



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GTM/08

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**DESENVOLVIMENTO DE ESPAÇADOR POLIMÉRICO, COM NOVO MATERIAL E NOVO DESIGN, PARA USO
NAS CLASSES DE TENSÃO DE 15 kV E 35 kV**

**Silva, G. C. (*)
INSTITUTOS LACTEC**

**Munaro, M.
INSTITUTOS LACTEC**

**Swinka Filho, V.
INSTITUTOS LACTEC**

**Ribeiro Junior, S.
INSTITUTOS LACTEC**

**Richart, F. S.
INSTITUTOS LACTEC**

**Santos, S. L. F.
INSTITUTOS LACTEC**

**Dadam, A. P.
CELESC**

**D'Aquino F. M.
CELESC**

RESUMO

Redes protegidas são usadas em regiões com nível de poluição baixo (áreas rurais e urbanas). As normas brasileiras não recomendam o uso desta tecnologia em regiões com nível de poluição médio ou pesado (industriais e litorâneas), devido ao processo de envelhecimento ao qual os materiais ficam submetidos. Neste artigo é apresentado um protótipo de espaçador polimérico, com novo material e design, visando viabilizar a aplicação destas redes em regiões poluídas. Estão apresentados resultados dos ensaios realizados no protótipo. Os ensaios realizados foram resistência à tração, compatibilidade dielétrica e tensão suportável. Os protótipos desenvolvidos apresentaram bom desempenho nos testes realizados.

PALAVRAS-CHAVE

Acessórios poliméricos, espaçador polimérico, rede protegida, polietileno, protótipo

1.0 - INTRODUÇÃO

O padrão de rede aérea de distribuição normalmente utilizado no Brasil emprega condutores nus apoiados sobre isoladores fixados em cruzetas. Atualmente este tipo de rede apresenta uma saturação tecnológica, tanto com relação ao nível de confiabilidade exigido pela sociedade quanto em relação à preservação do meio ambiente. Vale citar aqui a elevada taxa de falhas, o baixo nível de segurança e a extensa área de poda de árvores (1)-(3). Como consequência destes fatores as concessionárias têm feito um enorme esforço para o desenvolvimento e implantação de novas tecnologias de redes de distribuição a custos compatíveis com a realidade nacional.

No Brasil, uma das alternativas que vem sendo aplicada desde a década de 90 é a utilização de redes protegidas, particularmente em regiões com baixo nível de poluição, tais como áreas rurais e urbanas. Esta tecnologia surgiu na década de 50, nos Estados Unidos e foi desenvolvida para que a rede tivesse uma compactação próxima a encontrada nas redes subterrâneas, possibilitando a utilização de vários circuitos na mesma estrutura e aumentando a confiabilidade e segurança do sistema aéreo de distribuição. Uma rede protegida é geralmente composta por três cabos cobertos com uma camada de material polimérico, apoiados em espaçadores poliméricos e sustentados por um cabo mensageiro de aço. Os materiais poliméricos utilizados na cobertura dos cabos são o polietileno reticulado (XLPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE), podendo ser encontrados cabos com dupla camada de isolamento [camada interna em polietileno de baixa densidade (LDPE) ou XLPE e externa em HDPE]. Além dos espaçadores, geralmente em HDPE, outros elementos envolvidos na configuração de uma rede protegida são os isoladores e os acessórios de amarração. Entre os isoladores usados temos o isolador tipo pino polimérico (HDPE), o isolador bastão

composto (invólucro em borracha de silicone) e, em algumas situações, o isolador tipo pilar (porcelana ou híbrido) (2)-(5). A Figura 1 apresenta uma rede protegida instalada em área urbana.



FIGURA 1 - Rede aérea protegida instalada em área urbana.

Por não possuírem blindagem metálica e apresentarem campo elétrico não-nulo em sua superfície, os cabos utilizados nas redes protegidas não podem ser considerados isolados, apenas protegidos ou cobertos. A forma construtiva destes cabos permite que os mesmos fiquem mais próximos uns dos outros, bem como de galhos de árvores, sem risco de curto-circuito, propiciando assim a diminuição das interrupções do fornecimento de energia elétrica, com conseqüente melhoria da qualidade do fornecimento. Além disto, proporciona a diminuição da área de poda e melhoria estética e visual das cidades. Outros benefícios do uso de redes aéreas protegidas são: redução de custos operacionais devido a menor taxa de falhas, melhoria na segurança pessoal, menor duração e frequência dos desligamentos, facilidade de instalação e operação e possibilidade de instalação de mais que um circuito na mesma estrutura (1)-(7).

Apesar das vantagens apresentadas, as normas brasileiras vigentes não recomendam a instalação de redes protegidas em regiões com nível de poluição médio e pesado, tais como áreas industriais (por exemplo, fábricas de cimento) e áreas litorâneas, devido ao processo de envelhecimento acelerado dos equipamentos e acessórios. Em condições reais de operação as redes protegidas ficam submetidas a diversos estresses: elétrico, térmico, mecânico e ambiental. Cada um destes estresses possui um subconjunto de variáveis. Assim, para o campo elétrico têm-se como variáveis o campo elétrico aplicado e a frequência de operação. Para o estresse térmico as variáveis são temperatura de operação e ciclos térmicos. Com relação ao estresse mecânico tem-se o dobramento, a tração e a compressão e para o estresse ambiental as variáveis incluem composição dos gases do ambiente, presença de poluentes, umidade e radiação ultravioleta. Estes estresses, agindo de forma individual ou combinada, são os responsáveis pela indução do envelhecimento nos materiais poliméricos utilizados na isolação de equipamentos e acessórios de redes protegidas. Os principais mecanismos de envelhecimento que ocorrem nestas redes são: o trilhamento elétrico, a erosão e a fotodegradação dos materiais poliméricos (8)-(13).

O trilhamento elétrico é um mecanismo de envelhecimento superficial que induz a formação de caminhos parcialmente condutivos devido à ação de descargas elétricas na superfície da isolação. Este varia com a intensidade do campo elétrico, magnitude da corrente de fuga e estado das descargas induzidas, os quais por sua vez dependem da umidade superficial e do nível de poluição. Em áreas com nível de poluição médio e pesado diferentes contaminantes podem induzir a ocorrência de trilhamento, tais como sal, poeira, umidade e agentes químicos presentes na atmosfera. Uma vez que o trilhamento ocorre a isolação elétrica superficial é completamente perdida, sem possibilidade de recuperação. A erosão é um processo de degradação progressiva da isolação, que inclui perda localizada e gradual de massa do dielétrico, originada a partir da ação de uma descarga elétrica. Ambos fenômenos ocorrem principalmente em pontos de contato do cabo com objetos aterrados (por exemplo, galhos de árvores) e na interface cabo-espaçador ou cabo-isolador (8)-(9). Um estudo recente baseado em simulação de campo elétrico corrobora esta informação e ainda sugere que a resistência ao trilhamento elétrico deve ser melhorada tanto quanto possível para aumentar o tempo de vida dos materiais aplicados em redes protegidas (10).

As Figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, a ocorrência de trilhamento elétrico em um cabo coberto e a ocorrência de erosão em um isolador bastão composto.



FIGURA 2 - Trilhamento elétrico em cabo coberto.



FIGURA 3 - Erosão em um isolador bastão composto.

A radiação ultravioleta é um fator de envelhecimento que pode levar à fotodegradação e reduzir a resistência ao trilhamento elétrico de materiais poliméricos (8), (14). Efeitos típicos dos processos de fotodegradação são o entrecruzamento e/ou cisão de cadeias dos polímeros. É geralmente aceito que os processos de fotodegradação têm início na superfície e apresentam um gradiente de degradação ao longo do volume do material (14).

Este artigo apresenta uma parte dos resultados obtidos no PD 5697-2310/2011 “Desenvolvimento de nova configuração de rede protegida para aplicação em regiões com elevada agressividade ambiental”, o qual está sendo desenvolvido pelas empresas CELESC (Proponente) e Institutos LACTEC (Executora). O suporte financeiro ao projeto é dado pela CELESC Distribuição S.A. por meio do Programa de P&D da ANEEL. Entre os produtos previstos no projeto estão o desenvolvimento de protótipos de cabo coberto, espaçador polimérico e isolador polimérico. Neste trabalho estão apresentados somente os resultados do desenvolvimento de um protótipo de espaçador polimérico, com novo material e novo design, que tem como objetivo viabilizar o uso de redes protegidas em regiões com nível de poluição médio e pesado. São apresentados os resultados dos ensaios realizados no produto final após as fases de desenvolvimento do material e do produto, entre os quais os ensaios de resistência à tração de curta e longa duração, compatibilidade dielétrica, tensão suportável a frequência industrial e tensão suportável de impulso atmosférico.

2.0 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para desenvolvimento do protótipo do espaçador polimérico, com novo material e novo design, foram realizadas as seguintes atividades: a) desenvolvimento de formulações de novos materiais poliméricos para uso em regiões com nível de poluição médio e pesado; b) desenvolvimento de projeto conceitual e molde do espaçador e c) validação do protótipo com testes laboratoriais.

Anda, para tal desenvolvimento foram tomadas algumas premissas, entre as quais: a) o novo material deve ter elevada resistência ao trilhamento elétrico e à radiação ultravioleta; b) o novo design deve ter sua dimensão adequada para operar em um ambiente com nível de poluição médio e pesado; c) os custos do produto final devem ser compatíveis com os produtos comerciais existentes no mercado; e, d) a ênfase do desenvolvimento deve ser direcionada para atendimento à classe de tensão de 15 kV. Estudos anteriores desenvolvidos pelos autores já indicavam que para o espaçador polimérico ser usado com segurança em ambientes poluídos, tais como próximo de indústrias ou na orla marítima, são necessários o aprimoramento do material do composto e o aumento da distância de escoamento.

Na etapa de desenvolvimento de novos materiais foram preparadas oito diferentes formulações de compostos poliméricos, com matriz em polietileno de alta densidade e diferentes aditivos. Estas oito formulações foram caracterizadas e tiveram seu desempenho avaliado em laboratório por meio de ensaios físico-químicos, mecânicos

e elétricos. Destas formulações foram selecionadas as duas que tiveram melhor desempenho para confecção dos protótipos de espaçador. Ambas formulações apresentaram boas propriedades mecânicas, elevada resistência à radiação ultravioleta e elevada resistência ao trilhamento elétrico.

Paralelamente ao desenvolvimento do novo material foi desenvolvido o projeto conceitual do espaçador. Foram elaborados diferentes projetos, os quais foram submetidos à simulação computacional para avaliação do comportamento do campo elétrico em função das dimensões adotadas. Após definido o novo design partiu-se para a fase de confecção do molde e injeção dos protótipos dos espaçadores. Foram confeccionados 20 protótipos com duas formulações diferentes, os quais são denominados AZ e AM. A Figura 4 ilustra o projeto conceitual e um protótipo de espaçador polimérico com novo material e novo design.

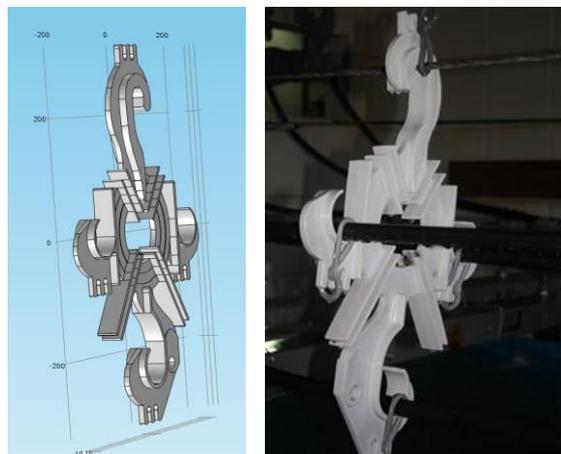


FIGURA 4 – Espaçador polimérico com novo material e novo design – à esquerda: projeto conceitual e à direita: protótipo.

Após a confecção dos protótipos foram elencados alguns testes laboratoriais, com base na norma ABNT NBR 16094 (15), para validação do produto final. Entre os ensaios selecionados estão:

- Resistência à tração de curta duração;
- Resistência à tração de longa duração;
- Compatibilidade dielétrica;
- Tensão suportável à frequência industrial sob chuva;
- Tensão suportável de impulso atmosférico a seco.

2.1 - Resistência à tração de curta duração

O ensaio de resistência à tração de curta duração nos protótipos dos espaçadores foi realizado com base na norma ABNT NBR 16094 (15). Para atendimento da referida norma o espaçador deve suportar, no mínimo, 600 daN. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - Força máxima suportada no ensaio de tração de curta duração.

Espaçador	Força máxima (daN)
AZ	601
AM	621

2.2 - Resistência à tração de longa duração

O ensaio de resistência à tração de longa duração nos protótipos dos espaçadores foi realizado com base na norma ABNT NBR 16094 (15). Este teve duração de 216 h. Para atendimento da referida norma o espaçador não deve apresentar variação superior a 15% nas distâncias entre fase e fase e fase e mensageiro. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - Variação percentual após ensaio de tração de longa duração.

Espaçador	Variação percentual máxima (%)
AZ	6,6
AM	5,0

2.3 - Compatibilidade dielétrica

O ensaio de compatibilidade dielétrica nos protótipos dos espaçadores foi realizado com base na norma ABNT NBR 16094 (15). Conforme já citado uma das premissas propostas no início do desenvolvimento era que o protótipo deveria atender à classe de tensão de 15 kV. Todavia, o ensaio de compatibilidade dielétrica foi montado para validar o espaçador polimérico para classe de tensão de 35 kV. Assim, caso aprovado para uso na classe de tensão de 35 kV o mesmo pode ser utilizado de forma segura na classe de tensão de 15 kV. O ensaio, com duração de 30 dias, foi realizado com tensão aplicada de 40 kV fase-fase e condutividade da névoa de 750 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$.

O arranjo experimental utilizado está apresentado na Figura 4 e consistiu de:

- Montagem em conjunto trifásico;
- Protótipo de cabo coberto desenvolvido em parceria com fabricante A;
- Quatro protótipos de espaçadores, sendo dois AZ e dois AM.

Foi verificado que, após término do ensaio, nenhum dos espaçadores apresentou sinais de trilhamento elétrico ou erosão, assim como o cabo coberto. Assim, além de validar a aplicação para classe de tensão de 15 kV, o resultado obtido indica que os espaçadores têm potencial para aplicação na classe de tensão de 35 kV.



FIGURA 4 - Arranjo experimental do ensaio de compatibilidade dielétrica

2.4 - Tensão suportável à frequência industrial sob chuva

O ensaio de tensão suportável à frequência industrial sob chuva nos protótipos dos espaçadores foi realizado de acordo com procedimento estabelecido nas normas ABNT NBR 16094 (15) e ABNT NBR 6936 (16). Os equipamentos utilizados foram uma fonte de tensão AC, marca Biddle, tipo 17000 e um equipamento de chuva artificial, marca MWB, tipo R200. O ensaio foi realizado em três configurações diferentes, representadas de forma esquemática na Tabela 3 e na Figura 5. Foi aplicada tensão de 50 kV, durante 1 minuto. Tal tensão foi escolhida visando qualificar o espaçador para atendimento da classe de tensão de 35 kV. O ensaio foi realizado estando o espaçador submetido a uma chuva artificial com parâmetros normalizados. O espaçador polimérico é considerado aprovado se não ocorrer descarga disruptiva ou perfuração durante o ensaio.

TABELA 3 - Configurações do ensaio de tensão suportável à frequência industrial sob chuva.

Configuração	Energizado	Aterrado	Tensão de ensaio (kV) / duração (min)
1	Cabo A	Mensageiro, Cabo B e Cabo C	50 kV / 1 min
2	Cabo B	Mensageiro, Cabo A e Cabo C	50 kV / 1 min
3	Cabo C	Mensageiro, Cabo A e Cabo B	50 kV / 1 min

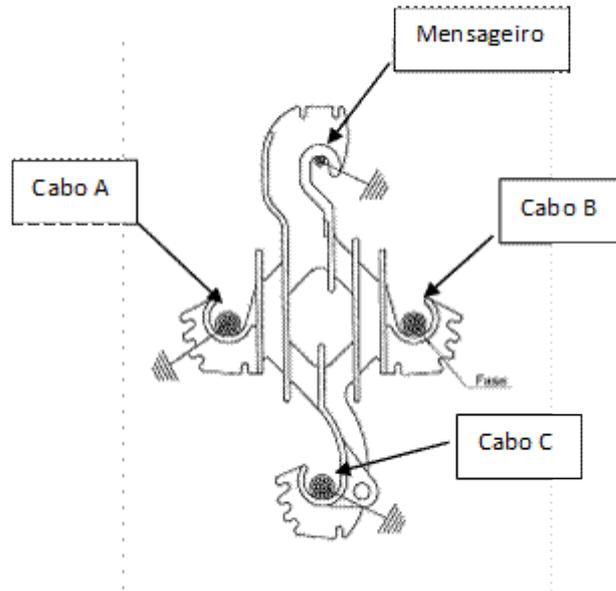


FIGURA 5 - Representação esquemática da identificação da posição dos cabos e mensageiro.

Os dois protótipos de espaçadores (AZ e AM) suportaram a aplicação da tensão de ensaio durante o tempo especificado, em todas as configurações, sem a ocorrência de descargas disruptivas ou quaisquer anormalidades.

2.5 - Tensão suportável de impulso atmosférico a seco

O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico a seco nos protótipos dos espaçadores foi realizado de acordo com o procedimento estabelecido nas normas ABNT NBR 16094 [15] e ABNT NBR 6936 (16). O equipamento utilizado foi um sistema de Impulso de Tensão, marca Haefely, tipo V3200/160. O ensaio foi realizado em três configurações diferentes, ilustradas na Tabela 4 e na Figura 5. Foi aplicado impulso atmosférico normalizado de 150 kV, sendo 15 aplicações com polaridade positiva e 15 aplicações com polaridade negativa. Tal tensão foi escolhida visando qualificar o espaçador o espaçador para atendimento da classe de tensão de 35 kV.

TABELA 4 - Configurações do ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico a seco.

Configuração	Energizado	Aterrado	Tensão de ensaio (kV)
1	Cabo A	Mensageiro, Cabo B e Cabo C	150
2	Cabo B	Mensageiro, Cabo A e Cabo C	150
3	Cabo C	Mensageiro, Cabo A e Cabo B	150

Os dois protótipos de espaçadores (AZ e AM) suportaram a aplicação da tensão de ensaio em todas as configurações, sem que ocorressem descargas disruptivas ou quaisquer anormalidades.

3.0 - CONCLUSÕES

Visando o desenvolvimento de uma nova configuração de rede protegida para uso em regiões de elevada agressividade ambiental foi desenvolvido um protótipo de espaçador polimérico, com novo material e novo design.

Neste artigo foram apresentados os resultados obtidos na etapa de validação em laboratório de dois protótipos de espaçadores poliméricos, confeccionados com duas formulações diferentes de um novo material. Os ensaios mecânicos realizados mostraram que os protótipos desenvolvidos, denominados AZ e AM, têm propriedades adequadas para aplicação no setor elétrico. Nos ensaios elétricos os protótipos desenvolvidos apresentaram desempenho satisfatório, tanto para uso na classe de tensão de 15 kV, quanto para uso na classe de 35 kV.

Apesar dos excelentes resultados obtidos até o momento são ainda necessários estudos de aplicação em campo, preferencialmente em regiões com nível de poluição médio e pesado. Tais estudos estão previstos em uma nova etapa do projeto.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ROCHA, R. C., BERREDO, R. C., BERNIS, R. A. O., GOMES, E. M., NISHIMURA, F., CICARELLI, L. D., SOARES, M. R. New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems. *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, n. 3, p. 57, 2002.
- (2) DOI, H., MIYUACHI, H., MATSUMOTO, M. T. Cabos cobertos com XLPE para linhas aéreas. *Mundo Elétrico*, p. 90-93, 1987.
- (3) NISHIMURA, F., CICARELLI, L. D., MARTINS, J. P. Rede aérea isolada e protegida de média tensão. *Eletricidade Moderna*, n. 241, p. 68-73, 1994.
- (4) SOARES, M. R. Novo padrão da CEMIG eleva níveis de confiabilidade. *Eletricidade Moderna*, n. 291, p. 50-63, 1998.
- (5) NISHIMURA, F., CICARELLI, L. D., COELHO, M., TRAGER, B., SOARES, M.R. Covered comparative testing: HDPE & XLPE evaluation. *Proc. Transm. Distribution Conf.*, v. 2, p. 807-812, 2001.
- (6) SOTILLE, C. A., PINHEIRO, W. Aplicação de cabos protegidos. *Revista Electron*, p. 14-22, 1989.
- (7) SILVA, G. C., PIAZZA, F., MUNARO, M. Field behavior on polymer-covered overhead conductors submitted to natural aging on diverse weather and geographic conditions in Brazil. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 24, n. 3, p. 1651-1656, 2009.
- (8) YOSHIMURA, N., KUMAGAI, S., DU, B. Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials. *IEEE El. Ins. Magazine*, v. 13, n. 5, p. 8-19, 2009.
- (9) LI, J. Y., SUN, C. X., SEBO, S. A. Humidity and contamination severity impact on the leakage currents of porcelain insulators. *IET Gen. Transm. Distribution*, v. 5, n. 1, p. 19-28, 2011.
- (10) VÁZQUEZ, I. R., CORTÉS, F. P. E. Electric-field analysis of spacer cable systems for compact overhead distribution lines. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 27, n. 4, p. 2312-2317, 2012.
- (11) CORTÉS, F. P. E., VÁZQUEZ, I. R., GÓMEZ, P., HEREDIA, V. A. Performance of a Spacer Cable System Under Polluted Conditions. *IEEE El. Ins. Magazine*, v. 30, n. 6, p.13-19.
- (12) CORTÉS, F. P. E., VÁZQUEZ, I. R., GÓMEZ, P. Electrical Field Analysis of Spacer Cable Systems under Polluted Conditions. *IEEE El. Ins. Conference*, p. 231-234, 2014.
- (13) NÓBREGA, A. M., MARTINEZ, M. L. B., DE QUEIROZ A. A. A. Investigation and Analysis of Electrical Aging of XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors Manufactured in Brazil. *IEEE Trans. on Dielect. and El. Insulation*, v. 20, n. 2, p. 628-640, 2013.
- (14) RABEK, J. F. *Photodegradation of Polymers – Physical Characteristics and Applications*. Berlin-Germany: Springer-Verlag, 1996.
- (15) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Acessórios poliméricos para redes aéreas de distribuição de energia elétrica – Especificação - NBR 16094, Brasil.
- (16) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - ABNT NBR 6936, Brasil.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Guilherme Cunha da Silva nasceu em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, em agosto de 1973. Possui graduação (1997) em Engenharia Elétrica e mestrado (2001) e doutorado (2005) em Ciência e Engenharia de Materiais. Atualmente é pesquisador sênior no Departamento de Eletricidade e Materiais (DPEM) dos Institutos Lactec. Tem desenvolvido projetos e estudos nos seguintes tópicos: materiais dielétricos (novos materiais e envelhecimento/ degradação), equipamentos e acessórios utilizados em redes protegidas e subterrâneas (cabos, isoladores e afins) e métodos de qualificação, monitoramento e diagnóstico de materiais dielétricos.