

Avaliação do Desempenho de Espaçadores de Linhas Compactas de 13.8 kV através de Experimentos Laboratoriais

Bezerra, J. M. B., Lins, Z. D., Arcanjo, A. M. C.
Vasconcelos, J. M., Silva, A.A.P.,
Universidade Federal de Pernambuco,
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n,
CEP 50740-530, Recife, Brasil.

Santos, E. L.
Eletrobrás Distribuição Alagoas.
Gruta de Lourdes,
CEP 57057-900, Maceió, Brasil.

Resumo—O artigo apresenta resultados de ensaios preliminares para avaliação de espaçadores usados em redes compactas sujeitas à poluição. É feita descrição do Laboratório de Alta Tensão da UFPE e do método de ensaio utilizado. Esses ensaios preliminares foram realizados em dois modelos de espaçadores que são normalmente utilizados em linhas compactas das empresas de distribuição de energia. Resultados comparativos estão apresentados neste artigo e indicam desempenhos diferenciados de um modelo em relação ao outro.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta ensaios preliminares em espaçadores isolantes losangulares conduzidos dentro do Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) que está sendo desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em conjunto com a Eletrobras Distribuição Alagoas (EDAL). Este projeto intitulado “Novos materiais isolantes e condutivos para redução de perdas técnicas na distribuição de energia elétrica” tem duas vertentes principais. A primeira delas busca analisar materiais e geometrias estruturais que minimizam as perdas relacionadas com o efeito Joule. Com isso, são pesquisados materiais e geometrias de dielétricos que possam reduzir as correntes de fuga em espaçadores isolantes utilizados em redes de distribuição compactas. A segunda vertente deste projeto de P&D busca, a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados, propor um espaçador isolante losangular que resulte na minimização de suas perdas dielétricas. Inicialmente, neste artigo, é apresentado o Laboratório de Alta Tensão (LAT) recentemente inaugurado no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFPE. É feita descrição dos equipamentos presentes neste laboratório e, dos métodos e procedimentos utilizados nos ensaios realizados em espaçadores isolantes losangulares. Os ensaios descritos, apesar de preliminares, apontam resultados comparativos entre dois modelos (X e Y) de espaçadores losangulares normalmente utilizados em redes de distribuição compactas, de forma a permitir a caracterização de aspectos na geometria desse espaçador que influenciam no aumento ou na diminuição das correntes de fuga pelo espaçador.

II. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

O LAT do DEE/UFPE é um laboratório que permite a realização de ensaios de alta tensão aplicada em materiais e equipamentos isolantes sob a possibilidade de diversas condições ambientais. O LAT é composto por dois ambientes, sendo uma área de ensaios com $34,2 m^2$ e uma sala de controle/aquisições de sinais. A disposição física dos principais equipamentos do LAT e seus aspectos dimensionais estão apresentados no layout da Figura 1. Na legenda são descritos os principais equipamentos que compõem este laboratório.

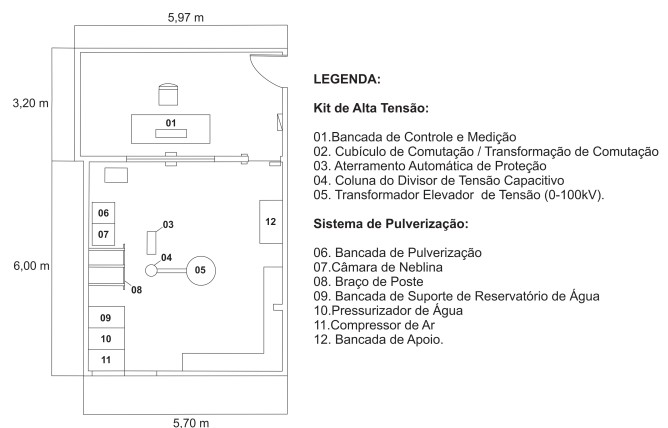


Figura 1. Layout do Laboratório de Alta Tensão.

A. Kit de Alta Tensão

O Kit de Alta Tensão, fabricado pela empresa Suíça Haefely, é composto dos equipamentos para realização de ensaios de tensão aplicada em frequência industrial conforme indicado em [1]. Na Tabela I são descritos alguns equipamentos que constituem esse Kit.

Na bancada de controle e medição também é usado um osciloscópio do fabricante Agilent (modelo: DSO-x 3034A) que possui largura de banda de 350 MHz e taxa de amostragem de até 4G amostras por segundo.

Tabela I
EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

Equipamentos	Dados Técnicos
Transformador	Potência: 10 kVA Tensão de entrada: 0 a 220 V Corrente de entrada: 2x20 A Tensão de saída: 0 a 100 kV
OT 276	Controle de regulação do transformador
Cubículo de comutação	Potência: 5 kVA Tensão de entrada: 220 V Tensão de saída: 0 a 220 V Corrente máxima: 22 A

B. O Sistema de Neblina

Na Figura 2 é ilustrado o diagrama do sistema de neblina com todos os componentes.

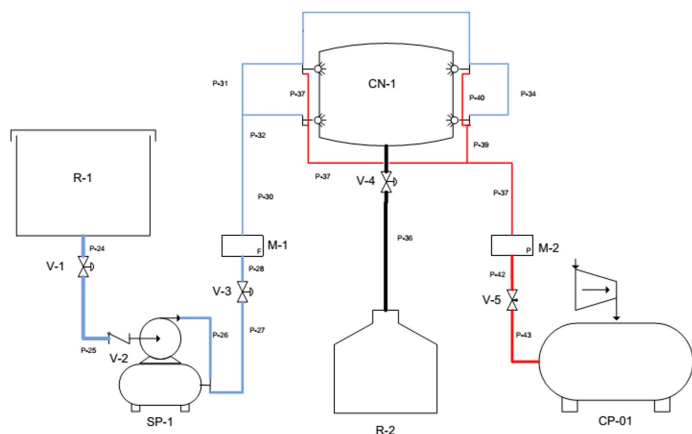


Figura 2. Diagrama de Bloco do Sistema de Pulverização.

As linhas de cor azul representam a circulação da solução aquosa que sai do reservatório R-1, passa pelo registro V-1, válvula de retenção V-2, sistema de pressurização SP-1, registro de pressão V-3, medidor de vazão de água M-1 e segue para a entrada de água dos quatro bicos injetores localizados na câmara de neblina CN-1. As linhas de cor preta representam o caminho que a solução aquosa, já usada no processo de pulverização, percorre da câmara de neblina CN-1 até ser descartada no reservatório R-2 através do registro V-4. As linhas de cor vermelha mostram o caminho percorrido pela tubulação de ar comprimido. O ar é comprimido no compressor CP-01 (até a pressão máxima de 10 bar) e posteriormente, é direcionado para o regulador de pressão V-5 onde é filtrada a umidade, resquícios de óleo e é feito o ajuste para pressão de trabalho de 7 bar (medidor de pressão M-2), após atingir a pressão de trabalho o ar é liberado para alimentar os quatro bicos injetores localizados na câmara de neblina, conforme sua construção típica apresentada na Figura 3.

A névoa é produzida na câmara de neblina por intermédio de quatro bicos injetores, os quais fragmentam a solução através de jatos de ar comprimido direcionado em ângulo reto para o bico que injeta a solução aquosa. Os bicos injetores consistem de tubos resistentes à corrosão e tem por objetivo gerar a neblina de forma uniforme em torno do objeto sob ensaio.

O diâmetro interno do bico de ar é de $1,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ e o diâmetro interno do bico da solução é de $2,0 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$. Ambos os bicos têm um diâmetro externo de $3,0 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ e os terminais são cortados em seção reta e polidos. O terminal do bico injetor da solução repousa sobre o eixo do bico injetor de ar comprimido a uma distância de $\pm 0,05 \text{ mm}$. A distância entre o terminal do bico injetor de ar comprimido e a linha central do bico injetor da solução é de $3,0 \pm 0,05 \text{ mm}$. O eixo dos dois bicos injetores repousam no mesmo plano a uma distância de $\pm 0,05 \text{ mm}$. Quatro desses pulverizadores, conforme estabelece [2], estão colocados em duas colunas paralelas e em lados opostos a câmara de neblina.

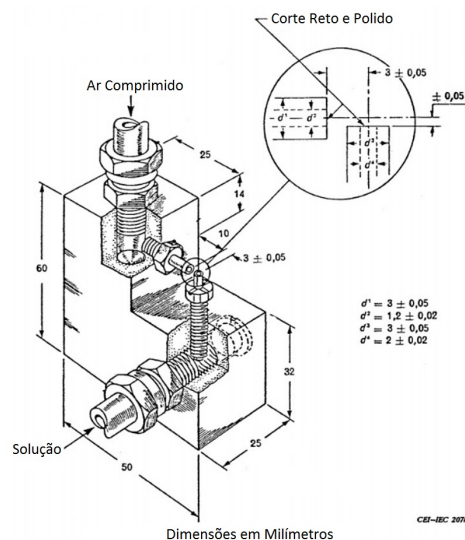


Figura 3. Construção típica de um bico de pulverização. [2]

Os elementos que foram ensaiados dentro da câmara de neblina são os espaçadores losangulares de 15 kV (modelo X e Y), utilizados normalmente em redes compactas de 13,8 kV, conforme apresentados na Figura 4.

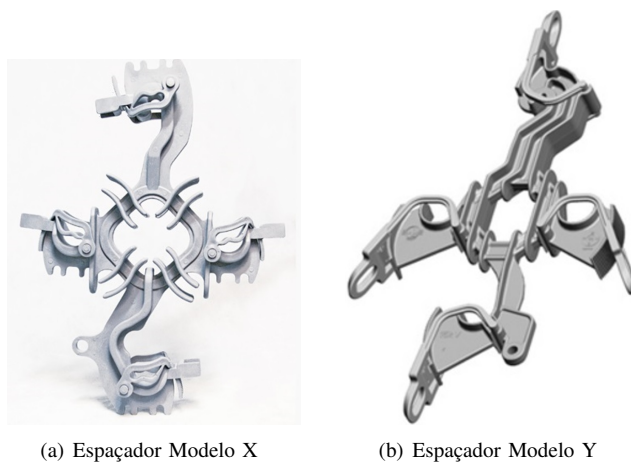


Figura 4. Modelos de Espaçadores Estudados

C. Câmara de Neblina

A Câmara de Neblina busca simular o efeito da neblina em diferentes níveis de contaminação tendo o controle da temperatura e umidade existentes no seu interior. A poluição depositada no dispositivo isolador produz uma camada condutiva em sua superfície que pode levar (a depender da tensão aplicada, temperatura e umidade existentes) ao colapso superficial do dielétrico ou a desgastes cumulativos do mesmo, provocando assim, a médio prazo o desgaste irreversível desse dielétrico.

A câmara de neblina foi projetada e construída seguindo a norma técnica CEI/IEC 507:1991 [2]. Essa câmara construída em acrílico transparente com 6 mm de espessura é um cubo de aresta 0,9 m (volume de $0,729 \text{ m}^3$). A Figura 5 mostra o desenho da Câmara de Neblina construída com o posicionamento dos quatro bicos injetores e como estão dispostos na estrutura. Pode ser observado, também, nesta Figura 5 o espaçador losangular de 15 kV e a presença de duas janelas quadriculares para facilitar o manuseio do dispositivo a ser ensaiado, bem como quatro saídas de acúmulo de solução na face inferior da Câmara de Neblina.

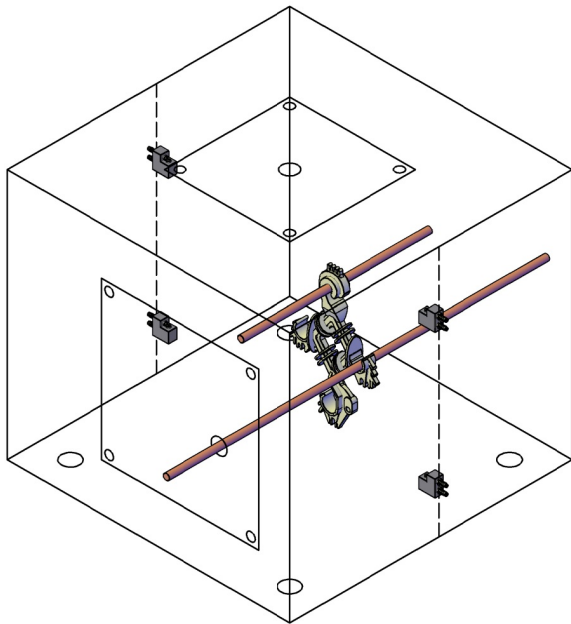


Figura 5. Câmara de Neblina.

III. MÉTODO DE ENSAIO

No ensaio de névoa limpa, o equipamento sob ensaio é artificialmente contaminado antes de ser submetido à ação da névoa e posteriormente, é aplicada a tensão. A composição da névoa limpa, na qual utiliza água destilada segue norma IEC (*Internacional Electrical Commission*) [2].

Uma das maiores vantagens dos espaçadores poliméricos é a capacidade de manter a sua hidrofobia, mesmo em ambientes poluídos. A referência [3], classifica a hidrofobia como a propriedade que permite a superfície do material repelir a

água, evitando a formação de uma película de água tendo como consequência a redução das correntes de fuga.

De acordo com [4], a superfície contaminada torna-se hidrofílica, mas após um período de repouso volta a ser hidrofóbica. Assim, quando se coloca o espaçador para ser ensaiado dentro da Câmara de Neblina e o mesmo encontra-se seco, espera-se que o espaçador apresente níveis baixos de corrente de fuga.

O contaminante artificial utilizado foi o Kaolin, que apresenta partículas de tamanho da ordem de $5,8 \mu\text{m}$, densidade de $2,6 \text{ g/cm}^3$ e composição de SiO_2 (46%), Al_2O_3 (37%) e Fe_2O_3 (0,9 %).

Visando padronizar a ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) nos espaçadores em estudo, conforme estabelecidos pela Tabela II, os valores utilizados para elaboração das soluções estão apresentados na tabela III [5].

Tabela II
CARACTERIZAÇÃO DAS CLASSES DE POLUIÇÃO.

Classe	Classificação	Faixa de ESDD (mg/cm^2)
A	Atmosfera Limpa	0,00 - 0,032
B	Contaminação Muito Leve	0,032 - 0,038
C	Contaminação Pesada	0,056 - 0,123
D	Contaminação Muito Pesada	Maior que 0,123

Tabela III
VALORES UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DAS SOLUÇÕES.

Classe	ESDD (mg/cm^2)	Condutividade da suspensão (mS/cm)
A	0,025	10,07
B	0,035	14,10
C	0,100	40,00
D	0,200	80,20

Os procedimentos seguidos para os ensaios, conforme as referências [2] e [4], foram:

- Para preparação das amostras foram utilizados quatro espaçadores novos, sendo dois de cada modelo;
- Após lavagem em água corrente e secagem ambos os espaçadores foram poluídos artificialmente;
- O tempo de repouso foi de três horas (intervalo de tempo entre a deposição da poluição e a aplicação de tensão), neste intervalo, toda água foi evaporada ficando apenas a poluição depositada;
- Cada espaçador foi ensaiado separadamente, sob as mesmas condições de ensaio, ou seja, mesma tensão, temperatura, umidade, nível de poluição e tempo de aplicação da tensão;
- Antes de iniciar a pulverização, os espaçadores foram instalados no interior da câmara de neblina e ensaiados a seco;
- O tempo de ensaio de cada espaçador foi de 10 minutos, dividido em duas etapas:
 - Etapa 1: Ciclo de aspersão de água destilada de 2 minutos;
 - Etapa 2: Seguindo de 8 minutos sem os bicos injetores estarem pulverizando os espaçadores.

- A tensão aplicada foi de 1,05 pu da tensão fase neutro, que corresponde a aproximadamente 8,4 kV.

Cada espaçador foi montado dentro da câmara de neblina simulando a posição usada em campo, conforme ilustração registrada na Figura 5. O cabo de sustentação foi substituído por um pino de suporte, e este pino foi fixado em uma cadeia de isoladores de vidro vertical conforme foto apresentada na Figura 6.

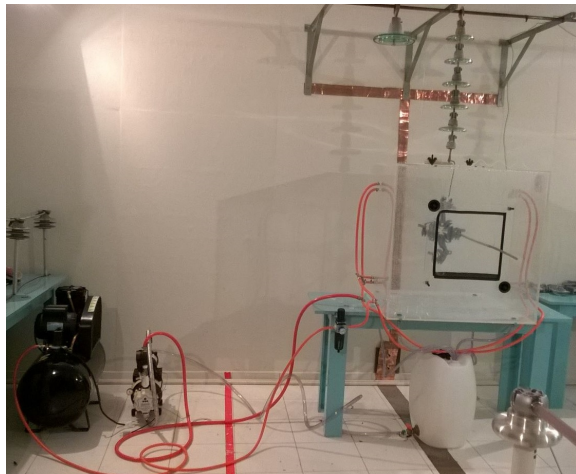


Figura 6. Disposição dos Equipamentos no Ensaio de Névoa Limpa.

A corrente de fuga é medida através de um resistor “R” de 10 k Ω inserido em série com o espaçador e a malha de aterramento do laboratório, conforme esquema ilustrado na Figura 7.

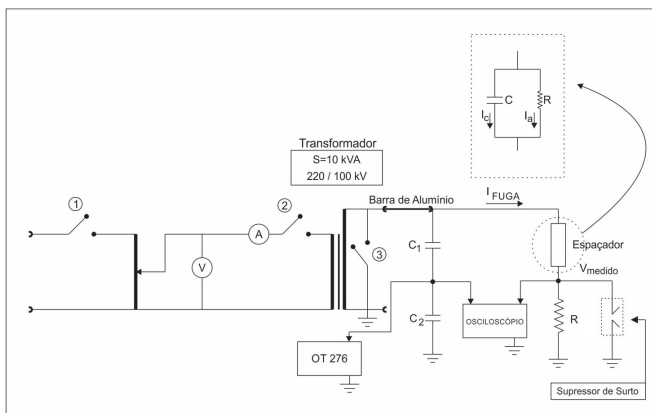


Figura 7. Circuito elétrico para aquisição da corrente de fuga.

A tensão equivalente aplicada ao espaçador e a corrente de fuga são registradas em osciloscópio com impedância de entrada de 100 k Ω e taxa de amostragem de 50 MSa/s.

IV. RESULTADOS

Os ensaios preliminares desenvolvidos nos espaçadores modelo X e Y tiveram as classe A e C de contaminação em valores de ESDD e condutividade conforme apresentado na tabela III.

Após instalação dos espaçadores no interior da câmara de neblina, procedeu-se o início do ensaio para cada modelo de espaçador. As condições ambientais no interior da Câmara de Neblina foram registradas através de um Termo-higrômetro digital com sonda externa (escala de temperatura: -50°C a +70°C; e escala de umidade: 15% a 99% UR). A sonda foi inserida no interior da Câmara de Neblina antes do início da aspersão da névoa limpa e foi mantida no interior da câmara durante todo o ensaio.

As condições ambientais no interior da Câmara de Neblina, no início do ensaio foram de umidade relativa 22% e temperatura ambiente de 20°C. Após o início da aspersão da névoa, e aplicação da tensão, a umidade relativa foi elevada ao valor de 99%, tornando o interior da Câmara de Neblina um ambiente com umidade saturada pela névoa limpa. A temperatura manteve-se em 20°C durante todo o ensaio.

A corrente de fuga rms dos dois espaçadores foram registradas na Tabela IV para os níveis de poluição tipo A e tipo C.

Tabela IV
CORRENTE DE FUGA NOS ESPAÇADORES PARA AS CLASSES DE POLUIÇÃO CLASSE A E CLASSE C.

Tempo (minutos)	Corrente de fuga Espaçador X [μA]		Corrente de fuga Espaçador Y [μA]	
	Poluição tipo A	Poluição tipo C	Poluição tipo A	Poluição tipo C
0	21,10	22,05	17,30	17,60
1	492,00	499,00	455,00	518,00
2	561,00	721,00	221,00	597,00
3	154,00	348,00	31,00	324,00
4	122,00	311,00	28,00	248,00
5	94,00	292,00	23,00	139,00
6	72,00	239,00	21,30	36,70
7	69,00	181,00	21,30	36,00
8	66,00	173,00	21,30	36,00
9	64,00	133,00	21,20	34,00
10	62,00	131,00	21,30	34,00

V. DISCUSSÕES

Após realização dos ensaios, com os dados levantados na Tabela IV, foram construídos quatro gráficos comparativos do desempenho dos espaçadores em função do nível da poluição depositada. Os gráficos comparativos, a partir dos ensaios realizados, estão ilustrados nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

Na Figura 8 é feita uma comparação entre as correntes de fuga rms nos dois espaçadores para o nível de contaminação leve (Classe A). O maior valor de corrente encontrado foi de 561 μA no espaçador X, dois minutos após início da aspersão da névoa. Ao final de 10 minutos o espaçador X apresenta uma corrente de fuga de 62,0 μA e o espaçador de modelo Y apresenta corrente residual de 21,3 μA .

A Figura 9 apresenta uma comparação entre as correntes nos espaçadores dos dois modelos (X e Y) sob análise para um ambiente com poluição pesada (Classe C). Novamente, o espaçador modelo X apresenta uma corrente de fuga superior ao modelo Y, o valor registrado para a corrente de fuga rms no espaçador modelo X é de 721 μA e a maior corrente de fuga

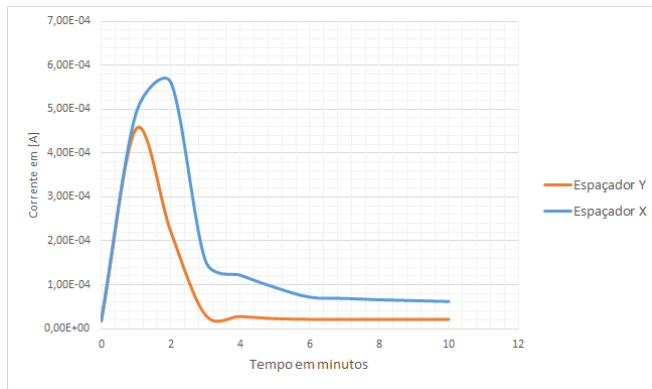


Figura 8. Comparação das correntes de fuga nos espaçadores modelos X e Y para o nível de contaminação leve (Classe A).

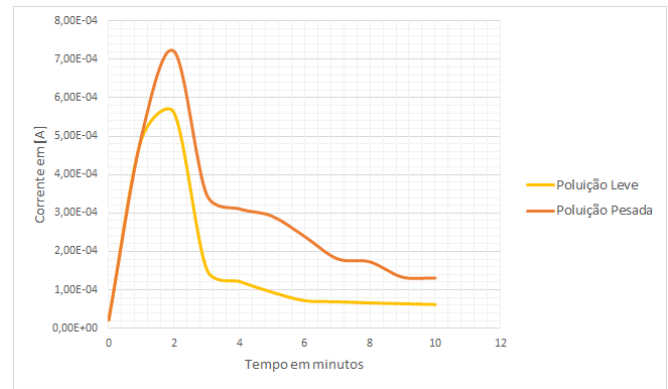


Figura 10. Comparação das correntes de fuga nos espaçadores modelo X para os níveis de contaminação leve (Classe A) e pesada (Classe C).

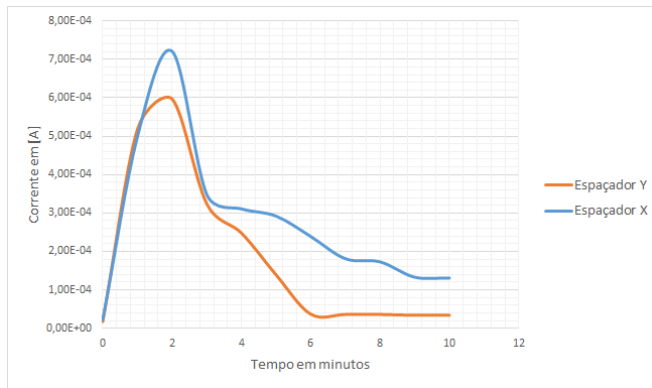


Figura 9. Comparação das correntes de fuga nos espaçadores modelos X e Y para o nível de contaminação pesada (Classe C).

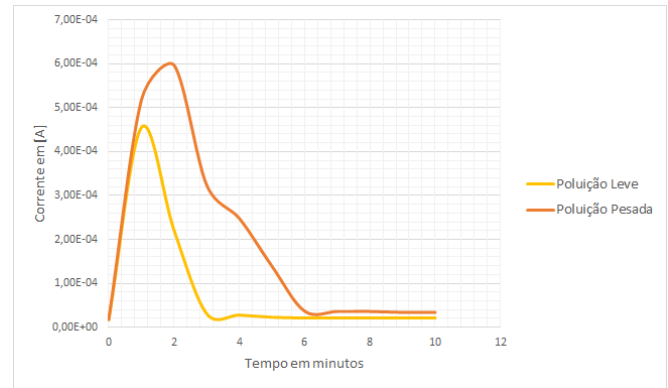


Figura 11. Comparação das correntes de fuga nos espaçadores modelo Y para os níveis de contaminação leve (Classe A) e pesada (Classe C).

rms no espaçador modelo Y é de $597 \mu A$. Diferentemente do ensaio de contaminação leve (Classe A), o perfil de decaimento da corrente de fuga, após desligamento da aspersão da névoa no espaçador modelo X, é notadamente mais lento, ao passo que, ao fim do ensaio a corrente de fuga do espaçador modelo X era de $131 \mu A$ e no espaçador modelo Y já atinge uma corrente residual de $34 \mu A$.

Nas Figuras 10 e 11 são feitas sobreposições dos perfis de curva de cada espaçador para as contaminações leve (Classe A) e pesada (Classe C). Na Figura 10 pode-se observar a comparação entre o comportamento da corrente de fuga no espaçador modelo X com poluição leve (curva laranja) e poluição pesada (curva vermelha). Como esperado a corrente de fuga aumenta quando o espaçador é submetido a uma poluição mais elevada e o seu decaimento se torna mais lento quando comparada com o ensaio utilizando uma poluição leve. A Figura 11 ilustra a sobreposição das correntes de fuga para o espaçador modelo Y. No ensaio com poluição pesada a corrente de fuga tem decaimento mais acentuado ao ponto de se aproximar ao valor alcançado no ensaio de poluição leve nos últimos 4 minutos.

As curvas de tensão (forma de onda laranja) e da corrente (forma de onda verde) foram capturadas para ambos os espaçadores e refletem dois momentos dos ensaios:

- Sem aspersão de névoa limpa: Figuras 12 e 14;
- Com aspersão de névoa limpa: Figuras 13 e 15.

Pode ser observado nas Figuras 12 e 14 a defasagem da corrente de fuga em aproximadamente 90° com relação ao ângulo de fase da tensão, devido a predominância do efeito capacitivo. Já nas Figuras 13 e 15, com a umidade da câmara saturada devido a aspersão da névoa, a corrente de fuga (curva verde) tem, em sua predominância, o efeito resistivo com a corrente em fase com a tensão (curva laranja) indicando aumento nas perdas de energia ativa nesta condição de ensaio.

VI. CONCLUSÕES

A recente implantação do Laboratório de Alta Tensão do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco permitirá realização de ensaios e estudos em isolantes visando a melhoria dos seus desempenhos nas mais diversas condições operacionais.

Os resultados dos ensaios em dois modelos de espaçadores losangulares poliméricos, normalmente utilizados em redes compactas de 13,8 kV das empresas de distribuição de energia elétrica, apresentaram evidente desempenho superior do modelo Y em relação ao X, devido a maior distância de escoamento do modelo Y ($78,9 \text{ cm}$) entre a fase em estudo e o terra em relação ao modelo X ($43,3 \text{ cm}$). Visto que, os valores

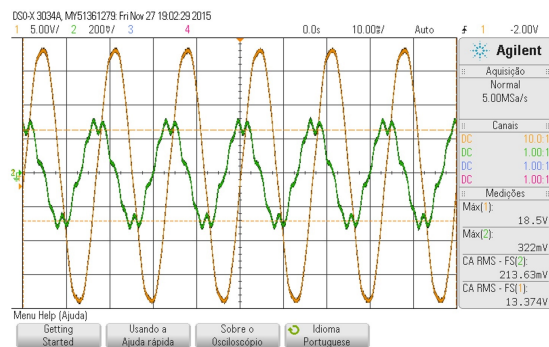


Figura 12. Forma de onda da corrente de fuga no espaçador modelo X, sem a presença da névoa limpa.

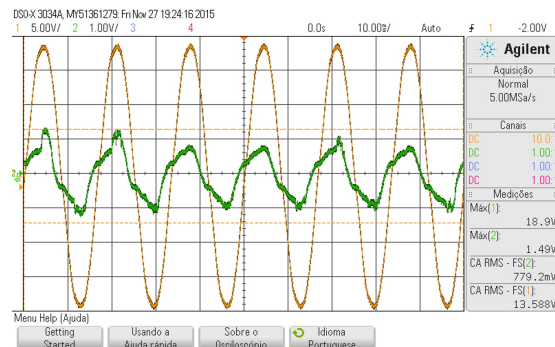


Figura 15. Forma de onda da corrente de fuga no espaçador modelo Y, com a presença da névoa limpa.

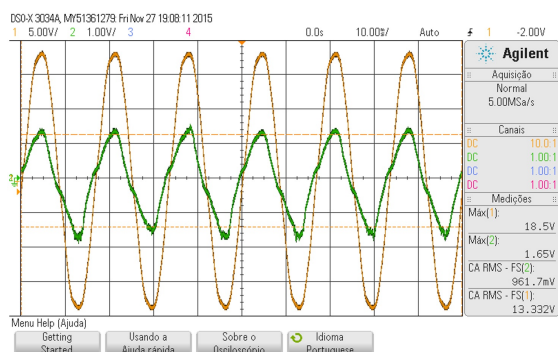


Figura 13. Forma de onda da corrente de fuga no espaçador modelo X, com a presença da névoa limpa.

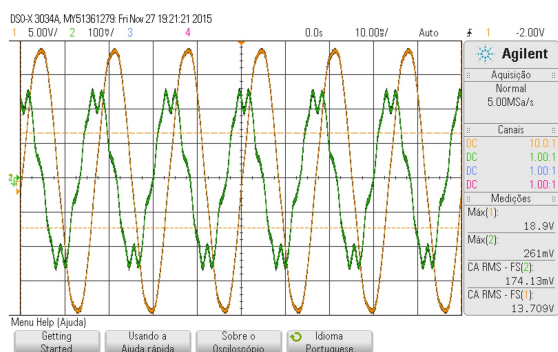


Figura 14. Forma de onda da corrente de fuga no espaçador modelo Y, sem a presença da névoa limpa.

obtidos de corrente de fuga no modelo Y (em ensaios de aplicação de tensão sob duas diferentes condições ambientais) normalmente apresentaram valores inferiores em comparação com o modelo X.

Estes resultados indicam ponto positivo na aquisição do modelo Y para as empresas de distribuição de energia elétrica e, incentivam na busca de geometrias ainda mais apropriada visando redução ainda maior das perdas de energia elétrica provocadas pelas correntes de fuga nos espaçadores losangulares poliméricos. Trabalhos atualmente estão sendo desenvolvidos dentro do projeto de P&D visando a obtenção de geometrias mais apropriadas.

VII. AGRADECIMENTOS

A pesquisa, que encontra-se em desenvolvimento, tem financiamento do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através da Eletrobras Distribuição Alagoas – EDAL. Os autores agradecem a essas empresas pelo apoio empreendido, ao CNPq pela bolsa de mestrado de um dos membros e, ao PPGE/UFPE pelos conhecimentos agregados ao longo da pós-graduação de dois dos autores envolvidos com as pesquisas registradas neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] *Haefely Test Ag: High Voltage Construction Kit.*, 2001.
- [2] I. E. Commision, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems.," vol. IEC 507, p. 60.
- [3] O. L. S. P. Max G. G. Neri; Edson G. da Costa; Ricardo W. S. Garcia, "Avaliação de técnicas de monitoramento de isoladores poliméricos.," *Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas*, p. 6.
- [4] Pinheiro.W, "A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de média tensão, instalados em ambientes agressivos.," Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2008.
- [5] E. P. R. I. (EPRI), *Transmission Line Reference Book 345 kV and above*, vol. 2. 1982.