

# Avaliação do Desempenho Elétrico de Isoladores de Vidro Revestidos por Verniz Nanométrico

Maria A. O. Rodrigues, Gustavo P. Alvarez, Guilherme C. G. de Lima, Luís C. Ribeiro, Marco A. M. Gutierrez, Bruno P. Rodrigues, Paulo H. R. P. Gama e Tarso V. Ferreira.

**Resumo** – Os recursos envolvidos para trocar isoladores danificados por descargas envolvem gastos com equipamentos e equipe de manutenção, além de ocasionar cortes de fornecimento e multas às empresas. Este estudo realiza uma avaliação do desempenho elétrico de isoladores de vidro e porcelana, revestidos por um verniz de característica hidrofóbica, desenvolvido com tecnologia nanométrica. Objetiva-se minimizar a corrente de fuga desses isoladores, elevando a impedância do conjunto e melhorando seu desempenho sob chuva. Conseqüentemente, busca-se reduzir a frequência de intervenções para manutenção e limpeza, reduzindo os custos envolvidos. A avaliação foi focada na medição de corrente de fuga dos isoladores nas condições a seco, sob névoa limpa e névoa salina. Um teste complementar de impulso atmosférico foi ainda realizado. Os isoladores revestidos pelo verniz apresentaram acréscimo muito menos significativo de corrente de fuga, quando comparados aos isoladores sem revestimento, indicando tal verniz como uma ferramenta capaz de melhorar o desempenho de isoladores.

**Palavras-chave** – Corrente de fuga, hidrofobicidade, isolador, nanotecnologia, névoa.

## I. INTRODUÇÃO

Desde que a eletricidade pôde ser gerada em quantidades consideráveis, por volta de 1880, isoladores suficientemente robustos têm sido utilizados no transporte de energia elétrica. Estes equipamentos possuem duas funções principais: prover isolamento elétrico e suporte mecânico às estruturas. Isso faz deles um dos componentes mais críticos

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

O projeto, intitulado Desenvolvimento de Projeto para Aplicação de Tinta Nanotecnológica em Isoladores Elétricos Visando Mitigação de Falhas, se apresenta na ANEEL sob o número PD-0453-0009/2011.

Maria A. O. Rodrigues, Gustavo P. Alvarez e Guilherme C. G. de Lima trabalham na empresa Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI). (e-mails: malicerodrigues@buenomak.com.br; gustavoperez@buenomak.com.br; guilherme@buenomak.com.br).

Luís C. Ribeiro e Marco A. M. Gutierrez trabalham na empresa Itapebi Geração de Energia S.A. (e-mails: lribeiro@neoenergia.com; mgutierrez@neoenergia.com).

Bruno P. Rodrigues trabalha na empresa Baguari Geração de Energia Elétrica S.A. (e-mail: bruno@uhebaguari.com.br).

Paulo H. R. P. Gama trabalha na empresa B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos LTDA. (e-mail: paulogama@bgpesquisa.com.br).

Tarso V. Ferreira é professor na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). (e-mail: tarso@dee.ufcg.edu.br).

do sistema, ou seja, o comportamento elétrico e mecânico dos isoladores, afeta diretamente o desempenho e a confiabilidade do sistema de transmissão e distribuição de energia [1].

Embora o valor percentual que define a participação dos isoladores no custo total de implantação de uma linha de transmissão seja relativamente pequeno, quando se contabilizam os custos da operação e manutenção, em todas as suas vertentes, a participação destes componentes tem uma parcela mais significativa [2].

As interrupções no fornecimento de energia acarretam grandes prejuízos para consumidores e empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras. A proposta de uma melhor qualidade no fornecimento da energia oferecida pelas concessionárias tem como ênfase a redução das interrupções no fornecimento de energia elétrica [3].

Existe uma grande procura por novas combinações de materiais que superem os atuais requisitos de projeto no ramo de isoladores, visto que há uma tendência de expansão e recapacitação de linhas de transmissão para tensões mais elevadas. Estudos relacionados a materiais de recobrimento de isoladores e análise de características hidrofóbicas foram alguns dos principais temas de pesquisa no âmbito da engenharia elétrica ao longo da última década [2].

O efeito de hidrofobicidade e de superfícies autolimpantes, exibidos por alguns vegetais, como a folha de lótus, vêm sendo pesquisados há muito tempo, e somente na década de 1990 descobriu-se sua razão: a rugosidade sub-micrométrica que não prende as partículas de sujeira, e a existência de uma cera hidrofóbica que reduz a adesão de água, denominada pelo Dr. Wilhelm Barthlott de efeito lótus. Dessa forma, toda sujeira que se deposita sobre a superfície é carregada pela água (durante uma chuva, por exemplo). Há anos os pesquisadores do setor se inspiram nessas estruturas, em busca de materiais que possam significar o fim da limpeza de isoladores [4].

A nanotecnologia pode ser aplicada na melhoria das propriedades elétricas, mecânicas, térmicas ou químicas dos equipamentos de energia elétrica. Existem diversas possibilidades para aplicação da nanotecnologia na engenharia elétrica de potência, como: melhoria dos condutores metálicos (redução das perdas); melhoria dos isoladores (aumento da isolamento elétrica, estabilidade mecânica, comportamento da carga térmica, resistência química); miniaturização do design (redução do material utilizado, maior confiabilidade); melhoria da compatibilidade eletromagnética e melhoria, em longo

prazo, da eficiência e aumento do tempo de vida útil [5].

Um dos primeiros produtos usados no campo nanotecnológico foi um material capaz de melhorar a hidrofobicidade das superfícies. Tentativas de revestir isoladores cerâmicos com silicone obtiveram sucesso relativo. Os principais problemas encontrados foram a dificuldade na aplicação do revestimento de silicone e sua estabilidade em longo prazo [4].

A utilização de filmes finos de característica hidrofóbica, visando tornar autolimpante a superfície de isoladores do sistema elétrico vem sendo estudada em trabalhos como o de [4]. No entanto, o material utilizado foi especificamente desenvolvido para o tratamento de vidros de automóveis, não apresentando assim resultados significativos.

Autores como [6-7] estudam, desde 1990, a perda e recuperação de hidrofobicidade de borracha de silicone, bem como sua resistência à erosão, como revestimento isolante em isoladores. Em pesquisas posteriores, nanopartículas, tais como nanosílica pirogênica, sílica natural e nano alumina, são utilizadas para reforçar a borracha de silicone para aplicações em isoladores, mostrando que as nanopartículas melhoram a resistência ao calor à erosão de compósitos de silicone. Em um trabalho recente, técnicas de aplicação das nanopartículas aditivas ao enchimento de borracha de silicone vêm sendo desenvolvidas. O objetivo é melhorar a dispersão de nanopartículas no momento de incorporar os agentes de enchimento (aditivos nanoparticulados) no polímero [6]. Ainda no campo das nanopartículas aditivas ao enchimento de borracha de silicone pode ser referenciado o trabalho de [8], onde também foi utilizada a nanosílica para reforçar a borracha de silicone. O objetivo é aplicar tal revestimento em isoladores cerâmicos localizados em áreas costeiras, ou seja, submetidos à poluição ambiental marítima.

Entre os problemas frequentes ocorridos em isoladores do sistema elétrico estão as correntes de fuga devidas à umidade do ar e chuvas, em combinação com a sujeira acumulada pela poluição ambiental (industrial e/ou marítima) [3]. Dentre as técnicas existentes para detecção de isolamentos defeituosos em serviço, a medição da corrente de fuga é amplamente reconhecida como um dos principais parâmetros para avaliação do desempenho de equipamentos. Através dela obtêm-se informações importantes acerca do estado de operação de um isolamento. Uma elevada corrente de fuga pode indicar presença de poluição, perda da capacidade isolante do isolador, carbonização etc. Além disso, sabe-se que o aquecimento de isoladores não é causado pelo efeito Corona, mas pela presença de correntes de fuga. Um isolador em boas condições geralmente apresenta corrente de fuga da ordem de alguns microampères, quando exposto a sua tensão nominal de operação [1].

Este estudo realiza uma avaliação do desempenho elétrico de isoladores de suspensão revestidos por um verniz isolante, de característica hidrofóbica, desenvolvido com tecnologia nanométrica, visando minimizar a corrente de fuga desses isoladores, elevando a impedância do conjunto e melhorando seu desempenho. A avaliação foi especialmente focada na medição de corrente de fuga de isoladores de

vidro e de porcelana, do tipo disco, largamente empregados no sistema elétrico, nas condições a seco, sob névoa limpa e névoa salina. Um ensaio complementar de impulso atmosférico foi ainda realizado objetivando-se buscar alguma particularidade nas amostras. Dados de tensão e corrente foram adquiridos utilizando um osciloscópio digital e um computador foi utilizado para processar os dados coletados.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. Material

Os isoladores revestidos pelos vernizes e utilizados nos ensaios elétricos são de vidro temperado e porcelana vitrificada, do tipo disco, padrão 15 kV. Algumas das amostras são apresentadas na Figura 1.



Figura 1. Tipos de isoladores utilizados [4].

Para este estudo, foram considerados isoladores novos e usados. Os isoladores de vidro novos e usados foram adquiridos de fabricantes diferentes, já os isoladores de porcelana novos e usados, foram adquiridos do mesmo fabricante. O verniz nanotecnológico de característica hidrofóbica foi desenvolvido pela empresa brasileira Nanum Nanotecnologia S.A., especificamente para utilização neste estudo.

### B. Métodos

Para alcançar os objetivos propostos foram realizadas montagens experimentais e campanhas de ensaios e medições no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCCG).

#### i. Revestimento dos Isoladores

Os procedimentos de pintura dos isoladores ocorreram também nas dependências do LAT/UFCCG, utilizando aspersão por spray com ar comprimido. Foram empregados para isto, um compressor conectado a uma pistola do tipo *High Volume Low Pressure* (HVLP), com bico pulverizador de diâmetro padrão de 1 mm. Na aplicação, foi utilizada uma pressão de trabalho que variou entre 30-40 psi.

Antes da aplicação do verniz, as superfícies de vidro e de porcelana encontravam-se limpas e secas, mantendo-se

livres de água, manchas, poeiras, óleo e/ou outros poluentes. O pino e a campânula dos isoladores não foram cobertos antes da aplicação do verniz.

Dois demãos de verniz foram aplicadas, sendo uma passagem horizontal e outra vertical, consideradas como uma demão, visando garantir um cobrimento constante e suficiente. Durante a fase de secagem (que tem início minutos após o processo de pintura, até à fixação final, que dura em média 15 dias), os isoladores revestidos foram protegidos contra a chuva e atividades humanas (toque, limpeza, etc.)

Nessa fase da pesquisa, foram pintados 8 isoladores de vidro (sendo 4 novos e 4 usados). Duas amostras (uma nova e uma usada) foram mantidas como referência, e não receberam verniz. Dois métodos de cura do verniz foram utilizados: cura natural (temperatura e umidade ambiente), e a cura forçada (utilizando uma estufa de laboratório). Entre as amostras novas, duas receberam verniz e curaram naturalmente, enquanto que as outras duas curaram da maneira forçada. Da mesma forma, 8 isoladores de porcelana foram revestidos, e a divisão das amostras foi a mesma descrita para os isoladores de vidro, incluindo o processo de cura. Os isoladores que passaram pelo processo de cura forçada permaneceram na estufa durante 16 horas, a uma temperatura de 100°C. A Tabela 1 apresenta um maior detalhamento sobre os tipos de isoladores empregados na pintura, bem como o processo de secagem utilizado.

Tabela 1. Sumarização da quantidade de isoladores empregados, de acordo com os tipos de isoladores, condição de uso, verniz empregado e métodos de secagem aplicados.

Isoladores de Vidro Temperado				
Condição de Uso	Verniz Aplicado		Processo de Secagem	
	Sim	Não	Ambiente	Estufa
Novo	4 amostras	1 amostra	2 amostras	2 amostras
Usado	4 amostras	1 amostra	2 amostras	2 amostras
Isoladores de Porcelana Vitrificada				
Condição de Uso	Verniz Aplicado		Processo de Secagem	
	Sim	Não	Ambiente	Estufa
Novo	4 amostras	1 amostra	2 amostras	2 amostras
Usado	4 amostras	1 amostra	2 amostras	2 amostras

## ii. Ensaios de Corrente de Fuga

Todos os ensaios de corrente de fuga foram realizados no interior de câmaras de névoa, preparadas no LAT/FUCG. As câmaras têm dimensões compactas: 1,2 x 1,0 x 1,0 m, tal como ilustrado na Fig. 2.



Figura 2. Fotografia das câmaras de névoa retirada durante a realização dos ensaios.

As amostras a serem ensaiadas foram conectadas no interior das câmaras e uma barra metálica foi colocada como eletrodo de alta tensão. Um osciloscópio digital foi utilizado para adquirir os dados de tensão e de corrente de fuga.

### a. A Seco

Para o ensaio de corrente de fuga nas condições a seco e sob a névoa limpa, todos os isoladores foram energizados com a tensão de 20 kVrms, para a medição da corrente de fuga. Este nível de tensão foi escolhido para se ter uma baixa probabilidade de causar descargas superficiais nas amostras, quando a seco.

### b. Sob Névoa Limpa

Para o ensaio de corrente de fuga sob névoa limpa, os isoladores foram energizados por 6 horas contínuas a uma tensão de 20 kVrms, para a medição da corrente de fuga. Da mesma maneira, este nível de tensão foi escolhido por ter baixa probabilidade de provocar descargas superficiais nas amostras, quando a seco. A névoa limpa foi gerada por quatro aspersores padronizados pela NBR 10621 [9] dispostos simetricamente em relação às amostras. Estes aspersores empregam ar comprimido e água para gerar a névoa. A água para a geração de névoa foi obtida a partir do sistema de alimentação local, e tem condutividade típica de 500 µS/cm. A pressão do ar utilizada foi de 15 psi, e o fluxo de água foi de 40 ml/s (ou 10 ml/s para cada aspersor).

### c. Sob Névoa Salina

Para o ensaio de corrente de fuga sob névoa salina, os isoladores foram energizados por 120 horas contínuas a uma tensão de cerca de 16 kVrms (22,72 kVpico), com pequenas variações devido a fatores externos, como variações na tensão de alimentação e redução significativa da impedância dos isoladores. A água utilizada no ensaio tinha sal comum adicionado até ser atingida uma condutividade de 1 mS/cm. Todo o teste levou 120 horas, e durante este tempo os ciclos de névoa foram aplicados durante 6 horas por dia. Durante as 18 horas restantes de cada dia, os isoladores estiveram em processo de secagem ou secos no interior das câmaras. Todos os outros aspectos do ensaio na condição de névoa salina são idênticos aos apresentados no ensaio sob névoa limpa. Um diagrama esquemático apresentando a configuração dos ensaios de corrente de fuga, realizados no interior da câmara de névoa, é apresentado na Figura 3.

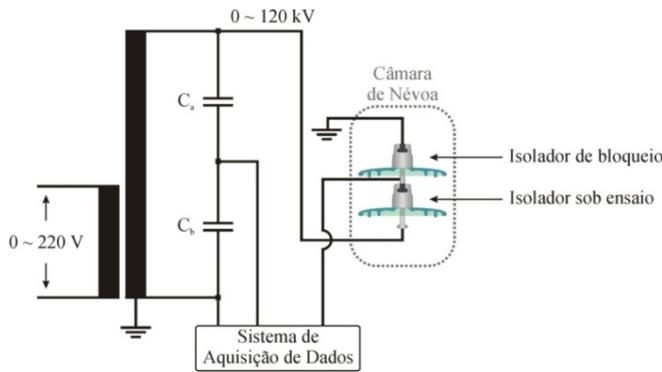


Figura 3. Diagrama esquemático dos ensaios de corrente de fuga.

### iii. Ensaios de Impulso Atmosférico

No ensaio de impulso de tensão, foi utilizado como fonte de alta tensão impulsiva o Gerador de Impulsos de Tensão (GIT) do LAT/UFCG. Foram utilizados no teste 4 estágios de 100 kV do equipamento. A medição dos impulsos foi realizada com um divisor resistivo/capacitivo com relação de 1450/1. A tensão de ensaio foi definida de acordo com as folhas de dados dos fabricantes dos isoladores (todos especificavam 110 kV, independente da polaridade do impulso), e corrigida conforme especificado na NBR 6936 [10]. Um osciloscópio digital foi também utilizado para a aquisição dos dados de tensão. Os tempos de frente e de cauda da onda seguiram recomendações desta mesma norma, o que caracteriza, para impulso atmosférico:

- Tempo de frente:  $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ ;
- Tempo de cauda:  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ;
- Valor de crista: Conforme especificado pelo fabricante (110 kV), com tolerância de 3%.

Na Figura 4 apresenta-se uma fotografia retirada durante a realização do ensaio de impulso atmosférico, onde é possível observar a montagem física do arranjo.



Figura 4. Montagem do ensaio: (a) GIT; (b) Divisor de tensão; (c) Amostra sob ensaio.

Foram aplicados três impulsos de forma e polaridade especificadas, com valor de crista igual ao da tensão suportável nominal. Segundo a norma, os requisitos de ensaio são satisfeitos se não ocorrerem descargas

disruptivas, e não são satisfeitos se ocorrer mais de uma descarga disruptiva no objeto sob ensaio. Se ocorrer no máximo uma descarga disruptiva na isolação auto recuperante, nove impulsos adicionais devem ser aplicados e os requisitos deste ensaio são satisfeitos se não ocorrer nenhuma descarga disruptiva nesses impulsos adicionais. Os requisitos deste ensaio não são satisfeitos se for observada qualquer indicação de falha na isolação não auto recuperante com os métodos de detecção indicados nas normas específicas do objeto sob ensaio em qualquer das aplicações de tensão efetuadas.

## III. RESULTADOS E ANÁLISES

### A. Amostras de Vidro Temperado

Para todos os ensaios realizados, a caracterização das amostras de vidro seguiu a nomenclatura apresentada na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Nomenclatura utilizada para as amostras de vidro.

Sigla	Significado
VNCVA1	Isolador de vidro, novo, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 1
VNCVA2	Isolador de vidro, novo, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 2
VNCVE1	Isolador de vidro, novo, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 1
VNCVE2	Isolador de vidro, novo, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 2
VNSV1	Isolador de vidro, novo, sem verniz aplicado, amostra 1
VNSV2	Isolador de vidro, novo, sem verniz aplicado, amostra 2
VUCVA1	Isolador de vidro, usado, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 1
VUCVA2	Isolador de vidro, usado, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 2
VUCVE1	Isolador de vidro, usado, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 1
VUCVE2	Isolador de vidro, usado, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 2
VUSV	Isolador de vidro, usado, sem verniz aplicado

### i. Ensaios de Corrente de Fuga na Condição a Seco

Não serão apresentados resultados numéricos do ensaio de corrente de fuga na condição a seco visto que os níveis de corrente de fuga para essa condição de umidade mantiveram-se aceitáveis, na faixa de  $500 \mu\text{A}$ , para todas as amostras de isoladores de vidro.

### ii. Ensaios de Corrente de Fuga sob Névoa Limpa

Na Figura 5 e na Figura 6 são sumarizados, na forma de gráfico de barras, os resultados de Corrente de Fuga Máxima (IMáx) e Impedância Aparente (ZA), para a condição de umidade estabelecida: antes da aplicação da névoa, durante a névoa e uma hora após a remoção da névoa. Neste ensaio, não foram utilizados isoladores de vidro usados, apenas isoladores novos.

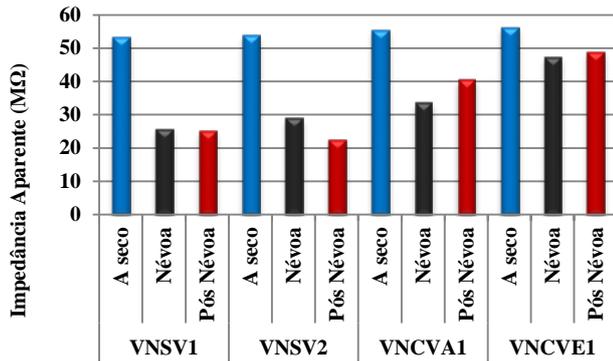


Figura 5. Resultados sumarizados de impedância aparente obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa limpa para os isoladores de vidro.

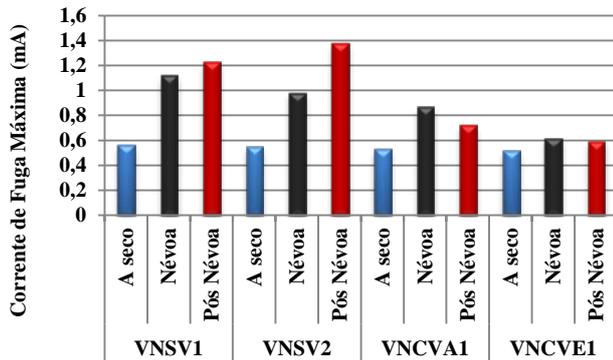


Figura 6. Resultados sumarizados de corrente de fuga máxima (mA) obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa limpa para os isoladores de vidro.

Com base nas Figuras 5 e 6, é possível perceber que na condição a seco, as amostras de isoladores de vidro novos, com verniz (VNCVA1 e VNCVE1), apresentaram corrente de fuga menor que as amostras sem verniz (VNSV1 e VNSV2). Para esta situação, o fato da amostra ter curado na estufa ou em temperatura ambiente pareceu indiferente.

A amostra VNCVA1 apresentou corrente de fuga mais elevada que a amostra VNCVE1, na condição sob névoa. Todavia, este incremento de corrente de fuga foi proporcionado principalmente por formação de descargas superficiais. A formação de tais descargas é favorecida pelo *design* não eficiente dos isoladores novos. Percebe-se que o incremento de corrente de fuga gerado pela presença da névoa foi pequeno.

Durante e após a aplicação da névoa, todas as amostras de vidro que receberam verniz tiveram corrente de fuga inferior às amostras sem verniz. Este decréscimo chegou a 57,62 %.

### iii. Ensaios de Corrente de Fuga sob Névoa Salina

Entre todos os ensaios realizados, o ensaio de corrente de fuga na condição de névoa salina foi considerado como mais representativo para avaliar o desempenho dos isoladores de vidro revestidos com o verniz nanométrico hidrofóbico (por ser mais agressivo, devido a salinidade empregada nos isoladores, bem como por ser de maior duração).

Os resultados sumarizados de Corrente de Fuga Média (IMédia) e para a variação da Impedância Aparente (ZA) durante o ensaio, para os isoladores de vidro, são

apresentados na Figura 7, na forma de gráfico de barras.

Com base na Figura 7, é possível perceber que, de maneira geral, os isoladores de vidro tem seu desempenho melhorado com o uso do verniz nanométrico, apresentando menores valores de corrente de fuga e uma menor redução da impedância aparente.

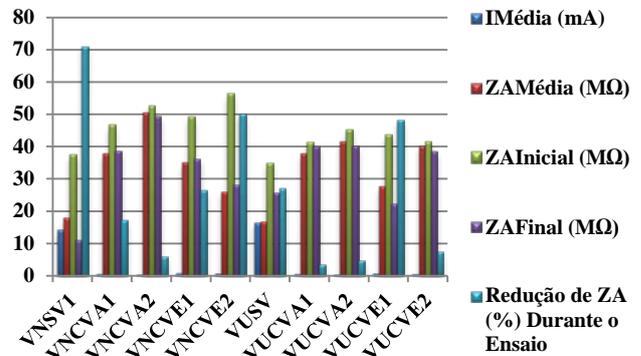
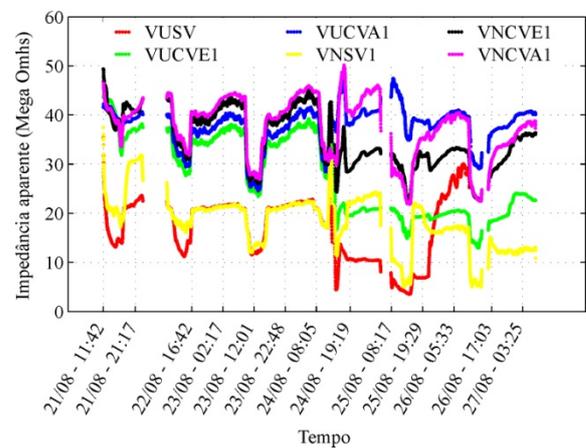
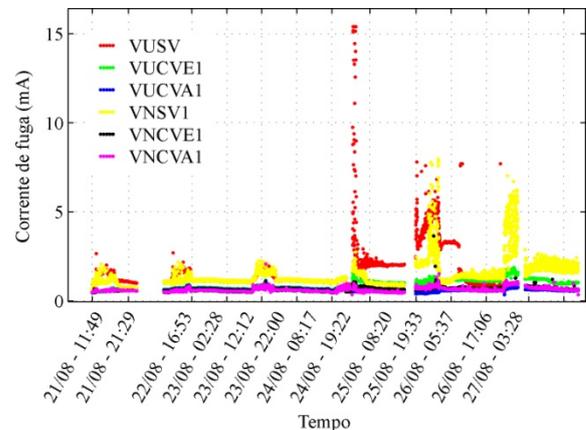


Figura 7. Resultados sumarizados para a corrente de fuga média e para a variação da impedância aparente obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa salina para os isoladores de vidro.

Na Figura 8 é apresentada a evolução da corrente de fuga e as variações de impedância aparente para as amostras de isoladores de vidro do grupo 1, durante o decorrer do ensaio de corrente de fuga sob névoa salina, apenas para fins de visualização.



(b)

Figura 8. Evolução da corrente de fuga para todas as amostras de isoladores de vidro, durante todo o ensaio de corrente de fuga sob névoa salina (formato do eixo das abscissas: DD/MM – hh:mm).

Considerando as amostras que receberam verniz, todas tiveram desempenho bastante superior ao apresentado pelas amostras sem verniz. Apenas as amostras VUCVE1 e VNCVE2 foram exceção, apresentando comportamento fora do esperado, mas ainda superior ao de uma amostra que não tivesse recebido verniz algum. Visualmente, as amostras não apresentaram nenhum tipo de avaria que justificasse tal comportamento. Por outro lado, inspeções visuais não são muito eficientes no caso, uma vez que o verniz nanométrico aplicado é incolor. Uma hipótese de mecanismo de envelhecimento pode ter sido a remoção de uma parcela do verniz, devido a uma descarga superficial mais intensa, que terminou levando à formação de um caminho preferencial de corrente de fuga, onde houve deposição de sal durante todo o ensaio. O acúmulo de sal justificaria o acréscimo da corrente de fuga com o andamento do ensaio. Este resultado evidencia a necessidade de novos testes, bem como de testes de mais longa duração, para a avaliação da durabilidade da camada aplicada de verniz sobre os isoladores. O fato dos isoladores novos apresentarem um padrão de construção diferente dos isoladores usados dificulta uma comparação mais decisiva, evidenciando também a necessidade de um maior número de testes.

As amostras que passaram por processo de secagem natural apresentaram melhor desempenho em termos de corrente de fuga e de impedância aparente do que as amostras que passaram por processo de secagem forçada.

#### iv. Ensaio de Impulso Atmosférico

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, é possível perceber que os resultados do ensaio de impulso atmosférico resumem-se a ocorrência ou não de ruptura do ar nas redondezas do isolador em teste, quando da aplicação do impulso padronizado. Os resultados sumarizados para os isoladores de vidro são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Quadro resumo com rupturas e não rupturas ocorridas para cada amostra.

Amostra	Número do Impulso												Resultado	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
VNSV1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
VNCVA1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
VNCVE1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
VUSV	R	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Aprovado
VUCVA1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
VUCVE1	N	R	N	N	N	N	N	N	N	N	N	R	-	Reprovado

Pode-se perceber que a presença do verniz não dá indícios notáveis de contribuição para a ruptura do ar no entorno das amostras, sendo este ensaio considerado como complementar ao estudo.

Considerando os 4 isoladores de vidro que receberam o verniz e foram ensaiados, apenas a amostra VUCVE1 foi reprovada. Essa mesma amostra, apresentou comportamento fora do esperado no ensaio de corrente de fuga sob névoa

salina, comentado anteriormente. Não foi observada nenhuma avaria na amostra, por inspeção visual, todavia, não se pode afirmar que a reprovação no ensaio de impulso atmosférico seja devido à presença do verniz, uma vez que se trata de uma amostra usada. Isto fica ainda mais evidente se considerarmos a amostra VUSV, do mesmo fabricante e também usada, que sofreu uma ruptura durante o ensaio.

#### B. Amostras de Porcelana Vitrificada

Para todos os ensaios realizados, a caracterização das amostras de porcelana seguiu a nomenclatura apresentada na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4. Nomenclatura utilizada para as amostras de porcelana.

Sigla	Significado
PNCVA1	Isolador de porcelana, novo, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 1
PNCVA2	Isolador de porcelana, novo, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 2
PNCVE1	Isolador de porcelana, novo, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 1
PNCVE2	Isolador de porcelana, novo, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 2
PNSV	Isolador de porcelana, novo, sem verniz aplicado
PUCVA1	Isolador de porcelana, usado, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 1
PUCVA2	Isolador de porcelana, usado, com verniz aplicado, com secagem ambiente, amostra 2
PUCVE1	Isolador de porcelana, usado, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 1
PUCVE2	Isolador de porcelana, usado, com verniz aplicado, com secagem forçada, amostra 2
PUSV	Isolador de porcelana, usado, sem verniz aplicado

#### i. Ensaio de Corrente de Fuga na Condição a Seco

Semelhante aos isoladores de vidro, não serão apresentados resultados numéricos do ensaio de corrente de fuga na condição a seco visto que os níveis de corrente de fuga para essa condição de umidade mantiveram-se aceitáveis, na faixa de 500  $\mu$ A, para todas as amostras de isoladores de porcelana.

#### ii. Ensaio de Corrente de Fuga sob Névoa Limpa

Na Figura 9 e na Figura 10 são sumarizados, na forma de gráfico de barras, os resultados de Corrente de Fuga Máxima (IM<sub>ax</sub>) e Impedância Aparente (ZA) para a condição de umidade estabelecida: antes da aplicação da névoa, durante a névoa e uma hora após a remoção da névoa.

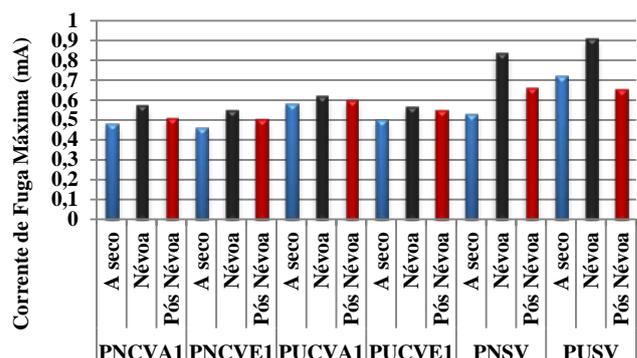


Figura 9. Resultados sumarizados de corrente de fuga máxima obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa limpa para os isoladores de porcelana.

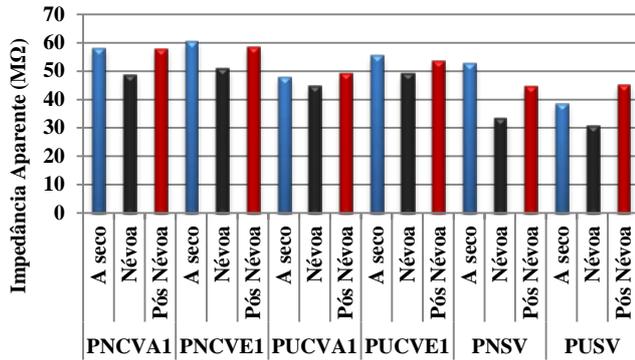


Figura 10. Resultados sumarizados de impedância aparente obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa limpa para os isoladores de porcelana.

Durante e após a aplicação da névoa, todas as amostras de porcelana que receberam verniz tiveram corrente de fuga inferior às amostras sem verniz. Este decréscimo chegou a 60,60 %.

iii. *Ensaio de Corrente de Fuga sob Névoa Salina*

Da mesma forma, entre todos os ensaios realizados, o ensaio de corrente de fuga na condição de névoa salina foi considerado como mais representativo para avaliar o desempenho dos isoladores de porcelana revestidos com o verniz nanométrico hidrofóbico. Os resultados sumarizados para a Corrente de Fuga Média (IMédia) e para a variação da Impedância Aparente (ZA) durante o ensaio, para os isoladores de porcelana, são apresentados na Figura 11, na forma de gráfico de barras.

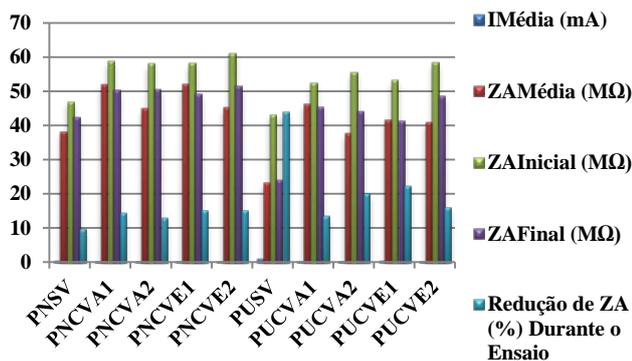


Figura 11. Resultados sumarizados para a corrente de fuga média e para a variação da impedância aparente obtidos dos ensaios de corrente de fuga sob névoa salina para os isoladores de porcelana.

Com base na Figura 11, é possível perceber que, de maneira geral, os isoladores de porcelana também têm seu desempenho melhorado com o uso do verniz nanométrico, apresentando menores correntes de fuga e uma menor redução da impedância.

Considerando as amostras que receberam verniz, todas tiveram desempenho superior ao apresentado pelas amostras sem verniz. Aqui cabe-se salientar que a amostra PNSV, que apresentou menor redução da impedância quando comparada as outras amostras novas, apresentou também a

maior corrente de fuga média entre todas as amostras novas, e que as amostras novas com verniz aplicado apresentaram comportamento, em números, bastante semelhante. Quando comparada a amostra PUSV, ambas apresentaram impedância inicial mais baixa do que as amostras sem verniz aplicado, no entanto a amostra PUSV teve diminuição significativa desta impedância ao fim do ensaio. Este comportamento fora do esperado gera dúvidas que evidenciam a necessidade de novos testes, bem como de testes de mais longa duração, para a avaliação do desempenho e da durabilidade da camada aplicada de verniz sobre os isoladores.

As amostras que passaram por processo de secagem natural apresentaram desempenho bastante semelhante em termos de corrente de fuga e de impedância aparente às amostras que passaram por processo de secagem forçada.

i. *Ensaio de Impulso Atmosférico*

Da mesma forma e conforme descrito na metodologia deste trabalho, é possível perceber que os resultados do ensaio de impulso atmosférico resumem-se a ocorrência ou não de ruptura do ar nas redondezas do isolador em teste, quando da aplicação do impulso padronizado. Os resultados sumarizados para os isoladores de porcelana são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Quadro resumo com rupturas e não rupturas ocorridas para cada amostra.

Amostra	Número do Impulso												Resultado	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
PNSV	R	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Aprovado
PNCVA1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
PNCVE1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
PUSV	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
PUCVA1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado
PUCVE1	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aprovado

Com base na Tabela 5, é possível perceber que considerando os 4 isoladores de porcelana que receberam o verniz e foram ensaiados, nenhuma das amostras foi reprovada. Apenas a amostra PNSV sofreu uma ruptura, que não se repetiu no decorrer do ensaio.

Como relatado anteriormente, a presença do verniz não dá indícios notáveis de contribuição para a ruptura do ar no entorno das amostras, sendo este ensaio considerado como complementar ao estudo.

IV. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo realizar uma avaliação do desempenho elétrico, de isoladores de suspensão revestidos por um verniz de característica hidrofóbica, desenvolvido com tecnologia nanométrica, com o objetivo de minimizar a corrente de fuga desses isoladores, elevando a impedância do conjunto e melhorando seu desempenho. A avaliação foi especialmente focada na medição de corrente de fuga de isoladores de vidro e de porcelana, do tipo disco, largamente empregados no sistema elétrico, nas condições a seco, sob névoa limpa e névoa salina. Um ensaio complementar de impulso atmosférico foi ainda realizado objetivando-se

buscar alguma particularidade nas amostras.

Com os resultados dos ensaios de corrente de fuga nos isoladores de vidro temperado e de porcelana vitrificada, com e sem aplicação do verniz nanotecnológico hidrofóbico, nas condições a seco, sob névoa limpa e sob névoa salina (mais severo), ficou comprovado que a maioria dos isoladores revestidos por tal verniz teve seu desempenho elétrico melhorado, apresentando menores correntes de fuga e uma menor redução da impedância aparente quando comparados às amostras sem verniz aplicado.

Quanto ao procedimento de secagem, também analisado nos ensaios elétricos, de forma geral, todas as amostras que passaram por processo de secagem natural apresentaram desempenho semelhante em termos de corrente de fuga e de impedância aparente às amostras que passaram por processo de secagem forçada. No entanto, ainda não se justifica o uso do processo de secagem forçada como procedimento padrão de aplicação do verniz.

Novos testes devem ser então realizados visando otimizar os procedimentos de pintura e secagem do verniz, garantindo assim melhora no desempenho elétrico dos isoladores. Um possível aperfeiçoamento do verniz nanométrico desenvolvido também pode ser idealizado.

## V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a contribuição de todos os engenheiros e técnicos envolvidos, integrantes das empresas/instituições: Nanum Nanotecnologia S.A., Itapebi Geração de Energia S.A., B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos LTDA, LAT/UFCEG e Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste, pelo suporte técnico e/ou científico fornecido ao trabalho.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. V. Ferreira; A. D. Germano; E. G. da Costa; J. M. G. Angelini; F. E. Nallim; P. Mendonça, "Naturally Aged Polymeric Insulators: Washing and its Consequences," in *Modern Electric Power Systems 2010*, Wroclaw, Polónia.
- [2] A. M. Abreu, A. R. Saavedra, J. A. Araújo, L. B. Murça, R. R. Fragelli, S. O. Frontin, V. B. Rêgo, *Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão*, 1ª Edição. Brasília: Wiley, Teixeira Gráfica e Editora, pp. 224, 230-231.
- [3] T. V. Ferreira; A. D. Germano; P.B. Vilar; E. G. da Costa; J.M.B. Bezerra, "Diagnóstico de Isoladores Baseado na Emissão de Ruídos Ultra-Sônicos," in *Décimo Terceiro Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*, 2009, Puerto Iguazú, Argentina.
- [4] L. C. da Silva, "Recuperação dos Isoladores de Vidro das Linhas de Transmissão Condenados por Corrosão e Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes," *Dissertação de Mestrado*, Dept. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- [5] C. Sumereder and M. Muhr, "Aplicações de Nanotecnologia na Engenharia Elétrica de Potência," *Revista Eletricidade Moderna*, nº 411, pp. 66-75, Junho 2008.
- [6] E.A. Cherney and R. Hackam, "Performance of RTV silicone rubber insulator coatings," in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1990, Toronto, Canadá.
- [7] S.H. Jayaram and E.A. Cherney, "Fabrication and characterization of electrospun composite materials," in *IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2012, Bangalore, India.
- [8] L. H. Meyer, S. H. L. Cabral, E. Araújo, G. Cardoso, N. Liesenfeld, "Use of Nano-Silica in Silicone Rubber for Ceramic Insulators Coatings in Coastal Areas," in *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, Toronto, Canadá.
- [9] NBR 10621 *Isoladores – Determinação das Características de Suportabilidade Sob Poluição Artificial*, ABNT, Fev. 1989.
- NBR 6936 *Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta Tensão*, ABNT, Abr. 1992.