UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## UTILIZAÇÃO DE ISOLADORES CERÂMICOS TIPO PILAR NÚCLEO SÓLIDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICAS TIPO COMPACTA.

# **Eduardo Riani Hilsdorf**

Itajubá, Março de 2015

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## **Eduardo Riani Hilsdorf**

## UTILIZAÇÃO DE ISOLADORES CERÂMICOS TIPO PILAR NÚCLEO SÓLIDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICAS TIPO COMPACTA.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientadores: Prof. Dr. Manuel Luis B. Martinez

Prof. Dr. Estácio T. W. Neto

Março de 2015 Itajubá – MG.

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## **Eduardo Riani Hilsdorf**

## UTILIZAÇÃO DE ISOLADORES CERÂMICOS TIPO PILAR NÚCLEO SÓLIDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICAS TIPO COMPACTA.

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de março de 2015, conferindo o **Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica** 

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez
- Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto
- Prof, Dr. Alan Melo Nobrega

Prof. Dr. Credson de Salles

Março de 2015 Itajubá – MG. A síntese desse trabalho foi apresentado preliminarmente no "XX SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica" entre 22 e 26 de outubro de 2012 na cidade do Rio de Janeiro.

Nota:

A norma ABRADEE – CODI 3.2.18.27.1 – Especificação de Isoladores Tipo Pino Polimérico para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV, utilizada neste trabalho para a realização do ensaio de compatibilidade entre isoladores e os cabos cobertos, foi substituída pena norma ABNT/NBR 16327-1 de Dezembro de 2014 porém não houve alteração na definição dos parâmetros e procedimento para realização do ensaio em questão.

#### AGRADECIMENTOS

Ao amigo Eng. Luiz Gardin com quem tive a oportunidade de trabalhar e aprender sobre isoladores de porcelana, compostos/ poliméricos e sua aplicação em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica.

Ao Professor Dr. Manuel Luis B. Martinez pela orientação segura durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Estácio T. W. Neto pelos conhecimentos transmitidos e pela orientação no desenvolvimento dos trabalhos.

Ao amigo Dr. Alan Melo Nóbrega pelo apoio e sugestões na execução dos ensaios e do trabalho.

À minha esposa e filhos pelo apoio e compreensão em minhas viagens e ausências durante o tempo de aulas, ensaios e elaboração da dissertação.

À Isoladores Santana, pelo apoio e incentivo durante o período de mestrado e elaboração dos ensaios e conclusão dos trabalhos.

Agradeço a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

#### RESUMO

O presente trabalho mostra uma avaliação comparativa de desempenho entre os isoladores tipo pilar de porcelana e os isoladores tipo pino poliméricos de polietileno aplicados em redes compactas protegidas, através da analise das simulações computacionais utilizando software Comsol Multiphysics®, avaliação visual em condições de aplicação especificas utilizando-se de câmara de visualização do efeito corona (câmara UV) e pelo ensaio de compatibilidade dielétrica entre o isolador de porcelana e o cabo coberto. O objetivo destes ensaios e simulações é comprovar a possibilidade de utilização de isoladores tipo pilar de núcleo maciço de porcelana (cerâmico) em redes compactas e desmistificar o conceito generalizado da incompatibilidade entre os isoladores de porcelana e a rede compacta, criado nos primeiros anos de utilização dos cabos cobertos, quando se utilizou isoladores de porcelana tipo pino, radiotratados ou não, e se obteve problemas de perfuração dos cabos. Procurou-se, identificar os defeitos mais comuns, como vazio no interior dos isoladores poliméricos, bem como os consequentes danos quando da utilização destes isoladores. Obtiveram-se valores referentes à distribuição de campo elétrico nesses conjuntos que indicaram vantagens para o isolador pilar de porcelana em comparação com o pino polimérico, e o ensaio de compatibilidade comprovou a possibilidade de utilização.

Palavras chave: Isolador polimérico, Isolador rede compacta, Isolador pino PEAD, Isolador pino HDPE, Pilar Porcelana, Rede Compacta, Campo elétrico, Simulação computacional, Comsol Multiphysics®.

#### ABSTRACT

This study shows a comparative evaluation of performance between line post porcelain insulators and polymeric polyethylene pin type insulators applied in covered cables/ Spacer cables line, through analysis of computer simulation using Comsol Multiphysics® software, visual assessment in specific application conditions through corona camera (UV camera) and the dielectric compatibility test between the porcelain insulator and the covered cable. The purpose of these tests and simulations is to prove the possibility of using solid core line post porcelain insulators (ceramic) in compact lines and demystify the generalized concept of incompatibility between porcelain insulators and compact network, created in the early years of covered cables usage, when usually used porcelain pin type insulator, radio-free or not, obtaining punctures on the covered cable. This sought to identify the most common defects such as bubbles inside of polymeric insulators, and the resulting damage when using these insulators. Values were obtained concerning the electric field distribution of these sets which indicated advantages for the porcelain line posts insulator, in comparison with the polymeric pin, and the compatibility test proved the possibility of usage.

Keywords: Polymeric insulator. Compact line insulators, Spacer Cables, HDPE pin insulator, Line Post insulators, Electrical Field. Computational simulation, Comsol Multiphysics®.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| Figura 1 - Capacitor de placas paralelas (a) e capacitor com material dielétrico (b)07  |
|---|
| Figura 2 - Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo09  |
| Figura 3 - Dielétrico formado por dipolos (Vetores polares) intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo - E, e a formação dos campos elétricos associados aos dipolos - E <sub>d</sub> e total interno E <sub>int</sub> |
| Figura 4 - Moléculas apolares em um dielétrico sem vetores polares intrínsecos10  |
| Figura 5 - Dielétrico apolar sujeito a um campo externo não nulo10  |
| Figura 6 - Descargas parciais em cavidades [22]12   |
| Figura 7 - Representação de descarga parcial superficial em um material dielétrico polimérico [22]12  |
| Figura 8 - Representação de arborescência13   |
| Figura 9 - Distribuição de tensão em isoladores15   |
| Figura 10 - Simulação computacional para materiais com constantes dielétricas não compatíveis (a) e compatíveis (b)15   |
| Figura 11 - Fotos de cortes em espaçadores poliméricos mostrando material não uniforme  |
| Figura 12 - Radiografia eletrônica em isolador contendo bolhas de ar interna decorrente de processo de fabricação17   |
| Figura 13 - Fotos de isoladores que continham defeitos internos degradados em uso após algum tempo instalados na rede   |
| Figura 14 - Fotos de isoladores que continham defeitos de fragilidade/trincas decorrentes de UV ou altas temperaturas do processo de fabricação18   |
| Figura 15 - Arborescência elétrica em forma gravata de borboleta, crescendo de um contaminante19  |
| Figura 16 - Contaminação de arborescência elétrica por agua19   |
| Figura 17 - Isolador ANSI 55-6 com esmalte semicondutor aplicados na rosca e na cabeça para redução de radio-interferência  |
| Figura 18 - Ilustração dos efeitos do radio-tratamento sobre as linhas de campo elétrico no isolador ANSI<br>55-6   |
| Figura 19 - Princípio de funcionamento de câmera ultravioleta25   |
| Figura 20 - Esquema básico de montagem do ensaio de compatibilidade elétrica por multi solicitações conforme LAT-EFEI   |
| Figura 21 - Fotos do ensaio de compatibilidade dielétrica - LAT-EFEI27  |
| Figura 22 - a): Isolador pilar cerâmico referencia PPL-257, b): Isolador polimérico tipo pino   |

| Figura 23 - a): Isolador pilar cerâmico PPL-257 b): Isolador polimérico tipo pino29   |
|---|
| Figura 24 - Apresentação dos resultados dos estudos de campo elétrico nos isoladores mostrados nas<br>Tabelas 2 & 3   |
| Figura 25 - Apresentação dos resultados dos estudos de campo elétrico nos isoladores mostrados nas<br>Tabelas 4 & 5   |
| Figura 26 - Estudo de campo elétrico em isolador pilar cerâmico PPL-257 rádio-tratatado   |
| Figura 27 - Estudo de campo elétrico em isolador pilar cerâmico PPL-257 sem rádio-tratatamento  |
| Figura 28 - Formação de descargas ao longo de cabos cobertos fabricados no Brasil, durante ensaios de<br>compatibilidade dielétrica em espaçadores poliméricos [56]   |
| Figura 29 - Imagem do efeito corona em isoladores classe 15 kV - a: Isolador cerâmico pilar sólido, b:<br>Isolador polimérico tipo pino, c: Isolador cerâmico tipo pino   |
| Figura 30 - Imagem do inicio do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico<br>classe de tensão 15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, realizado aos 16 de Setembro de 201139                                    |
| Figura 31 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 5 dias40                                |
| Figura 32 - Imagens do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" (Esquerda) e "a" (Direita) realizado aos 16 de<br>Setembro de 2011 + 6 dias41 |
| Figura 33 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 10 dias41                               |
| Figura 34 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias…42                              |
| Figura 35 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias43                               |
| Figura 36 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "b" cabo preto, realizado aos 16 de Setembro de 2011 +<br>25 dias                  |
| Figura 37 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão<br>15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, fase "a" cabo preto, realizado aos 16 de Setembro de 2011 +<br>25 dias                  |
| Figura 38 - Imagem do inicio do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico<br>classe de tensão 15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, realizado em Outubro de 201246  |
| Figura 39 - Imagem do final do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico<br>classe de tensão 15 kV referência PL-061C - Isoladores Santana, realizado em Outubro de 201247   |

#### LISTA DE TABELAS

| Tabela 1 - Valores típicos para um bom isolador elétrico [54].  |
|---|
| Tabela 2 - Características dos vários projetos de isoladores para a Classe de Tensão de 15kV analisados 30                          |
| Tabela 3 - Tabela 3: Valores dos gradientes de campo elétrico para vários projetos de isoladores para a<br>Classe de Tensão de 15kV |
| Tabela 4 - Características dos vários projetos de isoladores para a Classe de Tensão de 25kV analisados33                           |
| Tabela 5 - Valores dos gradientes de campo elétrico para vários projetos de isoladores para a Classe de<br>Tensão de 25kV           |

#### LISTA DE SÍMBOLOS

- C<sub>0</sub> capacitância inicial
- C<sub>d</sub> capacitância do dielétrico
- E vetor campo elétrico
- E<sub>0</sub> campo elétrico inicial
- E<sub>d</sub> vetor campo elétrico produzido por dipolos em um dielétrico
- E<sub>int</sub> vetor campo elétrico no interior de um dielétrico
- E<sub>m</sub> vetor campo elétrico molecular
- ε permissividade elétrica
- $\epsilon_0$  permissividade elétrica do vácuo
- $\epsilon_r$  permissividade relativa
- K constante dielétrica
- q carga do capacitor
- R resistência elétrica
- U<sub>0</sub> tensão inicial
- $U_d$  tensão aplicada no dielétrico

## SUMÁRIO

| 1 – INTRODUÇÃO   | 01 |
|--|----|
| 1.1 – Breve Histórico da Evolução dos Sistemas Cobertos  | 01 |
| 1.2 – Motivação  | 03 |
| 1.3 – Objetivos  | 05 |
| 2. – CONCEITOS E CONSIDERAÇÕES   | 06 |
| 2.1 – Materiais Dielétricos  | 06 |
| 2.1.1 – Polarização dos Materiais  | 06 |
| 2.1.2 – Condução dos Materiais Dielétricos   | 06 |
| 2.1.3 – O Modelo Capacitor de Placas Planas Paralelas – Permissividade   | 07 |
| 2.1.4 – Campo Elétrico em Meios Dielétricos  | 08 |
| 2.2 – Mecanismos de envelhecimento elétrico e degradação de materiais poliméricos  | 11 |
| 2.2.1 – Descargas Parciais Internas  | 11 |
| 2.2.2 – Descargas Parciais Superficiais  | 12 |
| 2.2.3 – Arborescência Elétrica   | 13 |
| 2.2.4 – Arborescência em Água  | 13 |
| 2.2.5 - Corrente de Fuga, Trilhamento Elétrico e Problemas Encontrados com Utilização<br>de Isoladores de Pino Poliméricos | 14 |
| 2.3 - Simulação Computacional - Comsol Multiphysics®   | 19 |
| 2.4 – Porcelanas e sua aplicação como isolador elétrico  | 20 |
| 2.4.1 – Propriedades Dielétricas da Porcelana  | 22 |
| 2.4.2 – Utilização de Esmalte Semicondutor (Rádio-tratamento) para Redução de  |    |
| Rádio-interferência.   | 22 |
| 3 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL   | 24 |
| 3.1 – Avaliações por meio de Simulação Computacional por Elementos Finitos   | 24 |
| 3.2 – Análise dos Isoladores por Meio de Câmaras Corona (Câmara UV)  | 24 |
| 3.3 – Ensaio de Compatibilidade Dielétrica por Multi Solicitações.   | 26 |
| 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO   | 28 |
| 4.1 – Resultados dos Estudos e Modelos de Simulação  | 28 |
| 4.2 – Resultados da Análise do Desempenho de Isoladores por Intermédio de  |    |
| Câmaras Corona (Câmara UV)   | 36 |
| 4.3 - Resultados do Ensaio de Compatibilidade Dielétrica por Multi Solicitação   | 38 |
| 5 – CONCLUSÕES   | 49 |
| 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS   | 51 |
| 7 – SUGESTÕES DE LEITURA - LITERATURA RECOMENDADA  | 52 |
| REFERÊNCIAS  | 53 |

#### Preâmbulo

Esta dissertação discute a possibilidade de se utilizar isoladores cerâmicos pilar na construção de redes compactas protegidas - Spacer Cables. Para tanto, se encontra dividida em cinco capítulos. O primeiro descreve o histórico, o estado atual da rede compacta protegida e seus componentes, os objetivos e a motivação para realização da pesquisa. O segundo apresenta conceitos e assim, dentre outros, os principais mecanismos de envelhecimento responsáveis pela redução da vida útil dos materiais isolantes, a porcelana e sua aplicação como isoladores elétricos, a técnica de aplicação de esmalte semicondutor em isoladores de porcelana para redução de rádio-interferência, bem como as vantagens da utilização da simulação computacional pelo software Comsol Multiphysics<sup>®</sup>. O terceiro capítulo mostra a metodologia experimental, dividida em três partes: Simulação computacional, análise visual do desenvolvimento dos fenômenos por intermédio de câmaras corona - *"Câmara UV"* e, finalmente, o ensaio de compatibilidade dielétrica. A apresentação dos resultados e discussão está contida no quarto capítulo, também divido em três partes: Simulação computacional, análise das imagens obtidas por meio das câmaras corona e ensaios. Por fim os capítulos quinto e sexto, respectivamente, apresentam as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 1- INTRODUÇÃO

As redes compactas protegidas surgiram na década de 50, nos Estados Unidos, quando Bill Hendrix desenvolveu um sistema que utilizava cabos cobertos, denominado "*Spacer Cable Systems*". Este sistema foi desenvolvido para que a rede aérea tivesse uma compactação próxima a encontrada nas redes subterrâneas, possibilitando a utilização de até quatro circuitos na mesma posteação, assim aumentando a confiabilidade, bem como a segurança dos sistemas de distribuição aéreos [1, 2].

A rede compacta protegida é composta por três condutores cobertos com uma camada de material polimérico apoiados em espaçadores ou em separadores poliméricos, resultando em uma partilha da queda de tensão entre ambos, que são sustentados por um cabo mensageiro de aço. Outros elementos envolvidos na configuração de uma rede aérea compacta protegida são os isoladores poliméricos tipo pino e bastão e os acessórios de amarração (anéis, laços e fios).

Os dielétricos utilizados nos equipamentos e acessórios da rede compacta protegida pertencem à classe dos materiais poliméricos e tem natureza diversa, como o *Polietileno Reticulado* (XLPE), *Polietileno de Alta Densidade* (HDPE), *Epóxi, Silicone, Borracha de Etilenopropileno* com formulação e processamento distintos, dependente de quem os processa para sua forma final.

Por não possuírem blindagem metálica e apresentarem campo elétrico não nulo em sua superfície, os cabos utilizados nas redes compactas não são considerados isolados, apenas protegidos ou cobertos. A forma construtiva desses cabos permite que fiquem mais próximos uns dos outros, bem como de galhos de árvores, sem risco de ocorrência de curto circuitos. De fato ocorre nesses casos curtos circuitos de altíssima impedância, propiciando a diminuição das interrupções do fornecimento de energia elétrica. Além disso, é possível considerar uma diminuição do túnel de poda, bem como obter uma melhoria na estética e também uma diminuição do número de podas. Em resumo, este tipo de rede apresenta a versatilidade e economia próprias de um sistema aéreo convencional, com a vantagem de compactação [3].

#### 1.1- Breve Histórico da Evolução dos Sistemas Cobertos:

Os primeiros sistemas protegidos construídos operavam em 5 kV. Nesses casos também eram utilizados isoladores do tipo pino de porcelana. À medida que os circuitos migraram para classes de tensão maiores, tornou-se necessário desenvolver novos conceitos e modelos aptos a suportar as solicitações associadas aos gradientes de tensão superiores.

O conceito das redes compactas em 5 kV foi pratica e diretamente transferido para os sistemas com tensões de 15 kV. A única mudança relevante ocorrida, no caso, se referia aos componentes. O tamanho dos

espaçadores de acrílico e a espessura da isolação dos condutores foram incrementados.

O sistema de 15 kV assim concebido funciona. No entanto, a experiência em campo mostrou que os componentes, que trabalhavam de forma adequada em 5 kV, já não obtinham o mesmo nível de desempenho em 15 kV. O aumento das solicitações dielétricas, aplicada à da cobertura dos condutores, e as altas correntes de carregamento associadas resultaram em trilhamento na cobertura dos condutores e subsequente erosão dos espaçadores. Isto reduziu a confiabilidade do sistema.

Tornava-se evidente a necessidade do desenvolvimento de novos materiais com vistas à obtenção de uma maior confiabilidade para os sistemas de 15 kV. A primeira estratégia voltou-se para melhorar o desempenho dos cabos cobertos. O *Polietileno de Baixa Densidade* material com alto peso molecular começou a ser pesquisado para utilização na cobertura dos cabos, por causa de sua alta rigidez dielétrica e baixa constante dielétrica. Os ensaios em laboratório revelaram melhorias dielétricas e mecânicas significativas no sistema e, consequentemente, na sua confiabilidade, quando da aplicação de polietileno extrudado como material para a cobertura dos condutores.

Em 1960, os sistemas de distribuição expandiram-se. A operação, em 25 e 35 kV, se revelou mais comum, o que acarretou problemas de *RIV* (Radio Influence Voltage). Com vistas a contornar estes problemas, começou-se a utilizar isoladores RF (Radio-Free) para aplicação em sistemas com cabos nus. A mudança - migração para o uso de isoladores RF nos sistemas de cabos cobertos foi lenta, e, portanto, não ocorreram problemas imediatos com os cabos nos sistemas suportados por esse novo tipo de isoladores.

Com a necessidade de construção de redes compactas em tensões mais altas, os conceitos desenvolvidos durante as etapas de projeto dos sistemas de 5 e 15 kV, bem como a experiência oriunda da operação em campo foram utilizados para o desenvolvimento dos sistemas para as classes de tensão de 25 e 36,2 kV. A evolução significativa nestes projetos foi a alteração da espessura da cobertura do condutor. Assim sendo, a princípio, os espaçadores para os sistemas em 36,2 kV mantiveram os mesmas distâncias de isolamento requeridas para os sistemas em 15 kV.

A boa experiência vivenciada nos sistemas 15 kV foi baseada em resultados experimentais que limitavam a máxima corrente de carga dos condutores. Restringir o carregamento, para evitar o trilhamento dos cabos cobertos, funcionou bem para as classes de tensão de até 15 kV, em condições atmosféricas medianas. Porém, em atmosferas contendo poluentes, os componentes do sistema de 15, 25 e 36,2 kV apresentaram problemas. À época não existiam espaçadores de polietileno no mercado. A atenção, por conseguinte, foi focada para encontrar um material melhor e a correta distância de escoamento para espaçadores de 35 kV.

Em meados da década de 60, medições trifásicas das correntes de carga no sistema, sob condições de serviço simuladas (névoa salina), mostraram que o polietileno resistente a trilhamento, devido às

características de espalhamento (gotejamento, derramamento) da água, era o material com melhor desempenho para espaçadores e cabos.

Durante este período, os isoladores mais comuns em uso para distribuição de energia em 36.2 kV eram de porcelana do tipo pilar sólido. Em retrospecto, agora é sabido que o isolador tipo pilar foram os mais compatíveis para o desenvolvimento dos sistemas *Spacer Cables* que os isoladores de porcelana tipo pino, devido a sua baixa capacitância, bem como ao modo de formação do campo elétrico ao seu redor. Esta é a razão pela qual não ocorreram problemas imediatos com os novos materiais resistentes a trilhamento.

Percebeu-se que a maioria das falhas na rede compacta envolvia os isoladores. Estes defeitos nos isoladores demoram um longo período de tempo para serem constatados. A experiência de muitos circuitos levou a reconhecer que se tratava de uma falha comum. O que acelerou a tendência de falha do sistema 15 kV foi a mudança de isoladores, do tipo pino com topo plano, para isoladores, do tipo pino rádio tratados; e, no caso dos sistemas 36.2 kV, a alteração do isolador de porcelana, do tipo pilar sólido, para o isolador mono-corpo, do tipo pino Classe 55-6 de acordo com a norma ANSI C29.5.

Existia uma necessidade técnica para que fosse desenvolvido um isolador para melhorar a confiabilidade do sistema *Spacer Cables*. A experiência do polietileno para cabos e espaçadores foi tão bem sucedida que se tornou óbvio recorrer ao uso do mesmo material para o desenvolvimento de um isolador adequado. Assim, em um primeiro momento, um isolador polimérico, tipo pilar, foi tentado, mas surgiram problemas de manufatura. Deste modo, em seguida, focou-se a atenção na obtenção de um isolador polimérico tipo pino.

Devido à sucessão dos fatos, principalmente quanto à utilização de isoladores cerâmicos, tipo pino rádio tratados, consolidou-se o costume de não serem usados isoladores de porcelana em redes compactas. Tal prática foi difundida, passando, por conseguinte, as distribuidoras de energia a adotarem, como padrão, em suas redes compactas, o isolador de pino polimérico.

#### 1.2- Motivação

A geometria e os materiais utilizados na fabricação dos espaçadores, isoladores e acessórios de fixação têm efeito sobre a distribuição de campo elétrico e no modo como ocorre aprisionamento de contaminantes [4].

Quando em operação a rede compacta protegida está sujeita a solicitações múltiplas, tais como variação de temperatura, campo elétrico, solicitações mecânicas e influência do meio, podendo, portanto, apresentar diferentes comportamentos frente às diversas solicitações. A ação individual ou combinada destas solicitações é responsável pelo envelhecimento e degradação dos materiais poliméricos, podendo levar o

sistema isolante à perda de requisitos mínimos de suportabilidade para continuidade de operação.

A suportabilidade dielétrica de uma superfície isolante é substancialmente reduzida quando submetida a determinadas condições climáticas como chuva ou alta umidade. Tal redução pode se tornar mais acentuada quando a superfície isolante é exposta a uma atmosfera poluída. Entende-se como atmosfera poluída, do ponto de vista elétrico, uma atmosfera que em um certo período de tempo propicia a formação, sobre a superfície isolante, de uma camada constituída por substâncias que dissolvidas em água produzem soluções condutoras. Não ocorre variação considerável no comportamento dielétrico da superfície se a camada se mantém seca, quando comparada com a superfície limpa. Entretanto, se ocorre um processo de umidificação que dissolva, mas não remova os sais contidos na camada, parcial ou totalmente, pode ocorrer a formação de arcos sobre a superfície iniciando um processo que pode culminar em uma descarga disruptiva. Além disso, os arcos formados podem gerar ozônio (Agente oxidante), sendo este um dos responsáveis pela corrosão da ferragem dos isoladores [5].

Isoladores poliméricos tipo pino estão sendo cada vez mais utilizados e ganhando uma fatia do mercado de componentes elétricos devido ao seu baixo custo e desempenho satisfatório nos sistemas de 15kV construídos em regiões livres de poluição. Nestes isoladores pode haver a presença de vazios na estrutura polimérica originados pela formação de bolhas de ar durante o processo de injeção do polímero. Podem ainda aparecer trincas ocasionadas pela fadiga devido às solicitações termomecânicas durante operação ou pela má colocação da massa de fixação no isolador. O campo elétrico aplicado e a existência de condições adequadas, como a pressão do gás no interior do vazio, propiciam a ocorrência de descargas parciais no interior da região de defeito. A ocorrência contínua de descargas parciais no interior destas regiões forma caminhos condutores nos polímeros, conhecidos como arborescência elétrica, e que usualmente levam o material à ruptura dielétrica. O isolador danificado pode levar ao desligamento da linha, gerando custos de manutenção com a reposição de componentes, bem como com o aumento do tempo interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores [6].

Uma vez que existem concessionárias de energia elétrica no Brasil que utilizam em seus sistemas *Spacer Cables* isoladores de porcelana tipo pilar, despertou-se para a necessidade de estudar e desenvolver um projeto de pesquisa para avaliar quais os impactos da utilização destes isoladores nestas construções.

O avanço da tecnologia possibilitou a utilização de métodos numéricos para o cálculo de campos elétricos em geometrias complexas. Assim, durante o andamento deste trabalho, foram realizadas modelagens pelo método dos elementos finitos, procurando verificar os impactos nos gradientes de campo elétrico devido à utilização de isoladores de porcelana nas redes compacta. Também foram realizadas avaliações comparativas com auxílio de câmaras detectoras de corona e, por fim, a validação das hipóteses do estudo através do ensaio de compatibilidade dielétrica previsto na norma *ABRADEE – CODI 3.2.18.27.1* – *Especificação de Isoladores Tipo Pino Polimérico para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV*.

## 1.3- Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Comprovar a possibilidade de utilizar isoladores cerâmicos tipo pilar de núcleo sólido em redes de distribuição de energia elétrica tipo compacta (*Spacer Cables*);
- Avaliar comparativamente o desempenho dos isoladores poliméricos tipo pino e os cerâmicos de núcleo sólido para verificar áreas de concentração de campo elétrico e os gradientes, por meio de simulação computacional.

## 2- CONCEITOS E CONSIDERAÇÕES

#### 2.1- Materiais Dielétricos

Os materiais dielétricos são conhecidos por possuírem a propriedade fundamental de se polarizarem quando submetidos a um campo elétrico, ao passo que também são reconhecidos como isolantes por apresentarem uma condutividade suficientemente pequena o que, por sua vez, possibilita seu emprego como meio de separação física de partes condutoras submetidas a uma diferença de potencial. Esses dois termos, dielétrico e isolante, são muitas vezes empregados como sinônimos, apesar do termo dielétrico ser mais abrangente [15].

#### 2.1.1- Polarização dos Materiais

Um material dielétrico ideal é o que não tem cargas livres. Contudo, todos os meios materiais se compõem de moléculas, que, por sua vez, se constituem de partículas carregadas (núcleos atômicos e elétrons). Deste modo, as moléculas de um dielétrico são certamente afetadas pela presença de campo elétrico externos. O campo elétrico produz uma força sobre cada partícula carregada, sendo partículas positivas empurradas no sentido do campo e partículas negativas no sentido inverso, de forma que as partes positivas e negativas de cada molécula sejam deslocadas de suas posições de equilíbrio em sentidos opostos. Estes deslocamentos são, todavia, limitados (na maioria dos casos a frações muito pequenas de um diâmetro molecular) por intensas forças restauradoras formadas pela mudança da configuração de carga na molécula. O efeito total, do ponto de vista macroscópico, é mais facilmente visualizado como um deslocamento no dielétrico de toda a carga positiva em relação à carga negativa. Diz-se então que o dielétrico está polarizado.

Um dielétrico polarizado, mesmo eletricamente neutro, produz em média um campo elétrico, tanto em pontos exteriores como no seu interior. Como resultado, defronta-se com o que parece ser uma situação complexa: a polarização do dielétrico depende do campo elétrico total do meio, porém uma parte do campo elétrico é produzida pelo próprio dielétrico. Além disso, o campo elétrico distante do dielétrico pode modificar a distribuição de cargas livres nos corpos condutores e isto, por sua vez, altera o campo elétrico dentro do dielétrico.

No item 2.1.4 são apresentados alguns dos principais mecanismos de polarização comuns aos materiais cerâmicos e poliméricos [16].

#### 2.1.2- Condução nos Materiais Dielétricos

O conhecimento dos processos associados como os mecanismos de condução e ruptura elétrica são de fundamental importância para a utilização dos materiais poliméricos sólidos como isolantes elétricos. Os isolantes poliméricos quando submetidos aos campos elétricos sofrem um processo de polarização que é uma forma de ordenamento espacial das partículas eletricamente carregadas existentes no interior do material, sob

a ação de um campo elétrico. Tanto a polarização (correntes de deslocamento) quanto a corrente de condução (corrente que representa o movimento dos portadores de carga em um meio neutro) que se estabelecem no dielétrico são resultantes da orientação e do movimento de partículas eletricamente carregadas. Durante a polarização as cargas ligadas às moléculas que compõem os materiais poliméricos são postas em movimento, no entanto ficam confinadas dentro de limites. A condução é realizada pelo movimento de portadores com cargas livres. No entanto, em geral, a presença de pequenas quantidades de impurezas é que determina o deslocamento das cargas livres - condução, que assim não é atribuída à substância básica do dielétrico. Deste modo, a polarização pode ser vista como o deslocamento elástico de cargas no interior da matéria (corrente de deslocamento). Quando a tensão aplicada é retirada, estas cargas tendem a retornar à sua posição inicial. Correntes capacitivas podem existir nos isolantes por um longo período de tempo sob a ação de um campo elétrico alternado [15, 17].

Os estudos experimentais mostram que inúmeros fatores influenciam no processo de ruptura dielétrica e podem ser associados não só às impurezas que permeiam um composto isolante, mas, também, à existência de cargas espaciais e, ainda, à morfologia das cadeias poliméricas, ou seja, sua cristalinidade. Como exemplo, é possível associar a rigidez elétrica do polietileno ao seu grau de cristalinidade, que diminui com o crescimento das regiões amorfas. No entanto, para a maioria das aplicações as falhas elétricas são influenciadas pelo projeto, impurezas, ambiente de uso e tensão aplicada [15,18].

#### 2.1.3- O Modelo Capacitor de Placas Planas Paralelas - Permissividade [19]

Considera-se um capacitor de placas paralelas, um arranjo aonde existe vácuo ou ar entre duas placas planas, como no caso da Figura 1a.



Figura 1 - Capacitor de placas paralelas (a) e capacitor com material dielétrico (b)

Sendo "q" a carga do capacitor e " $U_0$ " a leitura do voltímetro, a capacitância " $C_0$ " desse capacitor é definida como mostrado pela Equação (1):

$$C_0 = q/U_0 \tag{1}$$

Supondo agora uma situação um pouco diferente onde é introduzido entre as placas do capacitor um material dielétrico qualquer, como mostra a Figura 1b, bem como que a carga permaneça a mesma do caso anterior. Neste caso, pode-se escrever:

 $C_0 U_0 = C_d U_d \tag{2}$ 

 $U_0/U_d = C_d/C_0$  (3)

Como as leituras no voltímetro indicam que  $U_d < U_0$  conclui-se que:

$$C_d/C_0 > 1$$
 (4)

Ou,

$$C_d > C_0 \tag{5}$$

Então, a capacitância do capacitor contendo um dielétrico é maior que a capacitância do capacitor que contém ar ou vácuo entre suas placas. Esse resultado é geral, qualquer que seja o dielétrico.

Pode-se escrever que,

| $U_0 = k.U_d$ | (6) |
|---------------|-----|
| $E_0 = k.E_d$ | (7) |
| $C_d = k.C_0$ | (8) |

Que indica que a capacitância aumenta de um fator k quando um dielétrico é introduzido entre as placas de um capacitor de placas planas paralelas. O equacionamento e a conclusão anteriores são gerais e valem para qualquer forma de eletrodos, porém o equacionamento como mostrado é o mais simples entre todos os possíveis. O fator K recebe o nome de constante dielétrica, sendo um número adimensional. Definese  $K = \mathcal{E}/\mathcal{E}_{0 \text{ onde}} \mathcal{E}$  é a permissividade relativa do material e  $\mathcal{E}_{0}$  é a permissividade elétrica do vácuo [16].

#### 2.1.4- Campo Elétrico em Meios Dielétricos [20]

Em termos de polarização, do ponto de vista microscópico, um dielétrico sob a ação de um campo externo está sujeito a uma combinação de dois fatores: Assim, caso existam, os dipolos elétricos intrínsecos podem ser orientados na direção do campo elétrico externo, ou caso, o material não possua dipolos elétricos intrínsecos, o campo externo pode provocar o aparecimento de dipolos elétricos induzidos. São apresentados separadamente cada um desses fatores. Quando um campo elétrico externo age sobre um dielétrico formado por materiais que possuem dipolos elétricos intrínsecos, como no caso da água, esses dipolos são submetidos a ação de forças elétricas, que resultam em torques que tendem a orientar os vetores polares na mesma direção e sentido que o campo externo aplicado. Esta orientação não é perfeita, tendo em vista que a orientação dos dipolos também é influenciada pela temperatura do dielétrico, que tende a perturbar o alinhamento, introduzindo um fator entrópico. Na Figura 2 é apresentada uma representação esquemática de um material dielétrico submetido a um campo elétrico externo.



Figura 2 - Material dielétrico formado por dipolos intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo

Como consequência do alinhamento parcial dos vetores polares na direção do campo externo aplicado, aparece um momento polar resultante, que é a soma dos vetores polares individuais. No entanto, os dipolos, ao se orientarem na direção do campo elétrico externo, produzem um campo elétrico interno -  $E_D$ , que é a soma vetorial dos campos elétricos associados a cada dipolo. O campo elétrico de um dipolo é mais intenso na região entre as duas cargas que o compõem. Nessa região o campo elétrico tem sentido oposto ao do vetor polar, o que significa que o campo elétrico -  $E_D$  é orientado, principalmente, na direção do campo elétrico externo, mas no sentido oposto, o que resulta na diminuição do valor do campo elétrico no interior do dielétrico. Quando isso ocorre, os próprios dipolos são atingidos, pois sua orientação é devida ao campo elétrico total que age sobre eles, e assim, o campo interno, interage sucessivamente com o campo externo, até que se chega à situação de equilíbrio entre os campo externo aplicado e o campo  $E_D$  produzido pelos dipolos. Mesmo na situação de equilíbrio, o campo elétrico  $E_D$  dentro do dielétrico é menor do que o campo externo. Esta situação é apresentada na Figura 3. O campo elétrico que atua sobre os dipolos individuais não é o campo externo E ou  $E_D$ , e sim um campo elétrico molecular  $E_M$ .



Figura 3 - Dielétrico formado por dipolos (Vetores polares) intrínsecos sob a ação de um campo elétrico externo - E, e a formação dos campos elétricos associados aos dipolos - ED e total interno EINT.

Um material dielétrico que não possui vetores polares intrínsecos também pode sofrer a influência de campos elétricos externos. Isso porque, apesar de não ter moléculas ou outros constituintes polares, ele é formado por moléculas apolares, nos quais o centro "geométrico" das cargas positivas coincide com o centro das cargas negativas, como na Figura 4, desde que não exista um campo elétrico externo atuando.



Figura 4 - Moléculas apolares em um dielétrico sem vetores polares intrínsecos

Quando expostas a um campo externo, os centros das cargas negativas e positivas, que antes estavam, em média, em uma posição coincidente, ficam submetidos à ação da força desenvolvida pelo campo elétrico. Deste modo, os centros de cargas terminam por se deslocar de uma determinada distância. Essa separação não aumenta indefinidamente, porque existe a força elétrica de atração entre as cargas, que afinal, é o fator responsável pela existência da matéria, como supostamente posto pelos modelos físicos que tentam explicar os fenômenos naturais. Assim, considera-se que em termos genéricos cada átomo - molécula pode ser "esticada", estando as cargas negativas unidas às positivas por meio de uma "mola" microscópica fictícia, como pode se ver na Figura 5.

> constituintes de um dielétrico apolar "esticados" pelo campo elétrico



Figura 5 - Dielétrico apolar sujeito a um campo externo não nulo

Quando o campo externo não se encontra aplicado, as "molas fictícias" fazem com que os centros de cargas voltem a ficar situados na posição coincidente original. Quanto maior o campo externo, mais distendidas ficam as molas. Caso o campo elétrico aplicado seja muito grande, ocorrem fenômenos conhecidos como "Disrupção Dielétrica", a princípio na sua forma microscópica, como o que se verifica com uma mola submetida a um esforço superior à sua suportabilidade. Assim sendo, os materiais podem ser destruídos por fenômenos na forma de avalanches.

O campo externo induz a formação de dipolos elétricos, chamados por esse motivo de "Dipolos Induzidos". Os vetores polares se orientam na mesma direção e sentido que o campo externo o que resulta em um processo de polarização, similar ao verificado no caso dos dipolos intrínsecos. Uma vez que ocorra a formação de dipolos induzidos, os dois processos se assemelham muito, uma vez que o campo elétrico no interior do material é mais intenso na direção dos vetores polares. Para fins de análise, pode-se considerar que surge no sentido contrário um campo elétrico, orientado na direção contrária à do campo externo. Desse modo, o campo total E<sub>D</sub> no interior do dielétrico, somatória dos campos elétricos atômicos ou moleculares, fica menor do que o campo externo, da mesma forma como ocorre quando os dipolos são intrínsecos. Como

em geral os materiais são formados por constituintes polares e apolares, o campo elétrico externo aplicado orienta os dipolos intrínsecos na sua direção, além de produzir dipolos induzidos, que também se orientam da mesma forma em relação ao campo externo, o que produz um campo elétrico  $E_D$  no interior do dielétrico inferior ao campo elétrico externo aplicado E.

De um modo geral, esta é uma descrição qualitativa bastante adequada para descrever o comportamento dos dielétricos em presença de campos elétricos externos, desde que estes não sejam muito intensos. Quando isto ocorre, a rigidez dielétrica do material pode ser quebrada e ele passa da condição dielétrica para a de condutora.

# 2.2 Mecanismos de envelhecimento elétrico e degradação de materiais poliméricos

Denomina-se envelhecimento ao processo de mudança não reversível das características isolantes do material que ocorre ao longo de seu tempo de uso. Os fatores que influenciam nos processo de envelhecimento podem ser internos ou externos e seus mecanismos podem estar associados a vários fatores e naturezas, que podem ocorrer de modo conjunto ou separado. Deste modo o envelhecimento pode estar associados a processos de origem elétrica, térmica, mecânica e química [21].

#### **2.2.1- Descargas Parciais Internas**

Em dielétricos gasosos e líquidos, dentro de certos limites, após a ocorrência de ruptura dielétrica e a remoção da tensão aplicada, a mobilidade das partículas material que compõem o meio permite que a região sob a condição de ruptura recupere integralmente sua rigidez elétrica. Nos dielétricos sólidos, ao contrário, a ruptura dielétrica resulta na destruição local do dielétrico. As descargas parciais internas nos isolantes ocorrem devido à existência de microvazios ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, às imperfeições das interfaces de isolantes dispostos em camadas, tal como ocorre nos pontos de defeitos nos semicondutores junto ao isolante. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades. Essa concentração de linhas de campo dá início ao processo de descargas incompletas em termos da extensão do isolante, assim sendo parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico até a sua perfuração [15, 22, 23], ou com sorte estabilização.

A Figura 6 mostra esquematicamente como pode ocorrer uma descarga parcial em um isolante com uma cavidade, por exemplo, preenchida por um gás.



Figura 6 - Descargas parciais em cavidades [22]

Como mostra a Equação 7,  $E_0 = k E_d e k = \mathcal{E}/\mathcal{E}_0$ , de onde tem-se:

$$\mathbf{E}_1/\mathbf{E}_2 = \mathbf{\varepsilon}_2/\mathbf{\varepsilon}_1 \qquad (9)$$

Assim pode-se verificar que a existência de um dielétrico submetido a um campo elétrico leva à concentração do campo elétrico no material na razão inversa das constantes dielétricas. Por exemplo, para  $\varepsilon_1=3\varepsilon_0$  e  $\varepsilon_2=\varepsilon_0$ , tem-se  $\varepsilon_2=3$   $\varepsilon_1$  [15] o que pode gerar gradientes superiores aos limites de suportabilidade do gás e por conseguintes eflúvios e descargas limitadas, ou seja, parciais.

#### 2.2.2- Descargas Parciais Superficiais

Descarga parcial superficial é a descarga que ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo por sobre a superfície. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede certo valor crítico, inicia-se o processo de descarga superficial. Assim como as descargas internas, as descargas superficiais podem resultar em alterações na superfície iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como trilhamento também podem levar o isolamento à ruptura total. Na Figura 7 está representado um caso típico esquemático onde há uma descarga superficial.



Figura 7 - Representação de descarga parcial superficial em um material dielétrico polimérico [22]

Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos, em saias de isoladores e no sistema

de alívio de barra de geradores [22, 24, 25].

#### 2.2.3- Arborescência Elétrica

Este fenômeno de pré-ruptura está associado principalmente à existência de vazios e impurezas no interior da isolação e com a ocorrência de descargas parciais quando o dielétrico está submetido a um campo elétrico. As descargas parciais causam o aquecimento de pontos localizados. Esse processo de degradação é reconhecido pela formação de canais, a partir do ponto de origem, que apresentam a forma de um arvoredo, como pode ser visto nas representações da Figura 8 [9, 15, 26].



Figura 8 - Representação de arborescência

As arborescências elétricas produzem cavidades em forma de canais, com encaminhamento paralelo ao campo elétrico aplicado, e são resultantes da decomposição do material. Este fenômeno pode ser controlado quando são aprimoradas as técnicas de produção do material isolantes, como a tripla extrusão, limpeza do material e do processamento, e a injeção de aditivos que inibem reações necessárias ao desenvolvimento da arborescência [9,15, 26].

## 2.2.4 Arborescência em Água

A arborescência em água relaciona-se com a difusão de umidade ou vapor de água pelos isolantes, comum aos materiais poliméricos que, apesar da aparência consistente e da baixa permeabilidade, têm essa característica. Diferente da arborescência elétrica, que apresenta um crescimento rápido levando à ruptura dos isolantes, por exemplo, polietileno, em pouco tempo, a arborescência em água tem crescimento lento e a ruptura do material ocorre durante seu processo de envelhecimento, em torno de dez anos de vida. A arborescência em água consiste de caminhos filamentares entre pequenas cavidades, paralelos ao campo elétrico, pelos quais a umidade penetra sob a ação de um gradiente elétrico. A umidade pode estar no estado líquido ou vapor, assim em termos de temperatura de trabalho, os pontos com água são os mais quentes. Portanto, estes pontos são submetidos a alta pressão e grande concentração de campo elétrico. Essas condições levam o vapor de água a se difundir a partir do ponto inicial para as proximidades. Pode-se dizer que este fenômeno não é ainda conhecido em detalhes, apesar de serem conhecidos aditivos que conferem alguma resistência a ele [9, 15, 26].

## 2.2.5- Corrente de Fuga, Trilhamento Elétrico e Problemas Encontrados com Utilização de Isoladores de Pino Poliméricos.

Corrente de fuga é o termo geralmente utilizado para indicar o fluxo de corrente anormal ou indesejada em um circuito elétrico. O crescente depósito condutivo decorrente de poluição que se fixa na superfície dos isoladores propicia o surgimento de caminhos para correntes elétricas também superficiais. Estas correntes, superiores em amplitude às que circulam pelo interior dos isolantes - isoladores, são denominadas genericamente de correntes de fuga, e percorrem o caminho entre o condutor de alta tensão e o potencial de terra [29].

Os processos naturais de umidificação, oxidação e contaminação das superfícies dos isolantes empregados para uso externo (ao tempo) podem resultar em elevada condução de corrente superficial, uma vez que esta é basicamente associada com a diminuição da resistividade superficial do isolante. Assim sendo, trilhas são definidas como caminhos condutores permanentes formados na superfície do isolante [15, 27].

A circulação de corrente em superfícies com a condutividade aumentada, como por exemplo pela umidade, leva a um aquecimento do local que resulta na evaporação da água e consequentemente na diminuição da condutividade, criando regiões secas com valores elevados de temperatura. Durante a repetição dos processos de umidificação e secagem da superfície, pequenos arcos ocorrem curto circuitando as regiões secas, podendo produzir a carbonização do material isolante (trilhamento) ou a perda do material (erosão). Esse fenômeno é, portanto, caracterizado pela formação de resíduos em carbono acompanhados por cintilações luminosas, chamadas, genericamente de corrente de fuga, e leva à deterioração do material isolante com a formação de trilhas [15, 28].

Materiais isolantes para uso externo, principalmente quando sujeitos a campos elétricos não uniformes, devem ser avaliados quanto à capacidade de resistir ao trilhamento elétrico. Para tanto diversos ensaios são previstos em normas, que permitem selecionar os isolantes que suportam melhor o fenômeno e que sejam mais adequados aos ambientes em que são aplicados. Outra situação que pode contribuir ou agravar a ocorrência de trilhamento elétrico diz respeito à compatibilidade dielétrica quando diferentes isolantes são empregados em conjunto e estão sujeitos a campos elétricos, de natureza elevada ou não. Na Figura 9 pode-se verificar o efeito do emprego de diferentes dielétricos e o comportamento do campo elétrico em cada material, como no caso de um cabo coberto sobre isolador [15].



Figura 9 - Distribuição de tensão em isoladores

Segundo a Equação 3,  $U_0/U_d = C_d/C_0$ . A Equação 8 mostra que  $C_d = KC_0$ . Assim é possível escrever:

$$U_0/U_d = C_d/C_0 = \epsilon/\epsilon_0$$
 (10)

Ou então:

$$U_1/U_2 = C_2/C_1 = \varepsilon_2/\varepsilon_1$$
 (11)

No exemplo da Figura 9, seja um cabo coberto com isolante a base de polietileno ( $\mathcal{E}_1 = 2,3$ ) apoiado sobre um isolador de porcelana ( $\mathcal{E}_2 = 6$ ). Se as espessuras dos dielétricos forem aproximadamente iguais, os potenciais são distribuídos nos dielétricos envolvidos de modo que U<sub>1</sub> (Potencial no polietileno) seja aproximadamente 2,6U<sub>2</sub> (Potencial na porcelana). Este resultado, U<sub>1</sub>= 2,6U<sub>2</sub>, indica que a maior parcela da tensão se encontra sobre a cobertura do condutor, o que pode contribuir para estabelecer as condições do processo de trilhamento elétrico. Caso o material empregado para o isolador seja compatível com o material da cobertura do cabo, ou seja, com a mesma constante dielétrica, as tensões seriam distribuídas equilibradamente entre os isolantes, como mostrado na Figura 10.

Na Figura 10 estão ilustradas as duas situações, apresentando resultados obtidos por meio de simulação computacional pelo método dos elementos finitos [15, 21].



Figura 10 - Simulação computacional para materiais com constantes dielétricas não compatíveis (a) e compatíveis (b)

Esta foi exatamente a condição ocorrida no passado, quando do início da rede compacta utilizaram-se isoladores de porcelana tipo pino, com pouca espessura de dielétrico e com alto valor de constante dielétrica, provocando solicitações por concentração de campo elétrico na região da capa do cabo e a consequente deterioração nesta região. Hoje é sabido que esta estratégia foi um erro e que somada a utilização da

tecnologia do radio-tratamento, prejudicou a imagem do isolador de porcelana antes que se estudasse uma condição adequada de utilização do mesmo.

Como visto, vários processos podem causar envelhecimento e degradação dos materiais poliméricos. A geometria dos espaçadores, isoladores e acessórios de fixação afeta não só a distribuição de campo elétrico, mas, também, o aprisionamento de contaminantes e poluentes. O sistema aéreo de distribuição está sujeito ainda a solicitações múltiplas como variações de temperatura, solicitações mecânicas e influência do meio podendo, portanto apresentar diferentes comportamentos frente às diversas solicitações [30]. O sinergismo destes fatores degrada os materiais poliméricos e pode causar para o sistema isolante a perda dos requisitos mínimos de suportabilidade para continuidade de operação [31, 32].

O alto valor da resistividade superficial dos polímeros isolantes usualmente empregados nas redes compactas limita a circulação de correntes superficiais responsáveis pelo fenômeno de trilhamento. Entretanto, fatores ambientais tais como contaminação superficial, poluentes industriais, sal e outros depósitos, na presença de umidade, podem reduzir drasticamente a resistência superficial da isolação, criando assim condições para fluir correntes entre pontos de diferentes potencias [15, 33, 34]. Além das solicitações dielétricas, outros fatores podem influenciar no envelhecimento superficial de polímeros isolantes, tais como as solicitações mecânicas, térmicas e ambientais, notadamente a incidência de radiação ultravioleta. Os fenômenos de trilhamento e erosão ocorrem nos pontos de contato do cabo com objetos aterrados, tais como galhos de árvores, bem como nos pontos de amarração do cabo nos isoladores. Além disso, o uso de diferentes materiais nos cabos, isoladores e acessórios em diversos arranjos em uma mesma rede compacta pode acarretar a ocorrência de pontos de concentração de campo elétrico e de acumulação de carga espacial na interface [5, 35, 36, 37].

Assim a distribuição de campo elétrico tem enorme relevância quando se trata de isolamento. Se o campo elétrico for muito intenso em algum ponto do material a rigidez dielétrica deste material pode ser quebrada e ele passa de dielétrico a condutor. Como se observa, os danos causados pelos isoladores poliméricos tipo pino, são, na maioria das vezes, causados por:

Descarga parcial interna devido à heterogeneidade do material utilizado (Este fenômeno também se encontra presente nos espaçadores poliméricos). Usualmente, o material utilizado na manufatura dos isoladores- espaçadores difere do utilizado nos cabos, bem como, em específico, do ar existente nos vazios. Além disso o material poder ser não homogeneizado durante seu processamento. Essas condições levam à concentração das linhas de campo elétrico nas proximidades dos "pontos de defeitos" que podem resultar em descargas parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico o que pode resultar em perda completa da rigidez dielétrica, via perfuração. A Figura 11 mostra duas fotos de cortes feitos em espaçadores poliméricos que indicam a má homogeneidade do material que os constitui. Já a Figura 12 mostra uma radiografia eletrônica em isolador contendo bolha de ar decorrente de processo de fabricação e a Figura 13 o resultado da bolha em isoladores instalados na rede após algum tempo de operação [56].



Figura 11 - Fotos de cortes em espaçadores poliméricos mostrando material não uniforme



Figura 12 - Radiografia eletrônica em isolador contendo bolhas de ar interna decorrente de processo de fabricação.



Figura 13 - Fotos de isoladores que continham defeitos internos degradados em uso após algum tempo instalados na rede.

- Descarga parcial superficial devido a campo elétrico excedendo o valor crítico, causando alterações na superfície seguido de trilhamento elétrico e erosão.
- Trincas devido a exposição solar (raios ultravioletas) e altas temperaturas decorrente do processo de fabricação, podendo comprometer as propriedades elétricas e mecânicas do material, conforme verificase na figura 14 [38].



Figura 14 - Fotos de isoladores que continham defeitos de fragilidade/trincas decorrentes de UV ou altas temperaturas do processo de fabricação.

Contaminação da superfície devido a impurezas e a presença de água, conforme pode-se verificar nas
Figuras 15 e 16, levando ao processo de arborescência em água. A contaminação da superfície propicia
o surgimento de caminhos de correntes elétricas superficiais. Correntes de fuga, que apesar de serem da
ordem de algumas dezenas de miliampéres, quando multiplicadas pelo número de isoladores
pertencentes a uma região específica de um alimentador, quando acrescidas da corrente normal da linha,
podem atingir valores suficientes para acionar os dispositivos de proteção contra sobrecorrente,
provocando interrupções no fornecimento de energia elétrica.



Figura 15 - Arborescência elétrica em forma de gravata de borboleta, crescendo de um contaminante.



Figura 16 - Contaminação de arborescência elétrica por agua.

#### 2.3- Simulação Computacional - Comsol Multiphysics®

Nos últimos anos simulações computacionais vêm assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento. A partir de seu uso vários ensaios com diferentes configurações do problema podem ser realizados sem a necessidade de construção de protótipos, economizando tempo e recursos. Na simulação desenvolvida nos primórdios da pesquisa operacional, os problemas eram resolvidos por meio da obtenção dos melhores resultados possíveis para cada parte individual do modelo. Entretanto, à medida que a complexidade dos problemas cresceu, surgiu a necessidade de se utilizar uma abordagem mais sistêmica e generalista [39].

Atualmente vários pacotes computacionais são utilizados para simulações nas diversas áreas da Física e Engenharia, entre eles o Comsol Multiphysics®.

O Comsol Multiphysics® apresenta uma interface gráfica que, dependendo da complexidade da geometria, permite a visualização dos desenhos em escala, que podem ser importados de vários pacotes computacionais com formato CAD®. A caracterização das superfícies e dos contornos com os valores desejados também é feita na interface principal do programa. Os resultados podem ser observados de várias maneiras, entre elas na forma de linhas equipotenciais ou por mapa de cores. Contudo, é necessário definir a

geometria da região para a qual o problema deve ser resolvido, bem como indicar as condições de contorno e as características da região. O programa discretiza a região e realiza os cálculos fornecendo os resultados da simulação desejada. Durante a resolução é gerado automaticamente uma malha composta por elementos triangulares de tamanhos variados, os elementos finitos. Quanto mais simples for a geometria do desenho maiores são os triângulos e, com o aumento da complexidade da geometria, menores são os elementos triangulares [40, 41]. A malha pode ser refinada algumas vezes para se obter um resultado mais preciso, no entanto quanto maior o refinamento maior será a exigência computacional, ou seja, o computador precisa de uma alta capacidade de processamento. O algoritmo interno ao pacote computacional transforma um conjunto de equações diferenciais parciais em uma forma mais apropriada para uma análise numérica e em seguida, com desempenho elevado, as resolve usando o método dos elementos finitos. Também é possível realizar simulações em 3D. No entanto, mesmo para uma geometria simples é necessária uma alta capacidade de processamento [42].

Diversos pesquisadores estão utilizando o Comsol Multiphysics® em todo o mundo, nas mais diversas áreas. Alguns estudos são sobre o comportamento dos sistemas em silicone usados em isoladores [43], a propagação de ondas em cabos de potência [44], as solicitações dielétricas em buchas em materiais poliméricos [45] e muitos outros.

#### 2.4- Porcelana aplicada como isoladores elétricos.

Porcelanas são cerâmicas produzidas com matérias-primas naturais e utilizadas na fabricação de uma grande variedade de produtos, apesar de ser considerada a mais complexa de todas as cerâmicas.

Nestas cerâmicas, as ligações iônicas com forte caráter covalente restringem a mobilidade dos elétrons e as tornam bons isolantes elétricos e, por consequência, possui um grande número de aplicação na indústria eletroeletrônica. Entre os vários tipos de porcelanas, as mais utilizadas como isoladores elétricos são as porcelanas triaxiais compostas por quartzo, feldspato e argila, contudo, a substituição total ou parcial do quartzo por alumina tem sido utilizada para promover aumento da resistência mecânica [49].

As porcelanas formadas por alumina, feldspato e caulim são chamadas de porcelanas aluminosas e são utilizadas na fabricação de isoladores elétricos de alta tensão, por possuírem propriedades dielétricas adequadas e propriedades mecânicas superiores às das porcelanas que utilizam o quartzo. Estas propriedades dielétricas e mecânicas são dependentes da microestrutura desenvolvida durante o processamento cerâmico. A presença de impurezas, a temperatura, o tempo e a atmosfera de sinterização, oxidante ou redutora, influenciam fortemente as reações químicas e o desenvolvimento micro estruturais da porcelana.

A elevada área superficial da argila combinada com a morfologia de suas partículas, placas finas, fornece plasticidade à massa.

A argila deve ser caulinítica, a fim de fornecer a caulinita (Al2O3·2SiO2·2H2O), que durante a sinterização irá se decompor e formar cristais de mulita, chamados de mulita primária. Muitas composições utilizam o caulim ao invés da argila como fonte de caulinita, entretanto os caulins não fornecem plasticidade

à massa, sendo necessária a adição de pequenas quantidades de argila plástica para conferir trabalhabilidade à massa e resistência mecânica antes da queima.

A função do feldspato na composição das porcelanas triaxiais é atuar como fundente viabilizando a sinterização via fase líquida. Os feldspatos normalmente usados em cerâmicas são os feldspatos potássicos (K2O .Al2O3.6SiO2) e os feldspatos sódicos (Na2O.Al2O3.6SiO2). O feldspato potássico historicamente é o fundente mais utilizado nas porcelanas, pois ao fundir gera um líquido com viscosidade maior que o feldspato sódico [50].

O quartzo, responsável pela formação do esqueleto da peça de porcelana, participa na formação da microestrutura de várias formas. Por ser a fração mais grosseira das partículas na composição da porcelana diminui a retração durante a secagem evitando assim o trincamento. Durante quase todo o processo de queima a reatividade do quartzo permanece baixa, ajudando assim a prevenir a deformação do corpo. Em temperaturas mais elevadas o quartzo se dissolve no vidro feldspáltico aumentando a quantidade de silício no vidro e mantendo a viscosidade elevada, ajudando a evitar a deformação piroplástica. No resfriamento, o quartzo não dissolvido durante a sinterização pode deteriorar a resistência mecânica devido à expansão volumétrica que ocorre durante a mudança de fase beta ( $\mathbf{b}$ ) para fase alfa ( $\mathbf{a}$ ). Neste aspecto, a substituição do quartzo por alumina é vantajoso por não apresentar transição de fase no resfriamento e assim não comprometer a resistência mecânica da peça [49,51]. Entretanto o preço significativamente elevado da alumina comparada ao do quartzo e o aumento na temperatura de sinterização implicam em aumento significativo dos custos da porcelana e se torna a principal desvantagem de seu uso [49].

Durante a sinterização das porcelanas triaxiais ocorrem diversas reações químicas, as quais são afetadas pela temperatura, tempo e atmosfera do forno (oxidante ou redutora). Nessas reações, o equilíbrio muitas vezes não é atingido devido ao longo tempo necessário para que isto ocorra.

A microestrutura da porcelana triaxial após a sinterização consiste em grãos grosseiros de quartzo ou alumina misturados a finos cristais de mulita mantidos juntos por uma matriz vítrea.

Os cristais de mulita possuem diversas origens as quais são responsáveis pelos nomes atribuídos a elas. A mulita formada pela sequência de reações caulinita-mulita, é chamada de mulita primária. Esta mulita aparece na forma de aglomerados de pequenos cristais com tamanho menor que 0,5 mm [53] e recebe este nome devido ao fato de se formar a baixa temperatura [49].

Outro tipo de mulita, chamada mulita secundária, é formada a partir da nucleação e crescimento de cristais na região do líquido feldspáltico e se apresenta na forma de longos cristais (>1 mm) [53].

O líquido proveniente do feldspato é mais fluido que o proveniente da argila, pois possui uma alta quantidade de íons alcalinos e alcalinos terrosos e, como consequência, os cristais de mulita secundária são maiores que os da mulita primária [53].

A composição da mulita muda de acordo com a origem. A mulita primária formada na região rica em argila contém mais alumina (2Al2O3:1SiO2) que a mulita secundária (tipo-II e tipo-III) cristalizada na região do feldspato (3Al2O3:2SiO2). O tamanho e a forma dos cristais de mulita são controlados pela viscosidade do líquido onde eles se formam e crescem. A viscosidade do líquido por sua vez é controlada por

sua composição e temperatura [20].

Como resultado, obtém-se diversas composições e resultados de porcelanas com diferentes características e resistência mecânica, sendo possível atender diferentes condições de aplicações, tendo permitido sua aplicação em sistemas elétricos de alta e extra-alta tensão.

No Brasil, desde a década de 1980, o sistema elétrico tem tensões de 750kV AC e 600kV DC, suportados por isoladores de porcelana aluminosa, grande parte produzido no Brasil, enquanto o sistema de distribuição nas classes de 15 à 35kV tiveram seus primeiros isoladores nacionais produzidos na década de 1940.

#### 2.4.1 - Propriedades Dielétricas das Porcelanas

Um isolador elétrico é caracterizado por possuir elevada resistividade elétrica, elevada rigidez dielétrica, baixo fator de dissipação e baixa constante dielétrica. A elevada resistividade elétrica previne a passagem de corrente elétrica através do isolador; a rigidez dielétrica, definida como a máxima diferença de potencial que o dielétrico suporta sem que ocorra uma descarga elétrica, deve ser elevada para evitar o colapso catastrófico do isolador em alta tensão.

Valores típicos das propriedades dielétricas para que um material possa ser considerado um bom isolador elétrico é apresentado na Tabela 1.

| Constante dielétrica (k)           | 6,5                   |
|------------------------------------|-----------------------|
| Resistividade elétrica (p)         | 10 <sup>4</sup> (Ω.m) |
| Fator de dissipação (tg $\delta$ ) | 0,001                 |
| Rigidez dielétrica                 | 5 kV/mm               |

Tabela 1 - Valores típicos para um bom isolador elétrico [54].

## 2.4.2 - Utilização de Esmalte Semicondutor (Rádio-tratamento) para Redução de Rádio-interferência.

A técnica conhecida como rádio tratamento, utilizada em isoladores de porcelana, baseia-se na aplicação de esmalte semicondutor no topo e na rosca do isolador tipo pino para manter o campo elétrico uniforme nestas duas regiões, eliminando, deste modo, as concentrações de campo elétrico no interior da porcelana.

Exemplificando, um isolador de 15 kV normal (Ref. P2-95-1 da ABNT 7110) pode apresentar uma tensão de rádio-interferência (RIV) de até 5.500  $\mu$ V. Em um isolador similar onde se aplicaram as técnicas de rádio-tratamento, deve ter RIV menor que 50  $\mu$ V.

A Figura 17 ilustra o rádio-tratamento aplicado em isoladores referência ANSI 55-6 da norma C29.5.



Figura 17 - Isolador ANSI 55-6 com esmalte semicondutor na rosca e na cabeça para redução de radio-interferência.

Essa técnica tem se mostrado muito eficiente para isoladores de porcelana aplicados em redes de distribuição convencional (Redes com cabos nus), uma vez que reduzem drasticamente os efeitos da rádiointerferência e consequentemente os problemas de perfuração em isoladores tipo pino, melhorando substancialmente o desempenho deste tipo de rede.

Porém a aplicação destes isoladores nas redes compactas com cabos protegidos trouxe um aumento da concentração das linhas equipotenciais na região da cobertura do condutor, uma vez que, com a diminuição das linhas de campo que atravessam a porcelana no isolador rádio-tratado, ocorre concentração na região da cobertura do cabo. A Figura 18 ilustra este efeito.



Figura 18 - Ilustração dos efeitos do radio-tratamento sobre as linhas de campo elétrico no isolador ANSI 55-6

Desta forma, vê-se nas simulações computacionais e através da câmara corona que o uso desta tecnologia em isoladores piora substancialmente a performance em redes que utilizam cabos protegidos (*Spacer Cables*) por acarretar em concentração de campo elétrico na região da cobertura do cabo causando solicitações dielétricas excessivas.

#### **3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Um dos possíveis motivos para a não utilização de isoladores de porcelana em redes compactas seria a incompatibilidade dielétrica do material do isolador e da cobertura do cabo, tendo em vista que possuem constantes dielétricas muito diferentes.

No entanto, observou-se que este não é o único fator que afeta os gradientes de campo elétrico na região do berço do isolador. A partir dos estudos empreendidos, constatou-se que nos isoladores, do tipo pino polimérico, o pino metálico traz o ponto de terra para muito próximo da fase sobre o isolador, havendo assim uma concentração das linhas equipotenciais naquela região, implicando em um aumento nos gradientes de campo elétrico.

Para o isolador, do tipo pilar cerâmico, o ponto de terra encontra-se mais distante. Entretanto, este tipo de isolador é fabricado com um material dotado de constante dielétrica superior a do polietileno presente na cobertura dos cabos.

Assim, o presente estudo, pretende avaliar o efeito da proximidade do ponto de terra versus o problema de incompatibilidade dielétrica - a princípio associado com a diferença das constantes dielétricas.

## 3.1- Avaliações por meio de Simulação Computacional por Elementos Finitos

Para identificar pontos críticos de concentração de campo elétrico e estabelecer um critério de comparação entre os isoladores de porcelana de núcleo sólido e os isoladores de pino polimérico, foram realizadas simulações computacionais, utilizando o pacote computacional Comsol Multiphysics® em diversos isoladores aplicados às redes compactas protegidas nas classes de tensão de 15 e 25kV, a saber: isoladores poliméricos tipo pino, isoladores tipo pilar com núcleo solido e isolador pilar com esmalte semicondutor (rádio-tratado). Os resultados das simulações estão representados por meio de uma escala cromática decrescente onde a cor vermelha representa a maior intensidade de campo elétrico.

As modelagens foram executadas considerando uma tensão de  $2U_0 = 16$  kV, no caso dos isoladores classe 15kV, e com uma tensão de  $2U_0=29$  kV para os isoladores classe 25 kV, onde  $U_0$  é a tensão fase-terra na sua forma homopolar aplicada ao sistema sob ensaio. Uma vez que o projeto foi validado pelo "Ensaio de Compatibilidade Dielétrica, decidiu-se utilizar nas simulações a mesma referencia de tensão utilizada nos ensaios que seguiram os parâmetros da Norma ABRADEE – CODI-3.2.18.27.1 - Especificação de Isoladores Tipo Pino Polimérico para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV.

#### 3.2- Análise dos Isoladores por Meio de Câmaras Corona (Câmara UV)

Constata-se que a atividade corona pode ser observada na forma de luz principalmente presente na faixa de comprimento de onda ultravioleta, variando entre 200 nm e 400 nm, sendo que os seus picos

concentram-se na faixa entre 340 nm e 380nm. A atividade corona presente em uma linha de transmissão ou distribuição de energia elétrica, é uma descarga parcial luminosa por sobre a superfície dos cabos condutores e dos isoladores devido à ionização do ar, onde o campo elétrico excede o valor crítico do meio. As descargas superficiais ionizam o ar e esse processo é acompanhado pela excitação de moléculas de nitrogênio, emitindo-se assim radiação ultravioleta.

O equipamento para detecção de efeito corona é caracterizado por possuir dois canais de captação de dados, um para a captação da radiação ultravioleta e outro para a captação de imagens visíveis. As imagens podem ser sobrepostas tornando a operação do equipamento mais simplificada.

O canal ultravioleta detecta a formação de descargas - na forma de eflúvios corona nas superfícies de equipamentos e sistemas, dentre eles isoladores poliméricos e de porcelana. A radiação ultravioleta é direcionada para um tubo intensificador constituído de uma série de lentes e filtros, que possibilita sua detecção e quantificação, como mostra a Figura 19.



Figura 19 - Princípio de funcionamento de câmera ultravioleta.

Ao analisar-se em laboratório as imagens obtidas pelas câmaras corona, por exemplo a Daycor II que foi utilizada neste trabalho, é possível identificar o local que apresenta efeito corona e compará-lo com um espectro teórico de distribuição de campo eletrostático do isolador.

Durante os estudos, montou-se um sistema composto de um anel de amarração, um isolador e um cabo coberto. Ao se energizar o condutor, constatou-se que o nível de corona para tensão nominal dos cabos e isoladores era praticamente imperceptível devido à sensibilidade do sensor de corona. Por conseguinte, para se obter um nível de corona, na condição seca, perceptível pela câmera, a tensão foi elevada a aproximadamente 38,5 kV, ou seja aproximadamente  $5U_0$  para um sistema de 13,8kV, onde foi verificado um nível satisfatório de corona para comparação dos modelos de isoladores.

Na primeira situação, ensaio-se um cabo sobre um isolador cerâmico, do tipo pilar sólido, e, em seguida, sobre um isolador polimérico. Foram realizadas filmagens com a câmera de corona nas duas

situações, e analisados os resultados.

Em uma última situação, analisou-se o comportamento de um isolador cerâmico tipo pino, isolador que condenou a utilização de porcelana das redes compactas.

#### 3.3- Ensaio de Compatibilidade Dielétrica por Multi Solicitações.

O ensaio de compatibilidade dielétrica é realizado em três conjuntos independentes. Cada conjunto consiste de cabo fase com os anéis de amarração recomendado e o isolador ou espaçador que se deseja avaliar. São recomendados pelo menos três metros de cabo por fase e uma distância mínima de 1 metro entre cada conjunto. Os parâmetros recomendados para o ensaio são:

- Temperatura na superfície externa do cabo: 60 °C;
- Ciclos de chuva compostos de 5 minutos de aspersão seguidos de 15 minutos sem chuva;
- Aspersão de 1 mm/min;
- Condutividade da água (Aspersão): 750 µS/cm;
- Tensão aplicada: 2U<sub>0</sub> (Tensão fase/terra do sistema Spacer Cable);
- Após trinta dias contínuos de ensaio, os conjuntos não devem apresentar sinais de trilhamento, perfuração ou erosão.

A Figura 20 mostra o esquema básico de ensaio utilizado pelo LAT-EFEI - Laboratório de Alta Tensão em Itajubá para realização do ensaio de compatibilidade por multi solicitações. Já a Figura 21 mostra fotos do ensaio realizado em isoladores de porcelana tipo pilar de núcleo sólido.



Figura 20 - Esquema básico de montagem do ensaio de compatibilidade elétrica por multi solicitações conforme LAT-EFEI

Um sistema para indução faz circular a corrente responsável pela manutenção da temperatura dos condutores em 60°C. A fonte de tensão ajusta o nível de tensão aplicada entre fase e terra em  $2U_0$  sendo a condutividade da água monitorada constantemente. Diariamente foi realizada uma inspeção visual e a verificação do controle da chuva, observando-se também o ajuste dos demais parâmetros.



Figura 21 - Fotos do ensaio de compatibilidade dielétrica - LAT-EFEI

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 4.1 Resultados dos Estudos e Modelos de Simulação

O primeiro ponto a ser observado no caso de projetos de sistemas de isolamento é o resultado das simulações computacionais de gradiente de campo elétrico. Neste caso, foram realizadas simulações pelo método dos elementos finitos considerando isoladores poliméricos tipo pino, isoladores pilar de núcleo sólido e isoladores de porcelana rádio-tratados. Em geral, as simulações de gradientes de campo têm por objetivo determinar as amplitudes das solicitações e compará-las com os gradientes críticos dos dielétricos utilizados na manufatura dos sistemas. No presente caso também são comparados os resultados obtidos para diferentes tipos de isoladores visando-se observar quais apresentam o melhor comportamento.

Nas Figuras 22 "a" e "b" são apresentadas as imagens referentes a modelagens do isolador pilar cerâmico e do pino polimérico respectivamente.



Figura 22 - a): Isolador pilar cerâmico P1, b): Isolador polimérico tipo pino.

Na Figura 22b é perceptível a concentração de campo elétrico em virtude da proximidade do pino aterrado do condutor energizado. Em termos dielétricos, para os isoladores, estas solicitações são críticas quando de impulsos íngremes. A presença do pino também atua no sentido de transferir solicitações para o interior da cobertura dos cabos, como se pode visualizar pela concentração de cores.

Em termos de detalhes, as Figuras 23 "a" e "b" apresentam os mesmos resultados mostrando somente a área do berço dos isoladores, região onde se concentram os maiores gradientes de potencial. Analisando os valores apresentados na Figura 23 observam-se melhores resultado para os isoladores cerâmicos tipo pilar.



Figura 23 - a): Isolador pilar cerâmico P1 b): Isolador polimérico tipo pino.

Uma vez demonstrada a potencial aplicação dos modelos de simulação por meio da técnica de elementos finitos, foram realizados estudos complementares para determinar projetos com potencial capacidade de atender os requisitos de aplicação a redes compactas. Deste modo, os estudos realizados avaliam os gradientes:  $E_1$  – Gradiente de campo elétrico na interface entre a superfície do condutor e camada isolante polimérica &  $E_2$  – Gradiente de campo elétrico na interface superfície externa da camada isolante do condutor e a superfície superior da base do isolador. Nestas simulações foram considerados condutores cobertos classe 15 kV sem a presença de uma camada semicondutora, recomendada em muitos projetos no exterior para melhor uniformizar os campos elétricos.

Deste modo, foram verificados os gradientes de campo elétrico para seis diferentes tipos de isoladores projetados para serem instalados em redes aéreas classe de tensão de 15 kV, com as características mínimas mostradas na Tabela 2. Assim sendo, foram estudados os seguintes projetos de isoladores:

- P1 Isolador pilar cerâmico projetado para aplicação nas classes de tensão de 15kV e 25kV;
- P- Estudo Isolador pilar com mesma altura dos isoladores pilar para a classe de tensão de 15kV, porém com alterações de perfil no corpo e saias para modificar a concentração/dispersão de campo elétrico;
- P2 Isolador pilar padrão para redes convencionais (Nuas) para a classe de tensão de 15kV, em uso na maioria das concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil;
- P3 Isolador pilar cerâmico utilizado pelas concessionárias de energia elétrica no Brasil, com cabo coberto, por pelo menos 20 anos;
- Isolador pino polimérico Isolador tipo pino de polietileno de alta densidade, padrão para redes compactas classe de tensão de 15kV utilizada no Brasil;
- P1-RT (Radio-tratado) Isolador pilar cerâmico projetado para aplicação nas classes de tensão de 15kV e 25kV com aplicação de esmalte semicondutor para redução de rádio-interferência (RIV).

| ISOLADORES CLASSE 15 kV   |                           |          |   |  |
|---------------------------|---------------------------|----------|---|--|
| Referência do<br>Isolador | Dimensões Básicas<br>(mm) |          | Projeto   |  |
| P1                        | н                         | 210      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para     |  |
|                           | D                         | 125 / 45 | 15kV e 25kV.                                    |  |
| P- Estudo                 | н                         | 208      | Simulação proposta                              |  |
|                           | D                         | 125 / 45 | para o estudo                                   |  |
| P2                        | н                         | 208      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para     |  |
|                           | D                         | 125 / 55 | 15kV.   |  |
| Р3                        | н                         | 205      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para     |  |
|                           | D                         | 125 / 63 | 15kV utilizado a 20 anos<br>com cabos cobertos. |  |
| Pino Polimérico 15kV      | н                         | 133      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para     |  |
|                           | D                         | 139      | rede compacta 15kV.                             |  |
| P1 - RT                   | н                         | 200      | Projeto P1 com<br>aplicação de esmalte          |  |
|                           | D                         | 125 / 60 | tratado).                                       |  |

Tabela 2 - Características dos vários projetos de isoladores para a Classe de Tensão de 15kV analisados.

Onde:

- H altura do isolador desde a base até a posição do cabo;
- D diâmetro da saia / diâmetro do corpo.

| ISOLADORES CLASSE 15 kV   |                            |                     |             |
|---------------------------|----------------------------|---------------------|-------------|
| Referência do<br>Isolador | Gradiente c<br>Elétrico (k | Valor<br>Percentual |             |
| D1                        | E <sub>1</sub>             | 1,72                | 100%        |
| F1                        | E <sub>2</sub>             | 2,03                | <b>100%</b> |
| D - Estudo                | E <sub>1</sub>             | 1,76                | 102%        |
| P - LStudo                | E <sub>2</sub>             | 2,33                | 114%        |
| DJ                        | E <sub>1</sub>             | 1,83                | 106%        |
| P2                        | E <sub>2</sub>             | 2,43                | 119%        |
| D2                        | E <sub>1</sub>             | 1,92                | 111%        |
| гэ                        | E <sub>2</sub>             | 2,54                | 125%        |
| Dino Dolimórico 15kV      | E <sub>1</sub>             | 2,35                | 136%        |
|                           | E <sub>2</sub>             | 2,45                | 120%        |
| P1 - RT                   | E <sub>1</sub>             | 2,11                | 122%        |
|                           | E <sub>2</sub>             | 2,97                | 146%        |

Tabela 3: Valores dos gradientes de campo elétrico para vários projetos de isoladores Classe de Tensão de 15kV.

Com base nas Tabelas 2 e 3 é possível observar que:

- O isolador projeto P1, que obteve o melhor desempenho, tem a maior altura e menor diâmetro de corpo em relação aos demais modelos de isoladores projetados para a aplicação nas redes com classe de tensão de 15kV. Assim, sendo, sua eficiência pode ser atribuída ao afastamento do plano de terra da região energizada e mudança da dispersão de campo elétrico pelo corpo do isolador;
- Este mesmo isolador, quando tratado com esmalte semicondutor na região da cabeça berço, P1 RT, resulta em um pior desempenho dielétrico, ou seja, E<sub>1</sub>= 122% e E<sub>2</sub>= 146% do melhor resultado (Referência = 100% Projeto P1);
- Os isoladores tipo pilar cerâmico com núcleo sólido, referências P2 e P3, obtiveram desempenho similar com pequena vantagem quando comparados com o isolador pino polimérico convencional;
- Alterando a geometria dos isoladores cerâmicos com relação a altura e perfil de corpo número e dimensões das saias é possível melhorar a condição de concentração de campo elétrico na região da camada isolante dos condutores cobertos aplicados às redes compactas.

A Figura 24 apresenta os resultados dos estudos de campo elétrico para os isoladores que constam na Tabela 3.



Figura 24 - Apresentação dos resultados dos estudos de campo elétrico nos isoladores mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Os resultados obtidos com as simulações mostradas na Tabela 3 estimularam o desenvolvimento do estudo e projeto de um novo isolador cerâmico, do tipo pilar sólido, cujo resultado está contido nas Tabelas 2 e 3 sob a denominação "P - Estudo" com desempenho inferior somente ao projeto P1, que é um isolador apto a operar também na classe 25 kV. Deste modo, foram repetidas os estudos realizados para um novo conjunto de isoladores especialmente projetados para trabalhar na classe de tensão de 25 kV, conforme mostrado nas Tabelas 4 e 5, tendo como base o isolador P4. Assim sendo, foram estudados os seguintes projetos de isoladores:

- P1 Isolador pilar cerâmico, projetado para aplicação em tensões de 15 e 25kV;
- P4 Isolador pilar padrão para redes convencionais (Nuas) para a classe de tensão de 25kV, em uso na maioria das concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil;
- Isolador pino polimérico 25kV Isolador tipo pino de polietileno de alta densidade, padrão para redes compactas classe de tensão de 25kV utilizada no Brasil.

Sendo ainda, como anteriormente, :  $E_1$  – Gradiente de campo elétrico na interface entre a superfície do condutor e camada isolante polimérica e  $E_2$  – Gradiente de campo elétrico na interface superfície externa da camada isolante do condutor e a superfície superior da base do isolador Tabela 4- Características dos vários projetos de isoladores para a Classe de Tensão de 25kV analisados.

| ISOLADORES CLASSE 25 kV   |                           |          |   |  |
|---------------------------|---------------------------|----------|---|--|
| Referência do<br>Isolador | Dimensões Básicas<br>(mm) |          | Projeto                                     |  |
| P4                        | н                         | 305      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para |  |
|                           | D                         | 150 / 80 | 25kV.                                       |  |
| P1                        | н                         | 210      | Projeto de acordo con<br>ABNT NBR 5032 para |  |
|                           | D                         | 125 / 45 | 15kV e 25kV.                                |  |
| Pino Polimérico 25kV      | Н                         | 152      | Projeto de acordo com<br>ABNT NBR 5032 para |  |
|                           | D                         | 190      | rede compacta 15kV.                         |  |

Onde:

- H altura do isolador desde a base até a posição do cabo;
- D diâmetro da saia / diâmetro do corpo.

Tabela 5- Valores dos gradientes de campo elétrico para vários projetos de isoladores Classe de Tensão de 25kV.

| ISOLADORES CLASSE 25 kV   |                            |                     |      |
|---------------------------|----------------------------|---------------------|------|
| Referência do<br>Isolador | Gradiente c<br>Elétrico (ł | Valor<br>Percentual |      |
| D4                        | E <sub>1</sub>             | 2,47                | 100% |
| P4                        | E <sub>2</sub>             | 2,60                | 100% |
| D1                        | E <sub>1</sub>             | 2,65                | 107% |
| PI                        | E <sub>2</sub>             | 2,76                | 106% |
| Pino Polimérico 25kV      | E <sub>1</sub>             | 3,50                | 142% |
|                           | E <sub>2</sub>             | 3,44                | 132% |

Com base nas Tabelas 4 e 5 é possível observar que:

- O isolador PPL-257, que registrou o melhor desempenho quando comparado com isoladores projetados para a classe de tensão de 15kV, obteve desempenho intermediário, pois possui altura pouco inferior aos isoladores projetados para a classe de tensão de 25kV convencionais;
- Os isolador tipo pilar cerâmico de núcleo sólido referência PL-148 obteve desempenho superior quando comparados com o isolador pino polimérico convencional projetados para a classe de tensão de 25kV;
- Novamente entende-se que alterando a geometria dos isoladores cerâmicos com relação a altura e perfil de corpo e saias é possível melhorar a condição de concentração de campo elétrico na região da cobertura dos condutores aplicados à rede compacta.

A Figura 25 apresenta os resultados dos estudos de campo elétrico para os isoladores que constam na Tabela 5.



Figura 25 - Apresentação dos resultados dos estudos de campo elétrico nos isoladores mostrados nas Tabelas 4 e 5.

Considerando-se o fato de que todas as experiências anteriores realizadas no Brasil condenaram a utilização de isoladores rádio-tratados para aplicação em redes compactas, foi estudado o desempenho de um isolador pilar cerâmico com rádio-tratamento. O objetivo deste estudo foi analisar quais são o(s) motivo(s) pelo qual a presença do esmalte semicondutor, aplicado à cabeça dos isoladores rádio-tratados, reduz a vida

útil dos cabos cobertos. Os resultado obtidos podem ser visualizados na Figura 26 na forma de linhas equipotenciais e de gradiente de campo elétrico.



Figura 26 - Estudo de campo elétrico em isolador pilar cerâmico P1 - RT rádio-tratatado.

Observando as linhas equipotenciais no sistema modelado, conforme mostra a Figura 26, pode-se verificar que, ao se tentar manter o potencial uniforme, por todo o esmalte semicondutor, incorre-se na concentração de um número maior de linhas equipotenciais entre o cabo e o berço do isolador, resultando em acréscimos nos gradiente de campo elétrico. Assim, a utilização de isoladores rádio-tratados, principalmente do tipo pino cerâmico, que apresentam condições de gradientes de campo elétrico muito mais elevados, nas redes compactas, há muitos anos atrás, foi, possivelmente, o motivo que desencadeou a condenação da utilização de todo e qualquer isolador de porcelana neste tipo de rede no Brasil. Para efeito de comparação, a Figura 27 mostra os resultados de um estudo com um isolador tipo P1, porém sem o esmalte semicondutor.



Figura 27 - Estudo de campo elétrico em isolador pilar cerâmico P1 sem rádio-tratatamento.

Analisando-se as linhas equipotenciais nas Figuras 26 e 27 observa-se que, sem a presença do esmalte semicondutor, há um maior numero de linha de campo atravessando a porcelana, e consequentemente, menor concentração de potencial na região da camada isolante do condutor coberto, acarretando em menor solicitação dielétrica. A relação entre os gradientes  $E_2$  – Gradiente de campo elétrico na interface superfície externa da camada isolante do condutor e a superfície superior da base e  $E_1$  – Gradiente de campo elétrico na interface entre a superfície do condutor e camada isolante polimérica do isolador para os dois projetos de isoladores estudados é de 1,40 & 1,18, respectivamente, o que indica numericamente a pesada concentração de campo existente quando da utilização de isoladores rádio-tratados e cabos cobertos.

## 4.2 Resultados da Análise do Desempenho de Isoladores por Intermédio de Câmaras Corona (Câmara UV)

De modo a verificar a presença de formação de descargas oriundas da concentração de gradientes de campo foram realizados ensaios de tensão aplicada em três conjuntos isolador /cabo coberto. Existem em laboratório pelo menos dois métodos para induzir descargas nos arranjos formados por cabos coberto e isoladores. O primeiro, o mais comum, é o que trabalha com a exposição do conjunto à condição de chuva com taxas de precipitação padronizadas, porém com condutividade da ordem de 750 µS/m. Conforme mostrado na Figura 28 este método utilizado para acelerar os mecanismos de formação de corona ressaltam problemas existentes nos cabos cobertos que não são objeto deste trabalho e discussões, assim, não foi este o método de ensaio escolhido para essa verificação.



Figura 28 - Formação de descargas ao longo de cabos cobertos fabricados no Brasil, durante ensaios de compatibilidade dielétrica em espaçadores poliméricos [56].

De modo a evitar a influência da presença da chuva condutora o que pode resultar em um conjunto de discussões infrutíferas sob a validade da aplicação, os isoladores, projetados para trabalhar na classe de tensão de 15 kV foram submetidos a uma tensão aplicada de 38,5kV, ou seja, cinco vezes a tensão fase/terra do sistema *Spacer Cable* (5U<sub>0</sub>). Convém ressaltar que estes dispositivos são ensaiados sempre com no mínimo uma tensão igual a 2U<sub>0</sub>, valor recomendado com base na tensão fase - fase dos sistemas e uma margem de segurança de 15%. Deste modo, evidenciou-se a formação de descargas associadas com a distribuição dos gradientes de campo sem acelerar o fenômeno com a chuva artificial.

A Figura 29 mostra os resultados desta avaliação para os três tipos de isoladores, instalados com o cabo coberto e amarrados com anel elástico, onde, a exemplo da Figura 27, os pontos brancos da imagem representam a atividade elétrica para cada caso. A análise destes resultados é qualitativa por meio de comparação, já que os métodos que trabalham com detecção de corona, no presente, ainda não têm a capacidade de associar valores medidos com condições de operação.



Figura 29 - Imagem do efeito corona em isoladores classe 15 kV – a) Isolador cerâmico pilar sólido, b) Isolador polimérico tipo pino, c) Isolador cerâmico tipo pino.

Analisando os resultados obtidos com a câmera corona, há indicação de forte desenvolvimento de descargas na interface entre o cabo coberto e o berço do isolador cerâmico tipo pino. Isto implica que, não se deve utilizar o isolador, do tipo pino cerâmico, em redes compactas sob pena de desenvolvimento a médio e longo prazo de atividade corona capaz de comprometer o desempenho dos sistemas compactos, na melhor das hipóteses através da redução da suportabilidade dielétrica junto aos isoladores, com perda de qualquer benefício associado com a melhor coordenação de isolamentos oferecida pelos sistemas compactos.

Neste caso, também é possível observar que o isolador cerâmico, do tipo pilar sólido, obteve desempenho semelhante ao do isolador polimérico, do tipo pino, ficando clara a possibilidade de que o isolador tipo pilar sólido tenha sido condenado para as redes compactas, devido aos problemas com a utilização do isolador cerâmico, do tipo pino, e, em especial, os rádio-tratados.

# 4.3 Resultados do Ensaio de Compatibilidade Dielétrica por Multi Solicitação.

De acordo com a recomendação CODI-3.2.18.27.1, o ensaio de compatibilidade dielétrica deve ter duração de 30 dias e como resultado, ao final do período, o cabo e os isoladores e espaçadores não devem

apresentar nenhum tipo de avaria, trilhamento ou erosão.

Inicialmente foram realizados ensaios considerando a possibilidade de se utilizar cabos cobertos de fabricação nacional, em geral, para a classe de 15 kV, com somente uma camada de XLPE. A Figura 30 mostra dois dos arranjos ensaiados com dois cabos de manufatura distinta, um de cor cinza à esquerda e outro de cor preta à direita. Esta diferença de cores representa diferenças de manufatura. Neste caso em específico o cabo à esquerda foi manufaturado com duas camadas, uma interna, junto ao condutor, com características semicondutoras sendo a segunda, externa, na forma padrão em XLPE. O cabo à direita foi manufatura com somente uma camada. Isto permite verificar a influência da uniformização do campo elétrico interno ao cabo nos resultados dos ensaios.



Figura 30 - Imagem do inicio do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, realizado aos 16 de Setembro de 2011.

Aos 05 dias do início do ensaio, para o cabo com camada semicondutora, conforme Figura 31 já se observavam na fase "b" sinais de erosão, no meio do vão, fora da região crítica simulada, ou seja, na região da interface cabo e isolador. Este é um ponto extremamente preocupante, pois esses sinais aparecem em local não previsto ou explicável por qualquer simulação de campos elétricos.



Figura 31 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 5 dias.

A Figura 32 mostra a evolução em um dia do problema observado com o cabo com camada semicondutora, mostrado na Figura 31. Os pontos verificados são fortes indicadores de que o sistema não possui capacidade de suportar as solicitações conjuntas de tensão, corrente e temperatura, sob as condições aceleradas de formação de descargas parciais superficiais - "corona" que são responsáveis pelos mecanismos de aceleração do envelhecimento natural do sistema cabo - isolador. Este processo tende a se acelerar e levar o sistema a ruptura.

A Figura 33 mostra resultados retirados após 10 dias de ensaios onde o sistema pode ser considerado como degradado e em eminência de falha, em região fora do berço do isolador, o que não é o esperado, indicando deficiência da camada de cobertura do cabo naqueles pontos.

A falta de atuação dos sistemas de proteção, que pode ocorrer em serviço, pois estas faltas têm por característica serem de alta impedância podem resultar em início de incêndios, com conseqüências ao patrimônio e aos transeuntes. Este fato também ocorre no laboratório caso a proteção do sistema de aplicação de tensão esteja desensibilizada, conforme se verificou ao longo dos anos de operação do sistema de ensaios utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, sem maiores conseqüências por ser um sistema controlado e sem acesso.



Figura 32 - Imagens do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "b" (Esquerda) e "a" (Direita) realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 6 dias.



Figura 33 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 10 dias.



Figura 34 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2 fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias.

A Figura 34 mostra a evolução da falha "na direção" do isolador. A falha inicia-se, como observado na seqüência de fotos anterior (Figuras 31 a 33) em um ponto ao longo do cabo. A proximidade de um ponto aterrado, provido, neste caso, pelo isolador (base aterrada) faz com que a corrente de fuga entre o cabo energizado e a terra flua pela superfície externa do cabo na direção do isolador. Deste modo, observa-se que a região carbonizada pelas trilhas condutoras superficiais desenvolvidas neste processo se encaminha na direção do berço do isolador que por sua vez vai parecer, como danificado e possível fonte da falha, como na foto. No entanto, como mostra a sequência, o isolador não foi o responsável pelo início do fenômeno de falha. Portanto, não lhe é atribuído papel ativo no início deste. Isto pode ser comprovado através da análise da Figura 35 onde pontos carbonizados, no meio do vão, longe dos isoladores são observados. Nestes casos, a distância ao ponto aterrado, a não uniformidade da camada de isolamento e da chuva artificial, fazem com que o caminho da corrente de fuga em direção ao ponto aterrado seja de maior impedância que em regiões próximas reduzindo a amplitude da corrente superficial ao longo do cabo e, portanto, os danos observados.



Figura 35 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "b" realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias.

A Figura 36 mostra os resultados de ensaios no cabo de cor preta, construído sem camada semicondutora junto ao condutor. Neste caso observa-se uma falha no meio do vão em relação ao isolador de porcelana e no detalhe o núcleo metálico do cabo.



Figura 36 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "b" cabo preto, realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias.

É possível observar indícios de falhas no isolador da fase "a" - fase superior indicando que um possível defeito teve início junto ao berço do isolador, como usualmente esperado. Este fenômeno para o caso de cabos sem camada semicondutora é mostrado na Figura 37.



Figura 37 - Imagem do ensaio de compatibilidade dielétrica no isolador tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, fase "a" cabo preto, realizado aos 16 de Setembro de 2011 + 25 dias.

No caso dos cabos sem camada semicondutora os defeitos não têm ponto ou modo preferencial de desenvolvimento, pelo menos no que diz respeito aos ensaios realizados para este trabalho.

Em resumo os defeitos desenvolvidos nos dois tipos de cabos seguem a seguinte lógica, quando observados no dia + 12:

#### I - Cabo com semicondutora

- FASE A: Início de erosão 4 cm à esquerda do isolador.
- FASE B: A erosão está a 15,5 cm do isolador e com 4,5 cm de extensão
- FASE C: Início de erosão a 12 cm à direita do isolador.
- II- Cabo sem semicondutora
  - FASE A: Início de erosão no lado esquerdo do berço do isolador.
  - FASE B: Erosão no cabo a 29,5 cm à direita do isolador.
  - FASE C: Anel de amarração solto.

Uma vez que os defeitos surgiram ao longo dos vãos do cabo com camada semicondutora desenvolvendo-se na direção dos isoladores e ao longo de todo o cabo sem camada semicondutora, considerou-se a necessidade de melhor investigar esse fenômeno - processo. Existem outros tipos de cabos cobertos, notoriamente de origem Norte Americana, que contemplam o uso de três camadas, sendo:

- Uma camada semicondutora, independente da classe de tensão do cabo;
- Uma camada com função predominantemente isolante em polietileno de baixa densidade;

• Uma camada externa em polietileno de alta densidade PEAD com função eletromecânica.

Esta é a tecnologia original de cabos cobertos, desenvolvida pela indústria Norte Americana, e que foi modificada para aplicação quando de sua introdução no mercado nacional.

Neste caso, novo ensaio foi realizado, nas instalações do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá – LAT- EFEI, em três conjuntos de isoladores classe 15kV, referência P2, montados, com amarrações padrão em polietileno, para evitar a influencia dos anéis elásticos que apresentam alto índice de falhas/ ruptura durante os testes.

Utilizou-se, neste caso, um lance de cabo coberto de origem norte americana, sendo devidamente acompanhado por inspeção visual diária, no período de 20 de Setembro a 20 de Outubro de 2012 com os parâmetros de ensaio ajustados conforme descrito anteriormente.

Durante o ensaio e ao final do mesmo, não se constatou nenhuma avaria, trilhamento ou erosão, nas regiões de interface entre o cabo e os isoladores, como se pode verificar nas imagens das Figuras 38 e 39, tendo sido considerado aprovado, dentro deste critério de avaliação.



Figura 38 - Imagem do inicio do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, realizado em Outubro de 2012.



Figura 39 - Imagem do final do ensaio de compatibilidade dielétrica em 3 isoladores tipo pilar cerâmico classe de tensão 15 kV referência P2, realizado em Outubro de 2012.

Nota-se nas imagens que nenhuma marca foi encontrada nos cabos, a não ser a deposição de sal deixada como resíduo da chuva com condutividade corrigida para 750  $\mu$ S/cm, permanecendo com a mesma aparência do inicio do ensaio.

Como se observa o projeto e a manufatura dos cabos utilizados nos ensaios influenciam fortemente os resultados. Em termos de simulações de campos elétricos os pontos com potencial para o desenvolvimento de defeitos são as interfaces isoladores cabos, o que não se observou em ensaios nem nas inspeções com câmara ultravioleta. Análises apresentadas no artigo "Testing and Analysis on XLPE Brazilian Covered Cables" de autoria de Alan Melo Nóbrega, Manuel Luis Barreira Martinez, Alvaro Antonio Alencar de Queiroz – TDEI, Vol. 20, No. 2, pp. 628-643, 2013, demonstram que: *"The data presented in this paper reflect the current status of the quality of commercial XLPE covered cables in Brazil. The results of physicochemical analysis indicated that a low-quality XLPE covered cables is currently being commercialized in Brazil"*. Acredita-se que estes são os motivos que resultaram nas falhas observadas quando dos ensaios com os cabos de manufatura nacional. O mesmo não se verifica quando se utilizam de cabos com projeto e construção mais elaborada como os de procedência norte americana. Assim este trabalho indica que é possível utilizar-se de isoladores em porcelana, não rádio tratados, como demonstrado pelas simulações discutidas neste trabalho, para a construção de redes padrão compacto a resposta aos ensaios de norma é determinada mais pelo comportamento do cabo que o da interface.

## **5 CONCLUSÕES**

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou analisar alguns potenciais problemas relacionados à utilização de materiais poliméricos como dielétrico em especial os materiais empregados na construção da rede de distribuição compacta tipo *Spacer - Cable* no Brasil, levando ao enriquecimento do conhecimento técnico sobre o funcionamento das tais redes.

Dentro deste contexto, foi estudado o caso da compatibilidade dielétrica do sistema isolador - cabo coberto em função da geometria dos dielétricos e seus suportes e da permissividade dos materiais, considerando a influencia da distancia ao plano de terra e analisando seus efeitos através da simulação computacional, câmara corona (ultravioleta) e ensaios de compatibilidade.

Desta forma, pôde-se verificar que:

- É possível obter valores adequados para os gradientes de campo elétrico nos isoladores de porcelana, do tipo pilar sólido, calculando-os pelo método dos elementos finitos, comparando-se com os isoladores tipo pino polimérico convencional;
- Com a câmera de corona visualizou-se os fenômenos que ocorrem nas interfaces entre os isoladores
  e os cabos cobertos, não sendo constatada diferença significativa no nível de corona atividade
  elétrica entre os isoladores cerâmicos, do tipo pilar, e os isoladores poliméricos, do tipo pino. Já,
  para os isoladores cerâmicos, do tipo pino, o nível de atividade elétrica foi extremamente elevado,
  confirmando a suposição de que não é recomendável a sua utilização em redes compactas;
- Através do ensaio de compatibilidade dielétrica, executado em conformidade com as recomendações CODI-3.2.18.27.1, constatou-se que é possível a utilização dos isoladores tipo pilar de núcleo sólido em configurações que utilizam o cabo coberto, em especial no sistema de rede compacta *Spacer Cable*. No entanto, recomenda-se que nestes casos seja aplicado o ensaio de compatibilidade para validação de cada projeto específico, uma vez que os estudos de campo elétrico, via elementos finitos, mostram que o projeto dos isoladores tem influência relevante no resultado das concentrações de campo elétrico nas partes do sistema envolvidas;
- O comportamento da interface dos cabos e isoladores não apresenta problemas dignos de nota, como mostram as imagens que ressaltam as atividades elétricas no campo do ultravioleta. No entanto, o mesmo não pode ser dito com respeito ao comportamento dos cabos que é inadequado mesmo quando os isoladores - espaçadores e demais acessórios são desenvolvidos de modo específico, como mostrado através dos resultados de ensaios e estudos apropriados. Assim, não se considera que os isoladores foram os indutores dos problemas observados nos cabos.

Importante registrar que, para falhas da cobertura do cabo em regiões próximas aos isoladores, os de

pino polimérico podem apresentar carbonização, transição de fase sólida - líquida, ou, até mesmo, incêndio envolvendo isolador e cabo, levando a interrupções do sistema e potenciais condições de acidentes envolvendo terceiros. Todavia, nos isoladores de porcelana, isto não ocorre, pois mesmo que o cabo perca a cobertura naquele ponto, o isolador tem condições de manter sistema operando, uma vez que, dado o nível de energia dissipada - consumida durante o processo não desenvolve transições de fase e nem vão a condição de flamabilidade.

Parte do problema verificado neste trabalho, ou seja, os modos e o desenvolvimento das falhas, está relacionada com o fato de que a normalização nacional para cabos cobertos não considera em seus textos os ensaios de compatibilidade dielétrica. Assim, existe um descompasso entre a manufatura dos cabos e dos seus suportes quer em porcelana, como demonstrado neste trabalho, quer em materiais poliméricos, como também reportados. Este procedimento cria requisitos distintos, para partes que devem operar em conjunto, o que é um problema para quem as adquire, principalmente quando do envelhecimento das redes compactas, o que só se vai observar quando o este for insolúvel.

### 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a sugestão passa por uma análise estatística detalhada, como mostrado por "Testing and Analysis on XLPE Brazilian Covered Cables" de autoria de Alan Melo Nóbrega, Manuel Luis Barreira Martinez, Alvaro Antonio Alencar de Queiroz – TDEI, Vol. 20, No. 2, pp. 628-643, 2013 comparando-se o desempenho de novos cabos nacionais versus cabos de projeto ou origem norte americana. Acredita-se que três pontos devam ser avaliados: projeto, matérias primas e manufatura.

Também é recomendável verificar o impacto da condutividade nos resultados dos ensaios de compatibilidade dielétrica, bem como o fato de se utilizar como meio de aceleração de envelhecimento uma solução salina. No entanto, isso deve ser feito de modo ponderado uma vez que existem projetos de sistemas (cabos - isoladores) que suportam as solicitações normalizadas.

Finalmente, uma vez que os cabos coberto operam a pelo menos 20 anos neste país, portanto, expostos às mais variadas condições ambientais, sugere-se avaliar, por meio de técnicas avançadas da engenharia de materiais, como FTIR, TGA, DSC, medidas de ângulo de contacto e SEM, as correlações entre os materiais obtidos de ensaios em laboratório e de campo, verificando deste qual a real severidade dos ensaios como postos na normalização nacional.

## 7 SUGESTÕES DE LEITURA - LITERATURA RECOMENDADA

- FAGUNDES, R. C.; "Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas Protegidas por Meio de Ensaios de Multiestressamento e Simulação Computacional". Paraná. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2008.
- Nóbrega, Alan M. "Estudo das Redes Aéreas Compactas por Meio de Ensaios e Modelagens Utilizando O Método dos Elementos Finitos". Itajubá, MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, 2011;
- Nóbrega, Alan M. " Discussions, Testing and Analysis on XLPE Brazilian Covered Cables". Itajubá, MG. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Itajubá, 2011;

## REFERÊNCIAS

- 1 DOI, H.; MIYUACHI, H.; MATSUMOTO, M. T. Cabos cobertos com XLPE para linhas de distribuição. Mundo Elétrico, p. 90-93, 1987.
- 2 NISHIMURA, F.; CICARELLI, L. D.; MARTINS, J. P. Rede aérea isolada e protegida de média tensão. Eletricidade Moderna, n. 241, p. 68¬73, 1994.
- 3 SOTILLE, C. A.; PINHEIRO, W. Aplicação de cabos protegidos. Revista Electron, p. 14-22, Dez. 1989.
- 4 LOOMS, J. S. T. Insulators for High Voltages. Peter Peregrinus Ltda. England. 1988.
- 5 MELLO, R.; JÚNIOR, D. C.; BATISTA, T.; MARCONY R.; MELLO, J. Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição. I CITENEL, Congresso de Inovação Tecnológica, Brasília, 2001.
- 6 GODOI, W. C.; SILVA, R. R.; SWINKA FILHO, V.; LODDI, T. Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por meio de radiografia digital e reconhecimento de padrões. Espaço Energia, Edição 2, Abril de 2005.
- 7 MUNARO, M. "Avaliação da degradação do polietileno, empregado em equipamentos para distribuição de energia elétrica, através da temperatura de oxidação medida por calorimetria diferencial de varredura (DSC)". Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais, Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.
- 8 SOARES, M. R. Novo padrão da CEMIG eleva níveis de confiabilidade. Eletricidade Moderna, n. 291, p. 50-63, 1998.
- 9 SILVA, G. C. "Comportamento elétrico e dielétrico de cabos de potência extrudados utilizados em redes de distribuição de energia elétrica". Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais, Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.
- 10 PARANHOS, J.; CARON, L. E.; MUNARO, M.; PIAZZA, F. Acompanhamento comparativo entre ensaios de laboratório e desempenho de campo de materiais poliméricos de redes compactas protegidas de distribuição de 13,8 kV. 4º Encontro Luso-Afro Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia. Rio de Janeiro, 1999.
- 11 VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; COUTO, H. T. Z. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto de arborização urbana. Revista Árvore, Viçosa MG, v. 30, n. 4, p. 679¬686, 2006.
- 12 Norma Técnica de Distribuição CELG. Isolador tipo pino polimérico classes 15 e 36,2 kV Especificação e Padronização. NTD-24. L. F. N. Rodrigues, A. Almeida, M. R. Silva. Goiás, 2001.
- 13 QUEIROZ, I. B.; NERI, M. G. G.; COSTA, E. G. Mapeamento do campo elétrico em isoladores poliméricos com defeitos. SBSE 2006 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, PB. 2006.
- 14 Norma Técnica COPEL NTC. Materiais de Distribuição Especificação. Isolador de ancoragem tipo bastão. NTC 81009. Roberto Cambuí. Paraná. Janeiro/2006.
- 15 DUARTE, J. V. P. "Danos à camada isolante de cabos cobertos em redes não blindadas devido

a distorções do campo elétrico na proximidade de objetos aterrados". Trabalho da Disciplina Teoria Eletromagnética, PPGEE, UFMG, 2001.

- 16 REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. "Fundamentos da Teoria Eletromagnética". Rio de Janeiro: Editora Campus, 1988.
- 17 BASSIOUNI, M. E.; AL¬SHAMY, F.; MADI, N. K.; KASSEM, M. E. Temperature and electric field effects on the dielectrics dispersion of modified polyvinyl chloride. Science Direct, Material Letters 57 (2003) 1595¬1603.
- 18 PEEK, F. W. Dielectric phenomena in high voltage engineering. New York: Mc Graw Hill Bookb Company. 1929.
- 19 MARTINS, N. "Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo". São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1994.
- 20 MACHADO, K. D. "Teoria do Eletromagnetismo, Volume I", 2ª edição. Ponta Grossa: Editora da UEPG, 2004.
- 21 Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, CESP, CPFL, ELETROPAULO, EPUSP, IEE/USP. Introdução ao comportamento dos isolantes empregados em cabos para redes aéreas isoladas. Nota técnica, Maio 1994.
- 22 Dieter Kind, "An Introduction to High Voltage Experimental Technique, Vieweg 1978.
- 23 CHAMPION, J. V.; DODD, S. J. Systematic and reproducible partial discharge patterns in an epoxy resin. IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, p. 339-343, 1995.
- 24 KREUGER, F. H. "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment". Butterworths, 1989.
- 25 CABUSSU, M. S.; CHAVES, C. S.; CERQUEIRA, D. P.; PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; INONE, P. C. Estudo dos efeitos da poluição atmosférica em isoladores de distribuição e métodos alternativos para minimizá-los. Curitiba: COELBA – LACTEC, 2005. Relatório Técnico.
- 26 DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. "Electrical degradation and breakdown in polymers". London: Peter Peregrinius, 1992.
- 27 TOMCZAK, F. "Correlação entre ensaios de resistência ao trilhamento elétrico". Dissertação de mestrado. PIPE, UFPR, 2000.
- 28 YOSHIMURA, N.; NISHIDA, M; NOTO, F. Influence of the electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 16, n. 6, p. 510-520, dezembro 1981.
- 29 WERNECK, M. M.; MACIEL, F. L.; CARVALHO, C. C.; RIBEIRO, R. M; PORCIUNCULA, P. Desenvolvimento de sistema de detecção e monitoramento de correntes de fuga em isoladores através de fibra óptica. Anais do II Citenel COPPE/UFRJ, 2003.
- 30 ZHAO, X.; LI, Z.; CHEN, Y.; SHI, L.; ZHU, Y.. Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene plastic under UV and solar light irradiation. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, v. 268, p. 101¬106, 2007.
- 31 MONTANARI, G. C.; SIMONI, L. Aging Phenomenology and Modelling. IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
- 32 DENSLEY, R. J.; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. Multiple Stress Aging of Solid Dielectric

Extruded Drycured Insulation Systems for Power Transmission Cables. IEEE Trans. Power Del., vol. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.

- 33 FECHINE, J. M.; SANTOS, J. B.; RABELLO, M. S. Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial. Química Nova. vol.29 n. 4 São Paulo July/August 2006.
- 34 ALLEN, N. S. "Engineering Plastics", Edição 8, 1995.
- 35 MUNARO, M.; PIAZZA, F.; SOUZA, G.; TOMIOKA, J.; RUVOLO, A.; LINERO, E. Fatores de influência na compatibilidade de cabos protegidos, isoladores e acessórios utilizados em redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica, sob condições de multiestressamento. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. p. 555 a 560. 2003.
- 36 MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; QURESHI, M. I. "Electrical in Power Systems". New York: Marcel Dekker, 1998.
- 37 TOMIOKA, J. Implementação da Técnica do Pulso Eletroacústico para medidas de perfis de campo elétrico em materiais dielétricos. Tese de Doutorado IFSC/USP, 1999.
- 38 IEC 60216-1 Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials. Part 1: General guidelines for ageing procedures and evaluation of test results. May, 1990.
- 39 OLIVEIRA, G. M. "Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento". Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), 2003.
- 40 CARDOSO, J. R. "Introdução ao método dos elementos finitos". Publicação Independente.
- 41 SABONNADIÈRE, J. C.; COULOMB, J. L. "Elementos Finitos e CAE, Aplicações em Engenharia Elétrica". São Paulo: Editora Aleph., 1993.
- 42 FEMLAB 3.1, User's guide. ©Copyright 1994¬2004 by COMSOL AB. October 2004.
- 43 Meyer, L.H.; Cherney, E.A.; Jayaram, S. H. The role of inorganic fillers in silicone rubber for outdoor insulation alumina tri-hydrate or silica. Electrical Insulation Magazine, IEEE. Volume 20, Issue 4, July August. 2004 Page(s): 13 21
- 44 PAPAZYAN, R. Seminar on "Modeling of the wave propagation properties of power cables using Femlab". October, 16, 2002, Gothenburg
- 45 WEI, H. J.; JAYARAM, S.; CHERNEY, E. A study of electrical stress grading of composite bushings by means of a resistive silicone rubber coating. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. Science Direct, Journal of Electrostatics. Volume 63, Issues 3-4, March 2005, Pages 273-283 November 2004. Available online 29 December 2004.
- 46 Documento Técnico ABRADEE 18.27 Especificação de isoladores tipo pino polimérico para redes compactas 13,8 e 34,5 kV. 2000.
- 47 Norma ASTM-D-150, ABRADEE 18.24 Especificação de espaçador, separador e amarrações para rede compacta de 13,8 kV e 34,5 kV. 2000.
- 48 Norma CODI 3.2.18.24. Especificação de Espaçadores e Amarrações para Rede Compacta de 15 kV, item 6.5.4.2.
- 49 W. M. Carty, J. Am. Ceram. Soc. 81, 1 (1998) 3-20.
- 50 P. Vincenzini, Fundamentals of Ceramic Engineering, Elsevier Applied Science Ltd., New York,

(1991) p. 27-50.51

51 C. R. Austin, H. Z. Schofield, N. L. Haldy, J. Am. Ceram. Soc 29, 12 (1946) 341-354.53

52 Y. Iqbal, W. E. Lee, J. Am. Ceram. Soc.82, 12 (1999) 3584-3590

- 53 FAGUNDES, R. C. "Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas Protegidas por Meio de Ensaios de Multiestressamento e Simulação Computacional". Paraná. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2008.54 GIANELLI B. F. "Caracterização do Efeito Corona em Isoladores Poliméricos do Tipo Bastão Submetidos à Poluição Salina". Bauru SP. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2008.
- 54 R. C. Buchanan, Ceramic Materials for Electronics -Processing, Properties, and Applications, Marcel Dekker, New York (1986)
- 55 NOBREGA, A. M. "Estudo das Redes Aéreas Compactas por Meio de Ensaios e Modelagens Utilizando O Método dos Elementos Finitos". Itajubá, MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, 2011;
- 56 Testing and Analysis on XLPE Brazilian Covered Cables" de autoria de Alan Melo Nóbrega, Manuel Luis Barreira Martinez, Alvaro Antonio Alencar de Queiroz – TDEI, Vol. 20, No. 2, pp. 628-643, 2013