de vista quantitativo, o fator de correlação para os parâmetros de comparação é de 0.59, o que demonstra a existência de uma forte correlação entre o número de desligamentos transitórios e a umidade do ar.

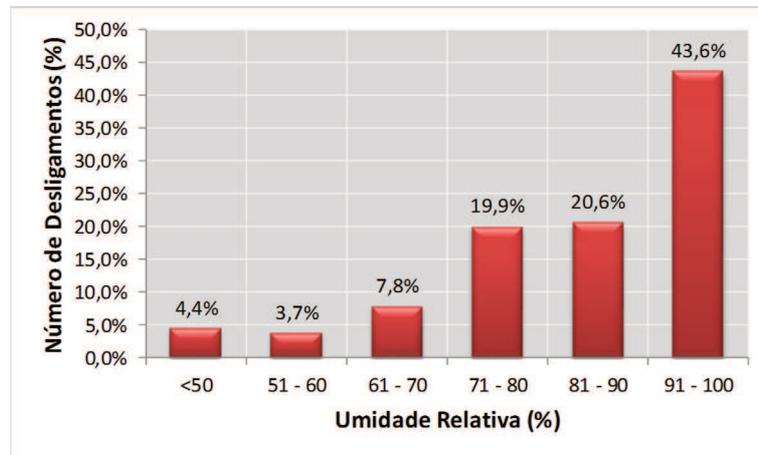
**Figura 32 - Correlação entre a umidade relativa do ar e número de desligamentos na LT objeto de estudo**



Fonte: Mustafa et al. (2012).

Uma análise dos dados de desligamentos entre 2011 e 2017 associado a condição climática de umidade relativa, com base em dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) obtidos na estação meteorológica de Canguçu – RS (mais próxima da região onde está localizada a LT) estão apresentados na Figura 33. Observa-se que aproximadamente 84% dos desligamentos no período ocorrem quando a umidade é superior a 70%, o que corrobora a constatação de Mustafa et al. (2012), também para os dados mais recentes de desligamentos.

**Figura 33- Umidade relativa do ar e desligamentos “sem causa evidenciada” na LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2017**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## **4.2 Proposta de solução: melhoria da isolação com a aplicação de isoladores recobertos com RTV**

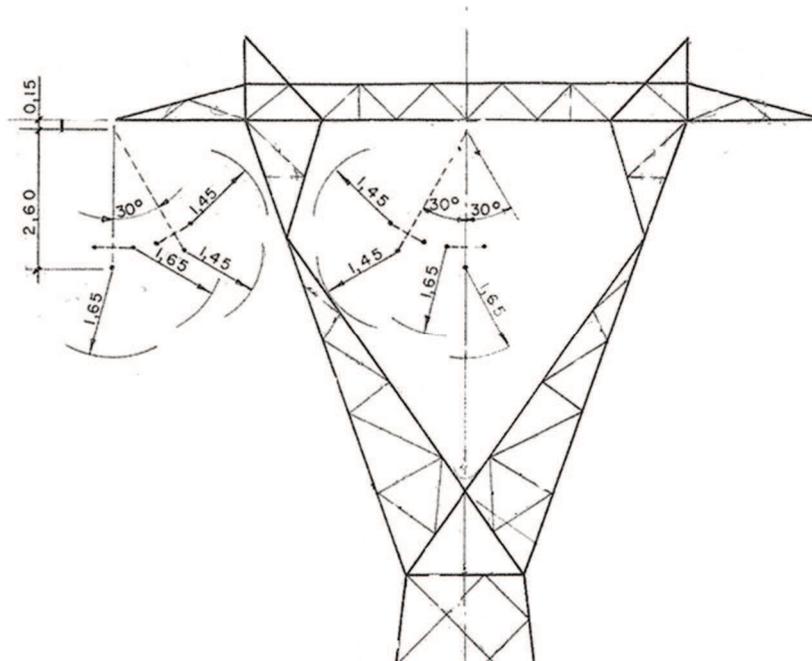
A análise apresentada para o problema na LT 230 kV UPME-CAM, quando comparada com a revisão bibliográfica, reforça a hipótese de que a causa dos desligamentos transitórios é decorrente de falha de isolação. Portanto a estratégia de solução adotada foi a utilização de isoladores de vidro recobertos com silicone RTV.

### **4.2.1 Premissas para aplicação da solução proposta**

Considerando que o caso em estudo se trata de uma LT em operação, o tamanho máximo da cadeia, incluindo ferragens de ligação, é de 2,60 metros, de acordo com projeto da torre de suspensão característica da LT UPME-CAM (Figura 34).

O limite máximo de variação entre o tamanho das novas configurações de cadeia e a cadeia original, observando os limites de distâncias espaçamento, foi de 30 cm – margem de recurso possível de se obter com as ferramentas disponíveis na concessionária para trabalhos em linha energizada.

**Figura 34 – Silhueta de uma torre de suspensão típica da LT 230 kV UPME-CAM e suas distâncias de espaçamento de projeto**



Fonte: CEEE-GT.

#### 4.2.2 Novas configurações de cadeia com isoladores recobertos com RTV

Visando a implantação em campo e a análise do desempenho da solução, foi estabelecido nesse trabalho a utilização de 2 (dois) tipos de isoladores disponíveis comercialmente com o recobrimento de RTV: com perfil plano e com perfil normal, conforme características técnicas apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8 – Características básicas do isolador de vidro perfil plano e perfil normal com RTV**

Perfil do isolador	Plano	Normal
Passo (mm)	127	146
Dímetro (mm)	380	255
Distância de escoamento (mm)	365	320
Peso (kg)	5,6	4,0
Espessura média do revestimento RTV da parte superior do isolador (µm)	320	320

Fonte: SEDIVER.

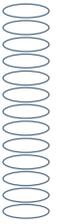
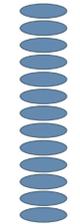
O isolador perfil plano apresenta menor passo do que o isolador perfil normal, o que possibilita aumentar o número de isoladores na cadeia, conseqüentemente, com aumento da distância de escoamento específica da cadeia, mantendo o tamanho da cadeia original. Do ponto de vista prático, é importante que não haja grandes diferenças de comprimento, pois facilita a substituição da cadeia através de técnicas de manutenção com instalação energizada. Uma outra vantagem desse tipo de isolador, quando comparado ao perfil antipoluição, que tem como principal função aumentar a distância de escoamento da cadeia, é a facilidade de visualização

das partes metálicas durante a inspeção, associado a menor possibilidade de acúmulo de poluentes na parte inferior dos isoladores.

A seguir são descritas a formação das quatro configurações de cadeias de isoladores implementadas em campo. As características técnicas principais das configurações são apresentadas de forma esquemática na Tabela 9.

- **Configuração 1 (C1):** cadeia de isolador formada por 15 isoladores de vidro perfil plano, todos recobertos com silicone RTV. Além de agregar a propriedade da hidrofobicidade em toda a cadeia de isoladores, essa configuração aumenta em 24% o valor da distância de escoamento específica unificada (DEEU) da cadeia;
- **Configuração 2 (C2):** cadeia de isolador mista, formada por 01 isolador de vidro perfil plano recoberto com silicone RTV no topo da cadeia, seguida por 14 isoladores de vidro perfil normal. Essa configuração visa agregar a propriedade da hidrofobicidade somente na parte superior das cadeias de isoladores, ao mesmo tempo que aumenta em 14% o valor da DEEU da cadeia;
- **Configuração 3 (C3):** cadeia de isolador formada por 01 isolador de vidro perfil plano recoberto com silicone RTV no topo da cadeia, seguida por 12 isoladores de vidro perfil normal também recobertos por silicone. Essa configuração agrega a propriedade da hidrofobicidade em toda a cadeia com o isolador plano no topo. Mantém praticamente a mesma DEEU da configuração original;
- **Configuração 4 (C4):** cadeia de isolador formada por 13 isoladores normais, todos recobertos com silicone RTV. Essa configuração agrega a propriedade da hidrofobicidade em toda a cadeia e mantém as distâncias de escoamento da cadeia original.

Tabela 9 - Características técnicas das configurações de cadeia de isoladores

Configuração	Original (CO)	C1	C2	C3	C4
<b>Tipo de isolador</b>	Normal s/ RTV	Plano c/ RTV	Mista (RTV + Normal)	Normal e plano c/ RTV	Normal c/ RTV
<b>Desenho Esquemático</b>					
<b>Número de discos na cadeia</b>	13 sem RTV	15 com RTV	1 com RTV 14 sem RTV	13 com RTV	13 com RTV
<b>Distância de escoamento específica unificada - DEEU (mm/kV<sub>Fase-Terra</sub>)</b>	29,41	38,71	34,25	29,73	29,41
<b>Tamanho da cadeia (mm)</b>	1.898	1.905	2.171	1,879	1.898
<b>Peso total da cadeia (kg)</b>	52,00	84,00	61,60	53,6	52,00
<b>Aumento do comprimento da cadeia (mm)</b>	-	7	273	-19	0
<b>Aumento da DEEU (%)</b>	-	24,0%	14,1%	1,1%	0%

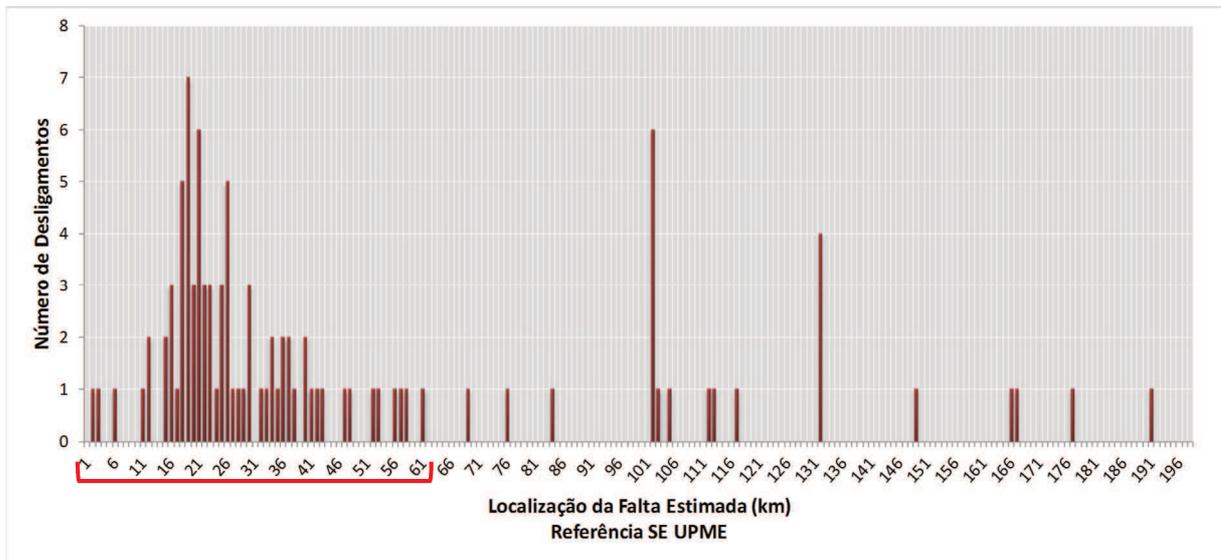
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Definição dos locais de instalação e aplicação em campo

Os diferentes tipos de configuração devem ser instalados em trechos ao longo da LT UPME-CAM para que se possa monitorar o desempenho e avaliar a eficácia de cada solução. Para definição dos trechos para implementação em campo, inicialmente, foi importante determinar o perfil de ocorrências de desligamentos ao longo da referida LT. Nesse sentido, a informação do histórico da estimativa de localização da falta é fundamental.

Os dados históricos de estimativa de localização da falta cadastrados na base de dados da concessionária baseiam-se em informações fornecidas pelos equipamentos de localização instalados nos terminais das subestações e pelo Registrador de Perturbações instalados na subestação de Camaquã. Além destas, utiliza-se a técnica de localização de faltas pela Reatância Simples, utilizando os dados de um terminal, oriundo das oscilografias disponíveis.

Os trechos críticos foram definidos com base em dados de localização estimada de falta para os desligamentos no período de 2011 a 2012, conforme apresentada na Figura 35. Nesse período, observa-se que a maior concentração de desligamentos é até o quilômetro 61 a partir do terminal de UPME (destacado na Figura 35), além de situações mais pontuais localizadas entre os quilômetros 101 e 106, e também no 131.

**Figura 35 – Localização de falta estimada ao longo da LT 230 kV UPME-CAM entre 2011 e 2012**

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante que os locais de instalação de cada solução sejam suficientemente extensos para que se possa monitorar as ocorrências a partir da estimativa de localização de falta. Considerando o histórico de erro em relação a localização estimada e a localização real para a LT UPME-CAM, o valor médio é em torno de 1,0% (dados de controle de falhas do setor de engenharia de LTs). Em termos de extensão da LT, o percentual corresponde a 2,0 quilômetros ou 4 (quatro) estruturas. Neste contexto, para permitir avaliação de cada configuração de cadeia foi definido como parâmetro a alteração na configuração de todas as cadeias em trechos não inferiores a 5,0 km, o que corresponde aproximadamente a 10 (dez) estruturas.

A definição do local para instalação levou em consideração o trecho crítico apresentado na Figura 35 e o histórico de erro de localização de falta da LT, dessa forma a definição dos trechos para implantar as configurações C1, C2, C3 e C4, é apresentada na Tabela 10.

**Tabela 10 – Locais de instalação das configurações C1, C2, C3 e C4**

Trecho	Configuração	Quantidade Cadeias c/ RTV	Quantidade Estruturas	Situação
km 16 a 20	C2	30	10	Instalado em 2015
km 21 a 25	C1	30	10	Instalado em 2013
km 26 a 30	C2	39	13	Instalado em 2015
km 31 a 35	C3	33	11	Instalado em 2018
km 36 a 40	C4	33	11	Instalado em 2018

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que a instalação de cada configuração ocorreu em períodos distintos. A configuração C1 ocorreu em 2013, a C2 foi finalizada em 2015 e as configurações C3 e C4 mais recentemente, em 2018. Esse fato tem relação com a disponibilidade de material e mão-de-obra necessária para instalação, além dos recursos financeiros do projeto de pesquisa realizado em etapas, com continuidade a partir do ano de 2016.

#### 4.3.1 Instalação da configuração C1

A configuração C1 foi implantada em 10 (dez) estruturas, num trecho de 5 km (21 a 25 km de UPME), conforme já apresentado na Tabela 10, sendo que a finalização da instalação ocorreu em abril de 2013. Essa configuração substitui todos os isoladores originais das cadeias por isoladores novos, com perfil plano recobertos com RTV. A Figura 36 ilustra o processo de substituição dos isoladores com a linha energizada.

**Figura 36 – Substituição de cadeia de isoladores com técnica de trabalho para linha energizada**



Fonte: CEEE-GT.

#### 4.3.2 Instalação da configuração C2

A configuração C2 foi implantada em 23 estruturas, em dois trechos: 16 a 20 km e 26 a 30 km de UPME, conforme já apresentado na Tabela 10, sendo que a finalização da instalação ocorreu em julho de 2015. Essa configuração mantém os isoladores originais da cadeia (13 discos perfil normal) e adiciona mais dois discos: 01 disco normal sem RTV e 01 disco perfil plano com RTV. O processo de instalação dos isoladores dessa configuração ocorreu com a linha energizada, em processo similar ao da configuração C1, ilustrado na Figura 36.

#### 4.3.3 Instalação da configuração C3

A configuração C3 foi implantada em 11 estruturas, em um trecho de 5 km (31 a 35 km de UPME), conforme já apresentado na Tabela 10, sendo que a finalização da instalação ocorreu em maio de 2018. Essa configuração substitui todos os isoladores originais das cadeias por isoladores novos recobertos com RTV, sendo: 12 discos perfil normal com RTV e 01 disco

perfil plano com RTV no topo da cadeia. A Figura 37 ilustra o processo de instalação desses isoladores com a linha desenergizada, já a Figura 38 demonstra o detalhe da hidrofobicidade no recobrimento em RTV, observado no momento da instalação da cadeia.

**Figura 37 – Substituição de cadeia de isoladores com linha desenergizada**



Fonte: CEEE-GT.

**Figura 38 – Cadeia na configuração C3 e o detalhe da hidrofobicidade no recobrimento em RTV**



Fonte: CEEE-GT.

#### 4.3.4 Instalação da configuração C4

A configuração C4 foi implantada em 10 (dez) estruturas, em um trecho de 5 km (36 a 40 km de UPME), conforme já apresentado na Tabela 10, sendo que a finalização da instalação ocorreu em maio de 2018. Essa configuração substitui todos os isoladores originais das cadeias por isoladores novos recobertos com RTV, sendo: 13 discos perfil normal com RTV. O trabalho de instalação foi similar ao da configuração C3, ilustrado na Figura 37.

#### 4.4 Análise do desempenho das novas configurações

Visando melhorar a precisão da análise, durante o mês de junho de 2017, foi instalado um Registrador de Perturbação por Ondas Viajantes na LT UPME-CAM. Dessa forma, a estimativa de erro para a LT em estudo, cuja extensão é 197 km, passou a ser na ordem de 500 metros, portanto possibilitou melhor avaliação do desempenho de cada configuração (Figura 39).

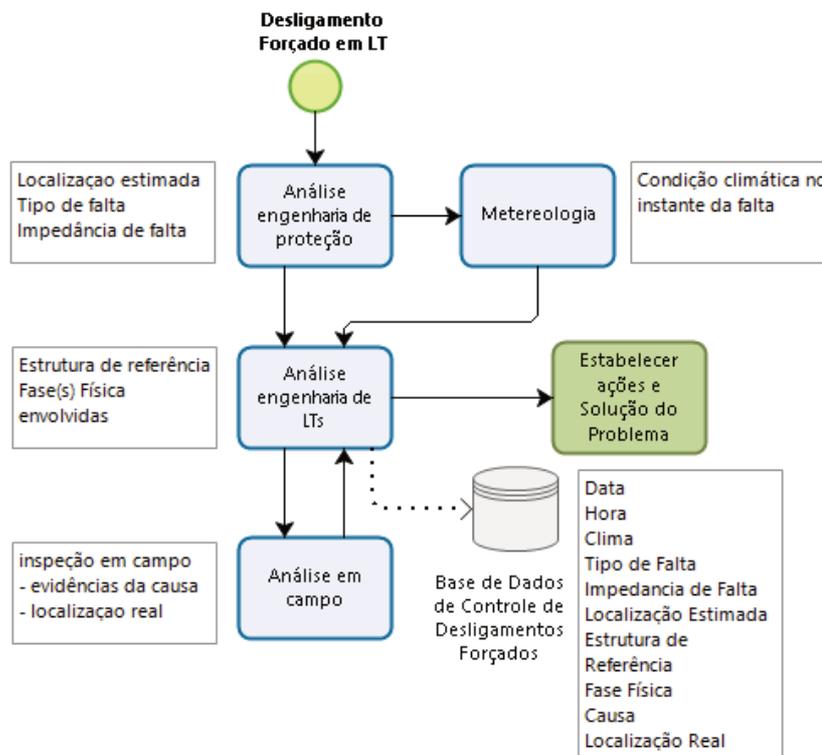
**Figura 39 – Registrador de Perturbação por Ondas Viajantes instalado na LT UPME-CAM**



Fonte: CEEE-GT.

A Figura 40 detalha o fluxograma de trabalho, com a definição de papéis e responsabilidade implantado na concessionária: a engenharia de proteção é responsável por analisar a falta que provocou o desligamento e informar à engenharia de LTs a localização estimada, bem como as características da falta (fase envolvida e impedância de falta). A engenharia de LTs, de posse dessas informações e das condições climáticas, identifica a provável estrutura (torre) da LT que teve o defeito, analisa causas prováveis para o desligamento, com base nas informações disponíveis e no histórico de ocorrências. A equipe de manutenção, após realizar inspeção, retorna as informações confirmando o local e a causa do defeito à engenharia de LTs. A engenharia de LTs, por sua vez, é responsável por atualizar a base de dados do controle de desligamentos e, em conjunto com as demais áreas envolvidas, coordena as ações técnicas para solucionar o problema.

**Figura 40 – Procedimento para análise de desligamento forçados em LT**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo visa analisar os resultados obtidos com a implantação da metodologia estabelecida no capítulo anterior. Para tanto foi analisado o desempenho de cada uma das novas configurações de cadeia, comparando-se a taxa de desligamentos em cada trecho, antes e depois da sua implantação.

Na sequência do capítulo, é apresentado os resultados da análise laboratorial dos contaminantes presentes em unidades de isoladores retirados de serviço, visando corroborar a hipótese da contaminação associada com umidade como causa do problema. Por fim, destaca-se também a constatação de um mecanismo de falha não previsto inicialmente no trabalho, mas responsável por uma parcela dos desligamentos, especialmente os ocorridos após a instalação das novas configurações.

### 5.1 Análise do desempenho de cada configuração

Para efeitos de análise foi considerado o período de 8 (oito) anos, compreendido entre 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2018, com base nos dados de desligamentos intempestivos disponibilizados pela concessionária. Foram analisadas as taxas de desligamentos para o trecho de LT de cada configuração, comparando-se o período anterior ao término (marco) de instalação com o período pós instalação. Para efeitos de análise, o marco de instalação (MI) é a data em que foi finalizada a instalação de todas as cadeias no trecho, sendo utilizada como referência para início da contabilização de desligamentos pós instalação de cada configuração.

Considerando que as configurações estudadas foram instaladas em épocas distintas, o período de apuração pré e pós instalação foi específico para cada configuração, por exemplo: as configurações C1 e C2 foram instaladas anteriormente e terão um período posterior de instalação de análise maior que as configurações C3 e C4, as quais foram instaladas somente em 2018.

Para trazermos para uma mesma base de apuração, a taxa de desligamento (TD) apurada irá refletir o número de desligamentos por ano, por quilômetro em cada trecho sob análise, conforme equação (4).

$$TD = \frac{ND}{P * E} \quad (4)$$

Onde: TD é a taxa de desligamento, ND é o número de desligamentos, P é o período em anos e E é a extensão em quilômetros do trecho.

#### 5.1.1 Resultados da configuração C1

O marco de instalação (MI) da configuração C1 ocorreu em 26/04/2013, data em que foi finalizada a instalação da configuração num trecho de 5 (cinco) km especificado no item 4.3. O período pós instalação analisado foi a partir do referido MI até 31/12/2018, totalizando 5,68 anos. O número de desligamentos apurados para o trecho no período foi de 5 (cinco), o

que representa uma TD de 0,18 deslig./ano/km. Verifica-se que a TD pós MI é 87,28% menor que a TD pré MI. A Tabela 11 a seguir, resume os dados disponibilizados pela concessionária.

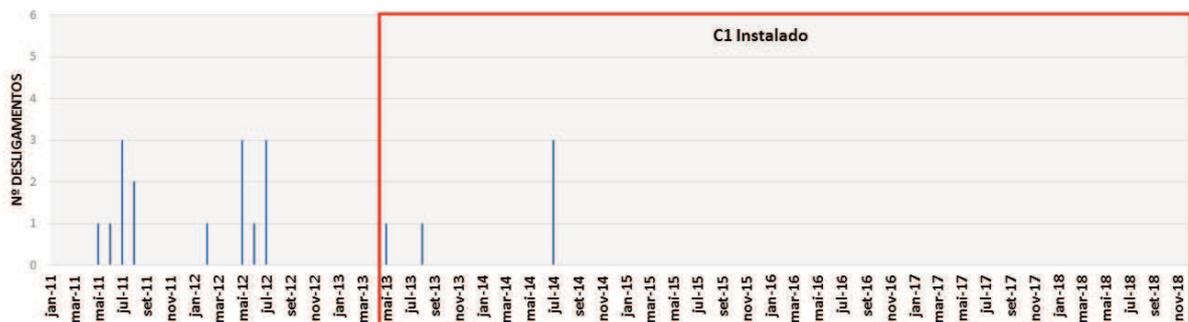
**Tabela 11 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C1**

Extensão	5 km	
Marco de Instalação (MI)	26/04/2013	
	Antes do MI	Depois do MI
Período (anos)	2,32	5,68
Num. desligamentos	16	05
Taxa deslig. (Num deslig./ano/km)	1,38	0,18
% redução dos desligamentos		87,28%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise gráfica dos dados do histórico de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C1 é apresentada na Figura 41, onde o eixo horizontal representa a linha do tempo do período sob análise, o retângulo vermelho no gráfico representa o período pós instalação de C1 e as barras em azul os desligamentos ocorridos ao longo do período. Observa-se que não ocorreram mais desligamentos a partir de julho/2014.

**Figura 41 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C1 entre 2011 e 2018**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2 Resultados da configuração C2

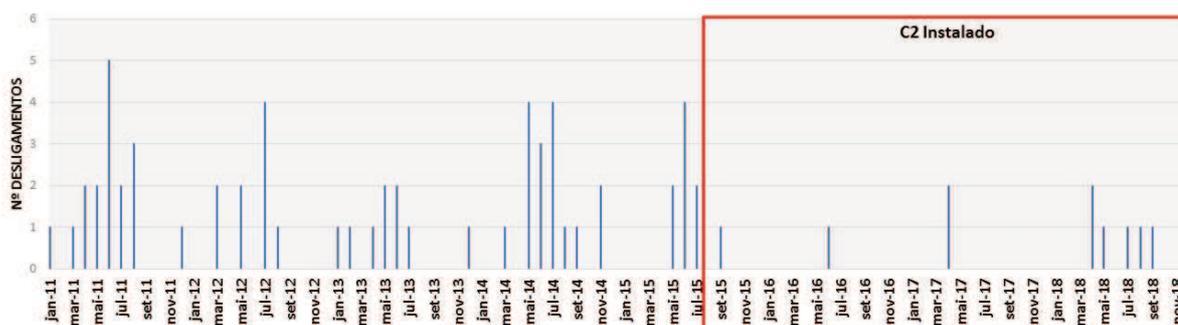
O marco de instalação (MI) da configuração C2 ocorreu em 29/07/2015, data em que foi finalizada a instalação da mesma num trecho de 10 (dez) km especificado no item 4.3. O período pós instalação analisado foi a partir do referido MI até 31/12/2018, totalizando 3,43 anos. O número de desligamentos apurados para o trecho no período foi de 10 (dez), o que representa uma TD de 0,29 deslig./ano/km. Verifica-se que a TD pós MI é 79,17% menor que a TD pré MI. A Tabela 12 a seguir, resume os dados disponibilizados pela concessionária.

**Tabela 12 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C2**

Extensão	10 km	
Marco de Instalação (MI)	29/07/2015	
	<b>Antes do MI</b>	<b>Depois do MI</b>
Período (anos)	4,57	3,43
Num. desligamentos	64	10
Taxa deslig. (Num deslig./ano/km)	1,40	0,29
% redução dos desligamentos		79,17%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise gráfica dos dados do histórico de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C2 é apresentada na Figura 42, onde o eixo horizontal representa a linha do tempo do período sob análise, o retângulo vermelho no gráfico representa o período pós instalação de C2 e as barras em azul os desligamentos ocorridos ao longo do período. Observa-se visualmente a redução no número de desligamentos constatada na Tabela 12, a partir da instalação da nova configuração de cadeia.

**Figura 42 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C2 entre 2011 e 2018**

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Resultados da configuração C3

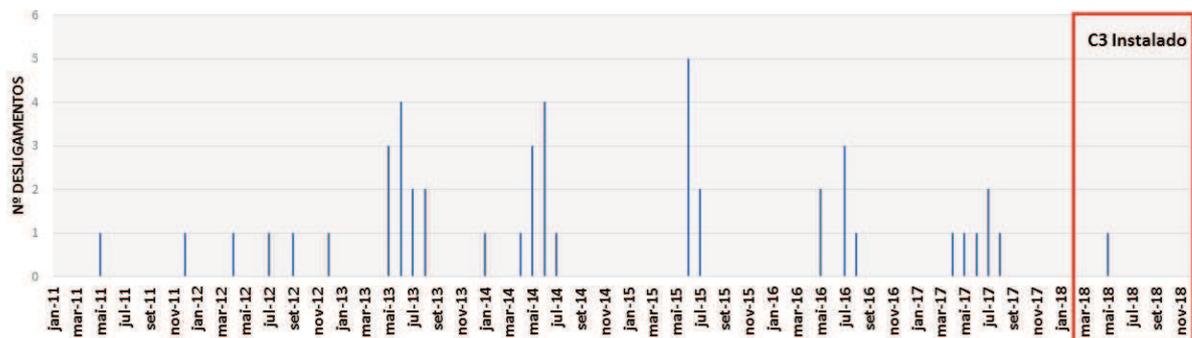
O marco de instalação (MI) da configuração C3 ocorreu em 22/04/2018, data em que foi finalizada a instalação da configuração num trecho de 5 (cinco) km especificado no item 4.3. O período pós instalação foi dessa data até 31/12/2018, totalizando 0,69 ano. O número de desligamentos apurados para o trecho no período foi de 01 (um), o que representa uma TD de 0,29 deslig./ano/km. Verifica-se que a TD pós MI é 78,91% menor que a TD pré MI. A Tabela 13 a seguir, resume os dados disponibilizados pela concessionária.

**Tabela 13 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C3**

Extensão	5 km	
Marco de Instalação (MI)	22/04/2018	
	<b>Antes do MI</b>	<b>Depois do MI</b>
Período (anos)	7,31	0,69
Num. desligamentos	46	01
Taxa deslig. (Num deslig./ano/km)	1,26	0,29
% redução dos desligamentos		78,91%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise gráfica dos dados do histórico de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C3 é apresentada na Figura 43, onde o eixo horizontal representa a linha do tempo do período sob análise, o retângulo vermelho no gráfico representa o período pós instalação de C3 e as barras em azul os desligamentos ocorridos ao longo do período. Embora ainda represente um período curto de análise, quando comparado com as configurações C1 e C2, observa-se visualmente a redução no número de desligamentos constatada na Tabela 13, a partir da instalação da nova configuração de cadeia.

**Figura 43 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C3 entre 2011 e 2018**

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.4 Resultados da configuração C4

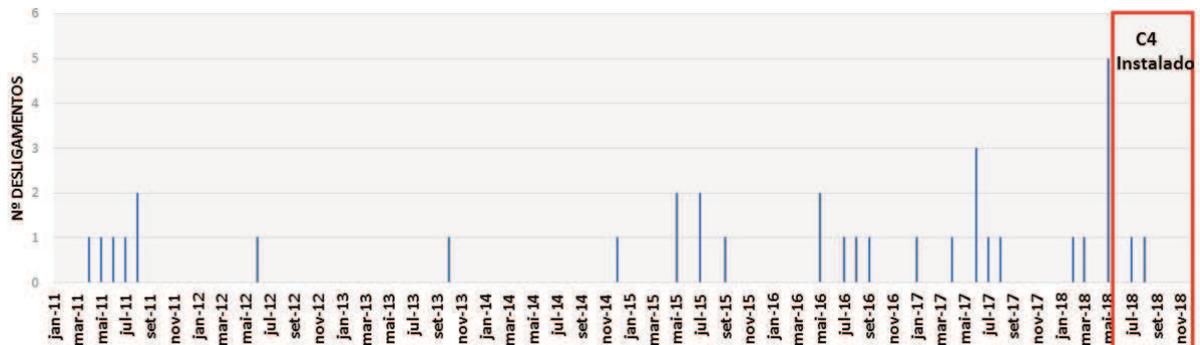
O marco de instalação (MI) da configuração C4 ocorreu em 20/05/2018, data em que foi finalizada a instalação da configuração num trecho de 5 (cinco) km especificado no item 4.3. O período pós instalação foi dessa data até 31/12/2018, totalizando 0,62 ano. O número de desligamentos apurados para o trecho no período foi de 03 (três), o que representa uma TD de 0,97 deslig./ano/km. Verifica-se que a TD pós MI é praticamente a mesma que a TD pré MI. A Tabela 14 a seguir, resume os dados disponibilizados pela concessionária.

**Tabela 14 – Dados de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C4**

Extensão	5 km	
Marco de Instalação (MI)	20/05/2018	
	<b>Antes do MI</b>	<b>Depois do MI</b>
Período (anos)	7,38	0,62
Num. desligamentos	35	03
Taxa deslig. (Num deslig/ano/km)	0,95	0,97
% redução dos desligamentos		-2,70%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise gráfica dos dados do histórico de desligamentos intempestivos no trecho da configuração C4 é apresentada na Figura 44, seguindo a mesma lógica dos gráficos apresentados anteriormente. Cabe destacar que uma das ocorrências representadas no mês de maio de 2018, ocorreu nos primeiros dias do período pós instalação de C4, a qual não foi possível representar na área do retângulo vermelho. Por fim, embora ainda represente um período curto de análise quando comparado com as configurações C1 e C2, observa-se que não houve uma redução no número de desligamentos a partir da instalação da nova configuração de cadeia.

**Figura 44 – Histórico de desligamentos no trecho da configuração C4 entre 2011 e 2018**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que o desempenho da configuração C4 foi fortemente influenciado pela questão pássaros, cujo mecanismo de falha não está relacionado à questão contaminação e umidade, como será apresentado na sequência desse capítulo.

## 5.2 Evidências e constatações

A metodologia implementada com base nos trabalhos de implantação em campo das novas configurações de cadeia e no monitoramento do desempenho da instalação conforme item 4.4, proporcionaram algumas constatações importantes no sentido de compreender exatamente o que está ocorrendo com a linha de transmissão em estudo. Destaca-se a condutividade dos poluentes presentes nas cadeias retiradas de serviço e a ocorrência de um mecanismo de falha que não estava sendo previsto no início dos trabalhos conhecido como *bird streamer*, isto é, *flashover* causado pelo jato de excremento de pássaro, conforme será tratado nos itens a seguir.

### 5.2.1 Análise laboratorial dos contaminantes presentes nas cadeias

Visando uma análise mais detalhada do tipo de contaminantes presentes na região, amostras de discos de isoladores retiradas de serviço dos trechos objeto de estudo (item 4.3) foram submetidas a testes em laboratório. Conforme já havia sido destacado no item 4.1.2, observa-se, normalmente, um acúmulo mais acentuado de poluição na parte inferior dos discos de isoladores que formam a cadeia, principalmente nos isoladores mais próximos ao topo devido ao maior efeito da umidificação, conforme ilustrado na Figura 45.

De um modo geral, a análise físico-química dos isoladores apresentou presença de contaminantes com alta condutividade, confirmando a presença de sais como cátions (cálcio, ferro, cobre, manganês, potássio, sódio e zinco) e ânions (sulfato e fosfato), conforme Relatório de Ensaio N°: 5906.2018.B-V0. A Tabela 15 apresenta o resultado da concentração em miligrama por litro (mg/l) de cada substância de uma unidade de isolador retirado do trecho da configuração C3.

**Figura 45 – Cadeia de isoladores retirada de serviço com presença de contaminantes na parte inferior dos discos**



Fonte: CEEE-GT.

**Tabela 15 – Resultado da análise físico-química no isolador da amostra**

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Unidade</b>
Cálcio	6,710	mg/l
Cobalto	<0,020	mg/l
Cobre	0,023	mg/l
Ferro	1,200	mg/l
Fosfato	56,92	mg/l
Manganês	0,122	mg/l
Nitrato	<0,05	mg/l
Nitrito	<0,05	mg/l
Potássio	58,838	mg/l
Sódio	48,600	mg/l
Sulfato	54,71	mg/l
Zinco	6,710	mg/l

Fonte: Relatório de Ensaio N°: 5906.2018.B-V0.

O grau de contaminação dessa amostra, de acordo com o relatório citado, é classificado como moderado e a provável origem dos elementos encontrados na análise físico-química estão relacionados a:

- Usina termoeletrica e fábrica de cimento instaladas na região é a explicação para a presença de partículas de sulfato, fosfato, ferro, manganês e zinco nas amostras. A velocidade e a direção do vento, podem contribuir para que a abrangência da contaminação atinja uma área maior;
- Ambiente costeiro, embora a linha de transmissão esteja localizada entre 100 e 150 km do mar, a presença de potássio e sódio são típicas desse tipo de ambiente;
- Ambiente agrícola, caracterizado por áreas que se situam nas proximidades de atividade de aragem ou pulverização de culturas. As camadas de poluição nos isoladores consistem principalmente em sais provenientes de produtos químicos ou presentes no solo;
- Presença de pássaros, conforme indícios encontrados ao longo da LT UPME-CAM, como por exemplo, ninhos e sinais de excrementos em alguns componentes (treliças metálicas da torre ou na própria cadeia de isoladores). A Figura 46 apresenta excrementos de pássaros em treliças da torre e na cadeia de isolador. Destaca-se também na figura citada que o isolador de topo recoberto com RTV da configuração C2 teve uma função de proteção contra a contaminação por dejetos dos demais discos da cadeia.

**Figura 46 – Contaminação por excremento de pássaros**



Fonte: CEEE-GT.

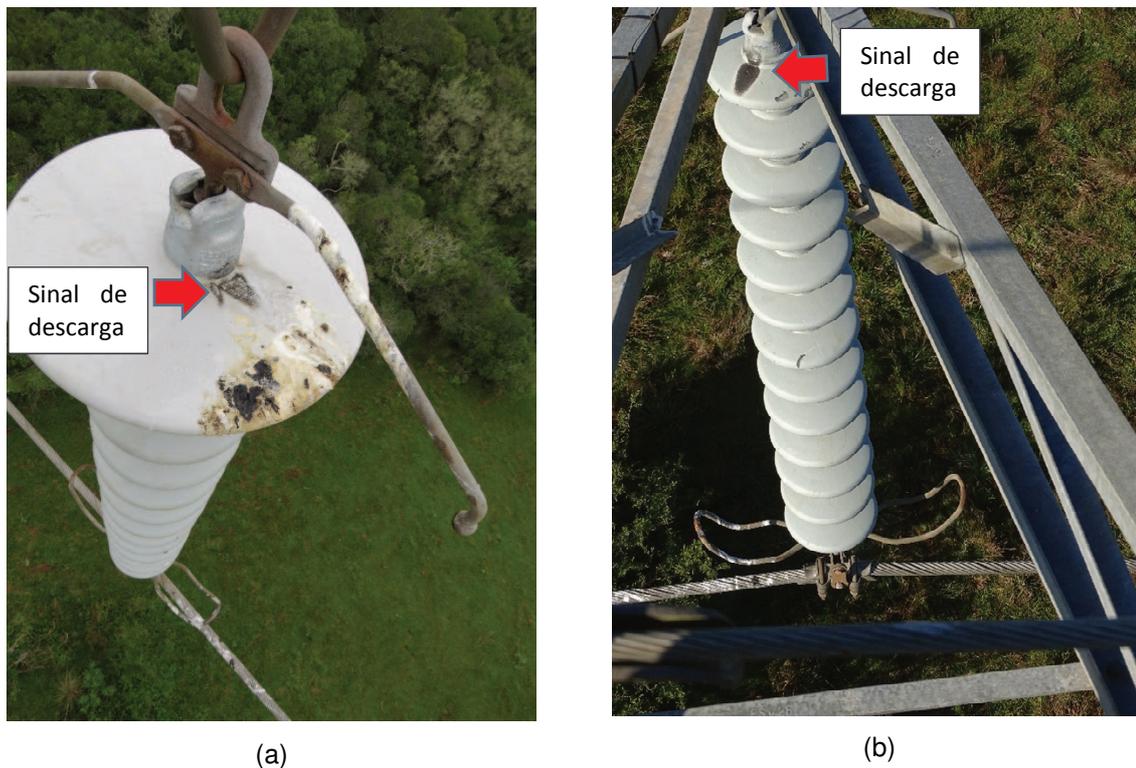
Realizada a análise, pode-se dizer que o nível de contaminação em que as cadeias estão submetidas é fortemente influenciado pelo ambiente formado pela associação das diversas fontes de contaminação citadas, sendo ainda específico para cada local ao longo da LT UPME-CAM.

### 5.2.2 *Flashover* por jato de excremento de pássaros (*bird streamer*)

Uma constatação importante obtida com o monitoramento do desempenho da LT em estudo, foi a ocorrência de *flashover* causados por pássaros, decorrentes da liberação de jatos de excremento, também conhecido pelo termo em inglês *bird streamer*. Essa situação foi verificada em locais onde mesmo após a instalação das novas configurações de cadeias de isoladores, houve incidência de desligamento intempestivos.

A Figura 47 (a) ilustra uma cadeia de isolador da configuração C3, a qual apresenta sinais de descarga no isolador do topo da cadeia, juntamente com indícios de excremento de pássaros nesse mesmo isolador, e também nas ferragens de proteção e no cabo condutor. Na Figura 47 (b) observa-se uma cadeia da configuração C4, em que há sinal de descarga no isolador do topo e nas ferragens do lado energizado, enquanto indícios de excremento de pássaros são observados apenas no cabo condutor. Em ambos os casos da Figura 47, não há registros de contaminação dos isoladores ao longo da cadeia.

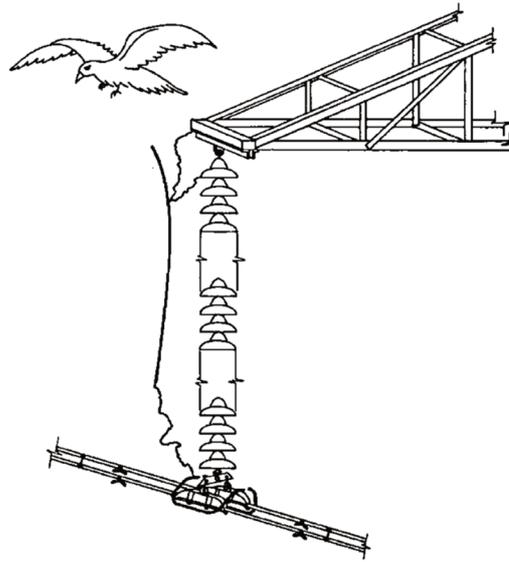
Figura 47 – *Flashover* causado por jato de excrementos de pássaros nas configurações C3 (a) e C4 (b)



Fonte: CEEE-GT

A ocorrência do *bird streamer* geralmente está relacionada a presença de pássaros de grande porte, quando ao permanecerem sobre as cadeias de isoladores, liberam um jato de excremento longo e contínuo, tal que a distância elétrica entre partes condutoras e aterradas é suficientemente reduzido para causar um curto-circuito. Conforme West, Brown e Kinyon (1971), o mecanismo de falha em questão pode ser ilustrado pela Figura 48 a seguir.

Figura 48 – Ilustração do *flashover* causado por jato de excrementos de pássaros (*bird streamer*)



Fonte: West, Brown e Kinyon (1971)

Cabe destacar que o tipo de material empregado nos isoladores da cadeia desempenha pouco papel no processo de formação do *bird streamer*, pois o arco ocorre externamente à cadeia. Nessa situação a distância de arco a seco é mais importante pois, quanto menor essa distância, maior é a probabilidade de ocorrer o *flashover*.

Salienta-se, ainda, que o desligamento relacionado a causa *bird streamer* é de difícil identificação pois, além de ser uma falha de natureza transitória, costuma deixar poucas evidências da causa. O padrão desse tipo de ocorrência é muito parecido com o causado pelo mecanismo umidade/contaminação, pois são faltas do tipo fase-terra, sem impedância significativa e, normalmente, ocorrem em período noturno, que é quando o pássaro costuma utilizar as estruturas da linha de transmissão para repousar. A metodologia de monitoramento adotada, associada a instalação do localizador de falta de ondas viajantes e o isolador recoberto com RTV, contribuíram significativamente para a identificação desse mecanismo de descarga. A melhoria de precisão tornou a inspeção pós ocorrência mais assertiva, enquanto que o isolador recoberto com silicone RTV apresentou sinais de descarga (arco) mais evidentes do que apresentaria um isolador não recoberto.

Como forma de minimizar problemas causado por pássaros, a solução é agir de forma a evitar a permanência dos mesmos nas partes da torre críticas da torre em termos de distâncias fase-terra (normalmente na ponta do braço, sobre as cadeias de isoladores ou nas proximidades). Dispositivos anti-pouso confeccionados por técnicos da concessionária, como o ilustrado na Figura 49, tem sido utilizado com eficácia nesse sentido.

**Figura 49 – Dispositivo anti-pouso para evitar permanência de pássaros sobre a cadeia**



Fonte: CEEE-GT.

Assim sendo, com base na constatação deste tópico e nos resultados obtidos com as novas configurações das cadeias, pode-se dizer que uma parcela considerável de desligamentos na LT UPME-CAM tenha a causa relacionada ao mecanismo do *bird streamer*. Os dados disponíveis não permitem estabelecer um percentual exato, mas pela redução de desligamentos obtido com a melhoria de isolamento (entre 77 a 87%), estima-se que entre 13 e 23 % dos desligamentos na LT objeto de estudo podem estar relacionados a essa causa.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para estabelecer ações eficazes em um determinado problema é necessário, primeiramente, compreender o modo de falha envolvido. Nesse sentido a pesquisa atingiu plenamente o objetivo, trazendo a compreensão da causa de ocorrência de desligamentos transitórios em linhas de transmissão, correlacionados com a umidade elevada e em condições normais de operação, ou seja, caracterizando o mecanismo de falha por problemas de isolamento da cadeia de isoladores.

De acordo com a fundamentação teórica do capítulo 2, a falha de isolamento da cadeia ocorre devido ao aumento da corrente de fuga e/ou pela distribuição de tensão de forma não uniforme ao longo da mesma. Em ambas as situações, o umedecimento dos contaminantes depositados nos isoladores tem papel fundamental no processo da falha. Essa questão é potencializada em cadeias constituída por isoladores cerâmicos (vidro ou porcelana) devido a característica superficial desses materiais proporcionarem maior umedecimento quando comparada aos materiais poliméricos, em especial ao silicone. Neste contexto, o correto dimensionamento das cadeias de isoladores da linha de transmissão, frente a influência ambiental que estão submetidas é de fundamental importância para o bom desempenho da instalação.

Os microclimas e as microrregiões distintas ao longo de uma LT, com extensão de dezenas e até centenas de quilômetros, ocasionam diferentes parâmetros de poluição/umidade. Esse fato ficou evidente ao analisar o desempenho de uma linha de transmissão piloto, onde os desligamentos correlacionados a períodos de umidade elevada estão concentrados em maior intensidade em determinadas regiões ao longo da LT.

A metodologia apresentada verificou, na etapa de análise do problema, que o dimensionamento das cadeias da LT UPME-CAM foram projetadas para um nível leve de poluição sob a ótica atual da norma IEC/TS 60815-1 (2008). Esse dimensionamento está adequado para a maior parte da extensão LT quando se analisa qualitativamente a região em que a LT se encontra, em termos das distâncias das fontes de contaminação (Tabela 3). Entretanto, a análise laboratorial dos contaminantes mostrou a presença de substâncias condutivas que caracterizam algumas amostras com nível moderado (médio) de poluição, resultado da contribuição de determinadas fontes de contaminação: industrial (usina termelétrica e fábrica de cimento), costeira, agrícola e pássaros. Adicionalmente, tem-se locais caracterizados pela elevada umidade sustentada, principalmente no período de inverno, quando os desarmes ocorrem com mais frequência.

Isto posto, pode-se concluir que o dimensionamento original das cadeias instaladas na LT UPME-CAM não está compatível com a combinação produzida pelo nível de poluição e a umidade sustentada em determinados trechos ao longo da linha, correspondente aos pontos críticos de desempenho.

Ressalta-se a importância da etapa de projeto de uma linha de transmissão, no que se refere ao dimensionamento das cadeias de isoladores, seguir os critérios da norma IEC/TS 60815-1 (2008), entretanto para LTs em operação em que os parâmetros considerados na época do projeto original não refletem os parâmetros de poluição e ambiental que estão submetidos, como no caso estudado, as alternativas de solução ficam limitadas. No caso do dimensionamento das cadeias, o principal desafio é aumentar a sua suportabilidade ao *flashover* sem alterações significativas nas distâncias entre condutor e partes aterradas, observando

impactos do balanço do cabo, aproximação com as partes da torre e abaixamento do cabo condutor.

A alternativa apresentada no trabalho foi a utilização de isoladores recobertos com RTV, cujo recobrimento proporciona um aumento na suportabilidade da tensão de *flashover* em torno duas vezes quando comparadas com o isolador sem recobrimento, conforme verificado no item 2.4.2. Nesse sentido, foram utilizados 2 (dois) perfis de isolador (plano e normal) e formado 4 (quatro) diferentes configurações que foram aplicadas em trechos específicos da LT 230 kV UPME-CAM. Ainda, para a avaliação do desempenho dessas novas configurações, foi implantado pela concessionária um sistema de localização de faltas por ondas viajantes e um procedimento para análise dos desligamentos forçados, visando melhorar a precisão da localização estimada da falha e a confiabilidade dos dados para a análise.

Com relação as soluções propostas na metodologia, foi verificado que:

- De modo geral, as novas configurações trouxeram melhoria significativa no desempenho da LT, conforme percentual de redução do número de desligamentos verificado nos trechos após a instalação de cada nova configuração. Exceção foi a configuração C4, que se manteve nos mesmos patamares de desligamentos anteriores a instalação da nova configuração, no entanto, houve a constatação de que desligamentos causados por pássaros pelo mecanismo do *bird streamer* influenciaram os resultados;
- As configurações C1 e C2 tiveram uma análise mais consolidada pelo maior período de análise pós o marco de instalação. A configuração C1 foi a que apresentou a menor taxa de desligamento, como também a maior redução no número de desligamento (87,28%), o que é explicado pela associação do efeito da utilização de cadeia completa de isoladores recobertos com RTV, com o aumento de 24% da distância de escoamento da cadeia C1 em relação a configuração original;
- A configuração C2 apresentou uma melhoria no desempenho de 79,17% na redução de desligamentos, tendo como principal vantagem um menor custo de material em relação as demais configurações, pois somente foram adicionados 02 (dois) isoladores na cadeia original. O isolador plano de topo com RTV teve um papel interessante tanto por agir na região normalmente mais umidificada da cadeia, como também fazer papel de proteção dos demais isoladores da cadeia em situações eventuais de contaminação por excremento de pássaros;
- Com relação a configuração C3, assim como a configuração C4, teve um período mais curto de análise, pois a implantação ocorreu segundo trimestre de 2018. Porém, a melhora no desempenho atingiu os mesmos patamares de C2 (78,9% de redução dos desligamentos no trecho).

Portanto, com base na análise do desempenho das novas configurações de cadeia e nas evidências e constatações obtidas no trabalho, os isoladores recobertos com RTV são uma excelente solução para a mitigação de desligamentos intempestivos relacionado ao mecanismo de falha de isolamento associado a umidade/contaminação. A configuração de cadeia mais adequada depende das características de projeto da LT e das condições ambientais e climáticas que a mesma está exposta. A intercambialidade do isolador de vidro, associada aos diferentes perfis existentes, permite formar diferentes configurações de cadeia, trazendo diversas alternativas de solução.

Salienta-se ainda a constatação de ocorrência de alguns desligamentos com causa relacionada a jato de excremento de pássaros (*bird streamer*). A ocorrência desse fenômeno

somente ficou evidente a partir da instalação do localizador de faltas por ondas viajantes. A maior precisão obtida na localização da falta, associado a marcas de descargas recentes no isolador recoberto com RTV situado no topo da cadeia e aos indícios de pássaros em determinadas partes comprovou o mecanismo em questão nas inspeções pós desarme. Até então, não haviam registros desse tipo de causa, sendo que esses desligamentos normalmente eram classificados com causa indeterminada.

Outra constatação relacionada a causa do *bird streamer* é que o *flashover* é externo a cadeia, normalmente apenas um disco (localizado no topo) apresenta sinal de descarga, diferentemente do caso umidade/contaminação em que o arco se desenvolve pela cadeia. No mecanismo do *bird streamer* os isoladores praticamente não exercem influência sobre esse tipo de ocorrência. Nessa situação é necessário estabelecer uma alternativa de solução que evite a permanência de pássaros em determinados locais da torre em que o jato de excremento possa causar fechamento de arco fase-terra.

Adicionalmente, dado que no Brasil poucos registros de experiência de campo sobre o uso de RTV, o trabalho atual poderá servir de referência e abrir novos horizontes de pesquisa no que se refere a performance em campo do revestimento RTV em isoladores de vidro. Na seção seguinte destaca-se possíveis trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos nessa linha de estudo.

## 6.1 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentados alguns temas de trabalhos que podem ser desenvolvidos na linha do estudo apresentado na presente dissertação:

- Avaliar o desempenho em campo das cadeias com isoladores recobertos com RTV através do monitoramento da corrente de fuga e/ou atividade elétrica (corona) na cadeia;
- Avaliar a vida útil do recobrimento de RTV, analisando o comportamento das características de aderência e da hidrofobicidade.
- Analisar os impactos da implantação das novas cadeias com isoladores recobertos com RTV na coordenação da isolação entre a linha de transmissão e os equipamentos nas subestações;
- Avaliar ao comportamento da vida útil dos componentes da linha de transmissão (isolador e ferragens) com a redução da corrente de fuga pela cadeia proporcionada pelo recobrimento com RTV;
- Mapear os níveis de poluição das regiões onde passa a linha de transmissão de forma quantitativa em consonância com a norma IEC/TS 60815-1 (2008).
- Analisar a interação dos pássaros com as linhas de transmissão, identificando potenciais problemas relacionados. Uma abordagem interessante desse assunto é apresentado no artigo “*Birds: More Threat to Lines or Threatened by Lines?*” elaborado por Gutman, Solomonik e Vosloo (2012).

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, E. O.; JAVORONKOV, M.; ABDELAZIZ, C.; FETHI, G.; ZOHRA, B. Prevention of the interruptions due to the phenomena of the electric insulators pollution. **Control, Communications and Signal Processing, 2004. First International Symposium on**, p. 493–497, 2004.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 729 de 28 de junho de 2016. 2016.
- ANEEL. **Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relatório+de+Análise+de+Desligamentos+Forçados+do+Sistema+de+Transmissão+-+Edição+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Acesso em: 23 set. 2017.
- BEKKER, H. J. J.; BRITTEN, A. C.; STEVENS, D. J. Light pollution on glass disc insulators as an underlying cause of flashover in Eskom's 275 and 400 kV networks. n. 467, p. 103–106, 1999.
- BEZERRA, D. C. **Revestimento de isoladores elétricos utilizando borracha de silicone/alumina trihidratada/nanosílica**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- BOLOGNA, F.; BRITTEN, A. C.; MAHATHO, N.; REYNDERS, J. P. **Light pollution and light wetting on ceramic (glass) insulators as a cause of unknown flashovers on transmission lines**. Cigré 4 th Southern Africa Regional Conference. **Anais...**Cape Town South Africa: 2001.
- CHERNEY, E. A. RTV Silicone - a high tech solution for a dirty insulator problem. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 11, n. 6, p. 8–14, 1995.
- CHERNEY, E. A.; GORUR, R.; MARZINOTTO, M.; EL-HAG, A.; MEYER, L.; GEORGE, J. M.; LI, S.; RAMIREZ, I. RTV silicone rubber pre-coated ceramic insulators for transmission lines. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 20, n. 1, p. 237–244, 2013.
- CHERNEY, E. A.; GORUR, R. S. RTV silicone rubber coatings for outdoor insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 6, n. 5, p. 605–611, 1999.
- FARZANEH, M.; CHISHOLM, W. A. **IET Power and Energy Series, Volume 7 - Insulators for High Voltages**. New Jersey: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- FONTANELLA, C. A. **Recobrimentos hidrofóbicos para uso em isoladores porcelânicos de alta tensão**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- FRONTIN, S. DE O. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**. Brasília: Goya, 2010.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977.

GARCIA, R. W. S. **Isoladores - aplicação e importância no setor elétrico**. Curso de Isoladores. **Anais...**Rio de Janeiro: Cigré-Brasil, 2017.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E.; TOURREIL, C. DE; DUMORA, D.; HARMON, R. Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 2, p. 924–933, 1995.

GORUR, R. S.; DE LA O, A.; EL-KISHKY, H.; CHOWDHARY, M.; MUKHERJEE, H.; SUNDARAM, R.; BURNHAM, J. T. Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 4, n. 1, p. 79–87, 1997.

GORUR, R. S.; CHANG, J. W.; AMBURGEY, O. G. Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1923–1933, 1990.

GUTMAN, I.; SOLOMONIK, E.; VOSLOO, W. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages. **INMR Magazine**, n. 94, p. 78–84, 2011.

GUTMAN, I.; SOLOMONIK, E.; VOSLOO, W. Birds: More Threat to Lines or Threatened by Lines? **INMR Magazine**, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Standard 1523: Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators**. New York, 2002.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC/TS 60815-1: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Definitions, information and general principles**. International Electrotechnical Commission, 2008.

KIESSLING, F.; NEFZGER, P.; NOLASCO, J.F.; KAJNTZYK, U. **Overhead Power Lines - Planning, Design, Construction**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.

KLEINHANS, K. **Investigation into mechanisms of light pollution flashover of 275kV transmission lines as a cause of unknown outages**. 2005. 74 p. Thesis (Master of Engineering), University of Stellenbosch, 2005.

MELLO, D. R. **Dimensionamento de isoladores sob condições de poluição**. (Cigré-Brasil, Ed.) Curso de Isoladores. **Anais...**Rio de Janeiro: Cigré-Brasil, 2017.

MELLO, D. R. DE; MELLO, COSTA JR., R. T. D.; BATISTA, J. T.; MELO, M. E. **Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações e Distribuição**. Citinel, 2001.

JIA, Z. D.; ZHOU, J.; WANG, L. M. **Characteristics of RTV-SIR coating at low air pressure**. Proc. Int. Poser Modulator Conf. High Voltage Workshop, June 30–July 3, p. 216, 2002.

MILES, J.; SHEVLIN, M. **Applying regression and correlation: A guide for students and researchers**. Thousand Oaks, California, Sage Publications, 2001.

MUSTAFA, T. I. A. H.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; ALMAGUER, H. D.; PUCHALE, L. B. **Study of the correlation between weather conditions and protection trips in a 230 kV transmission line in southern Brazil**. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. **Anais...**2012.

Operador Nacional do Sistema (ONS). **Procedimentos de Rede - Submódulo 20.1: glossário de termos técnicos**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FMódulo%20%2FSubmódulo%20.1%2FSubmódulo%20.1.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2017.

PIGINI, A. **Pre-Coating RTV Silicone onto Glass Disc Insulators**. Disponível em: <http://www.inmr.com/pre-coating-rtv-silicone-glass-disc-insulators>. Acesso em: 5 fev. 2018.

PISA, L. F. **Experiência da Itaipu Binacional com uso de elastômero de silicone para evitar descargas disruptivas externas em buchas de 500 kV de transformadores de potência**. X Seminario del Sector Electrico Paraguayo. **Anais...CIGRÉ**, 2012.

PRETTE, A. L. G. **Desenvolvimento de esmaltes cerâmicos: aplicação em isoladores elétricos de alto desempenho**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

RECH, C. Análise dos desligamentos transitórios na LT 230 kV UP. Médice x Camaquã. **Relatório Interno CEEE**, p. 13, 1983.

SANTOS FILHO, N. DOS. **Experiência da CEMIG com revestimentos de silicone tipo RTV em condições extremas de serviço**. World Congress & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings. **Anais...**Rio de Janeiro: 2007.

SKLENICKA, V. Analyzing “Unexplained” Reclosures on the Czech Power Grid. **INMR Magazine**, n. 107, p. 68–74, 2015.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JR, C.; ALMEIDA, I. R. DE. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

ZHIDONG, J.; FANG, S.; HAIFENG, G.; ZHICHENG, G.; WANG, L.; XU, Z. Development of RTV silicone coatings in China: overview and bibliography. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 24, n. 2, p. 28–41, 2008.