

Análise Computacional entre Espaçadores de Linhas Compactas em Ambientes Poluídos

Bezerra, J.M.B., Xavier, J.A.R., Lopes, D.S.,
Anjos Júnior, S.H., Silva, S.H.M.
Universidade Federal de Pernambuco,
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n,
CEP 50740-530, Recife, Brasil.

Silva Júnior, D.F.
Eletrobrás Distribuição Alagoas.
Gruta de Lourdes,
CEP 57057-900, Maceió, Brasil.

Resumo—Este trabalho apresenta um estudo computacional comparativo entre espaçadores losangular, acessório bastante utilizado em linhas compactas. Foi implementado modelo no software AutoCAD, posteriormente transferido para o ambiente de simulação COMSOL Multiphysics. No estudo evidenciou-se a relação entre grandezas elétricas e o acúmulo de poluição sobre a peça analisada, foi observado que quanto maior o nível de poluição mais estresse elétrico é imposto ao espaçador, a distribuição de tensão se torna maior em diversos pontos, podendo levar a falha de isolamento. A geometria do espaçador também foi explorada, através da implementação do modelo dinâmico. Visualizou-se a importância da geometria para aumentar a suportabilidade elétrica do espaçador e assim aliviar estresses provenientes do acúmulo de poluentes.

I. INTRODUÇÃO

As redes compactas surgiram como alternativa para distribuição de energia de maneira mais econômica, sendo que esta possuiria uma compactação próxima as redes subterrâneas, porém com um menor custo de implementação. Estas redes podem acomodar até mesmo quatro circuitos numa mesma posteação, aumentando consideravelmente o transporte de energia.

Com o surgimento deste novo tipo de sistema, foi necessário um dispositivo que isolasse as fases entre si, assim surgiu o espaçador losangular. A geometria dos espaçadores tem efeito na distribuição de campo e potencial elétricos, a peça é concebida de maneira que o campo fique o mais uniforme possível, o potencial não ultrapasse valores críticos e que haja uma diminuição no acúmulo de poluentes e das possíveis correntes de fuga que possam surgir.

Durante sua operação, uma linha compacta sofre ação de diversos tipos de estresses, tanto de natureza mecânica como de natureza elétrica, pode levar o material isolante à perda dos requisitos mínimos de suportabilidade para continuidade da operação normal do sistema. Um dos componentes que apresenta alto índice de falhas em um sistema de potência é o acessório isolador, e por isso, é de grande importância o monitoramento das unidades isolantes.[1]

Este artigo registra o resultado de simulações de modelos no intuito de observar o comportamento da distribuição de tensão elétrica e do campo elétrico em três tipos diferentes de espaçador losangular, submetido à diferentes níveis de

poluição, evidenciando o comportamento dessas grandezas em cada acessório e realizando uma análise comparativa.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se três diferentes tipos de espaçador, os quais chamaremos de Espaçador X, Espaçador Y e Espaçador Z. As análises para determinação da distribuição de potencial, apresentadas neste artigo, foram realizadas através do método dos elementos finitos (MEF), tendo sido utilizado o pacote de eletrostática do software COMSOL Multiphysics.

Foi implementado, utilizando o software Matlab, um modelo dinâmico proposto por Rizk[2] e Sundararajan[3], com as contribuições de Bezerra [4] para determinação da tensão de descarga devido às características da poluição depositada.

A. Análise da Distribuição de Potencial.

O modelo implementado foi concebido originalmente para aplicação em isoladores[5], porém diante da natureza dielétrica semelhante entre os acessórios espera-se coerência entre os resultados obtidos neste estudo e os apresentados na Figura 1.

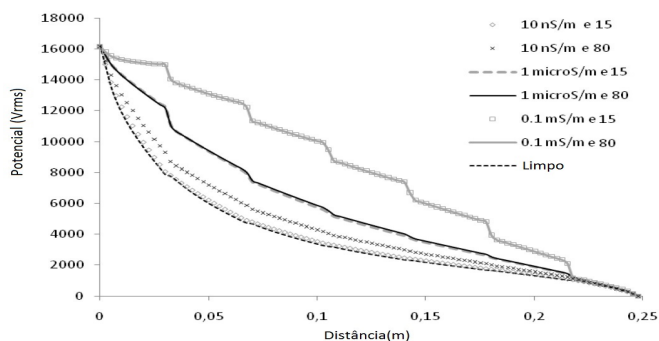


Figura 1. Distribuição de Potencial em Cadeia de Isoladores Poliméricos. [5]

Tendo em vista que a camada de poluição é consideravelmente fina, a corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento podem ser consideradas uniformes ao longo de sua espessura. Neste caso, a aproximação desta camada por uma superfície condutiva pode ser realizada. Baseado nessas premissas e em outros autores [5], a presença da poluição pode ser modelada como uma condição de contorno, entre a superfície do espaçador e do ar, que leva à seguinte equação:

$$d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V + j\omega\rho_s = 0 \quad (1)$$

Onde:

- $d(m)$ - Espessura da camada de poluição;
- $\sigma_v(S/m)$ - condutividade da poluição;
- $\omega(rad/s)$ - frequência de operação da rede;
- $\epsilon(F/m)$ - permissividade absoluta da poluição;
- $\rho_s(C/m^2)$ - densidade superficial de carga;
- $V(V)$ - potencial elétrico.

Pode ser assumido que o valor da densidade superficial de carga ao longo do dielétrico é zero, resultando assim na seguinte equação diferencial parcial [6]:

$$d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

Através do software AutoCAD, foi desenvolvido o modelo do espaçador utilizado no estudo, em seguida este modelo foi importado para o COMSOL Multiphysics onde implementou-se condutores, o meio onde o acessório estaria imerso, neste caso o ar, além das condições de contorno, as quais modelam um caso real, como mostrado na Figura 2. Os valores de permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação foram de 1 para os condutores e o ar e de 2,4 para o Polietileno que compõe o espaçador.

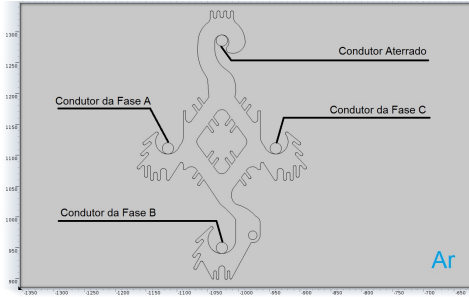


Figura 2. Exemplo de Modelo Implementado no COMSOL.

B. Determinação da Tensão de Descarga em Função do Nível de Poluição.

Para análise da tensão de descarga ($V_{50\%}$), ou seja, a tensão que provoca a descarga total do isolador em 50% das aplicações, foi implementada rotina específica. Nesta rotina são calculados os valores de tensão, em função do nível da poluição depositada, estando o mesmo submetido à névoa limpa (umidade saturada).

Este modelo dinâmico descrito e proposto por Rizk[2] e Sundararajan[3] com contruibuições de Bezerra [4], foi escolhido pois o mesmo apresenta uma precisão significativa, além de sua fácil implementação computacional. O modelo foi implementado no ambiente de programação Matlab seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3.

Na ilustração contida na Figura 4, a tensão é aplicada a um isolador tipo bastão, equivalente ao real, em seus terminais metálicos. O isolador possui duas partes dielétricas distintas.

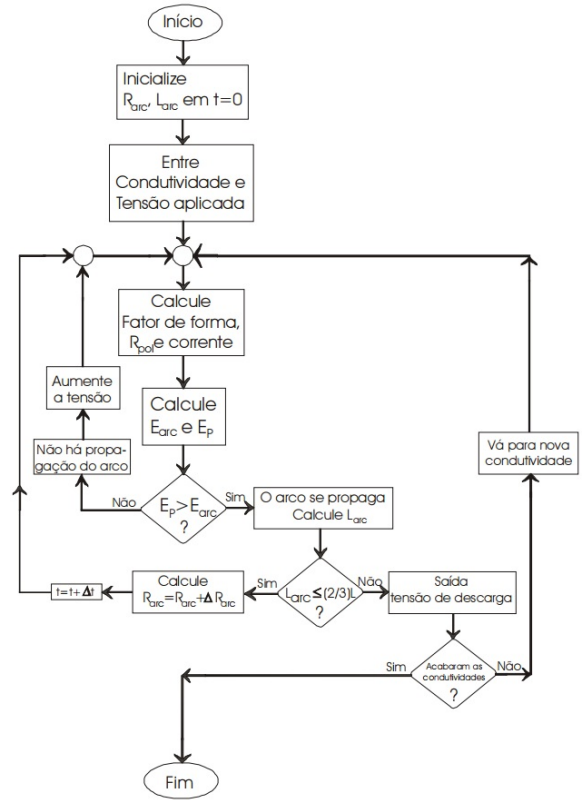


Figura 3. Modelo Computacional para Cálculo de Tensões de 50%. [4]

Na primeira delas a superfície encontra-se poluída e úmida. Na segunda, a umidade superficial foi inicialmente extraída por aquecimento oriundo de correntes de fuga, nas proximidades da parte metálica da esquerda do isolador, formando bandas secas sobre o mesmo.

Essas bandas secas, ao serem submetidas a tensões elétricas, podem dar origem a arcos, conforme ilustrado na Figura 4, em vermelho. O circuito, na parte inferior da figura, procura reproduzir o comportamento elétrico da situação descrita anteriormente, na qual R_p representa a resistência elétrica da superfície poluída e úmida e V_s a tensão aplicada.

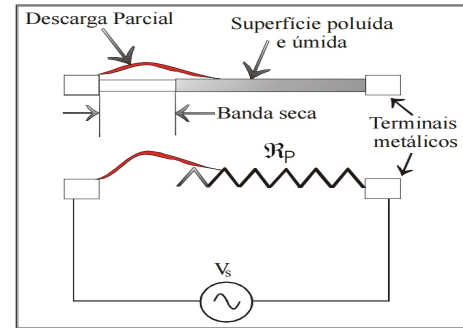
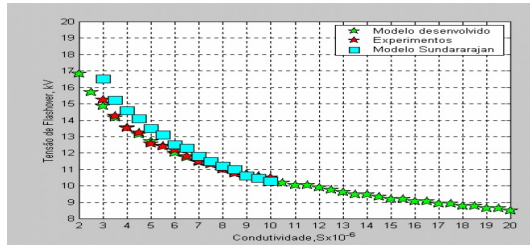


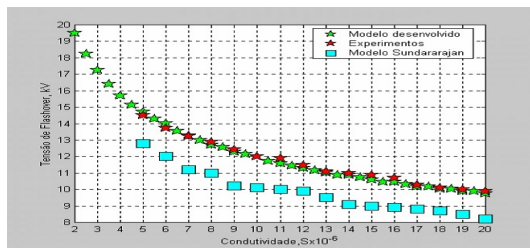
Figura 4. Descargas Parciais em Bandas Secas na Superfície de Isoladores. [2]

Assim como no caso aplicado para obtenção da distribuição de potencial, originalmente o modelo proposto foi desenvol-

vido para estudo em isoladores, porém como citado anteriormente, os acessórios possuem mesma finalidade elétrica, desta forma espera-se coerência entre os resultados adquiridos. A utilização do modelo em isoladores fornece respostas bem próximas às obtidas experimentalmente, como mostrado na Figura 5:



(a) Isolador Padrão



(b) Isolador Anti-Poluição

Figura 5. Tensões de Descarga para os Isoladores. [4]

III. RESULTADOS

Em condições normais de operação temos que a tensão, entre fases, a qual o espaçador está submetido é de $13kV$, já a frequência de operação da rede elétrica é de $60Hz$.

A. Análise da Distribuição de Potencial.

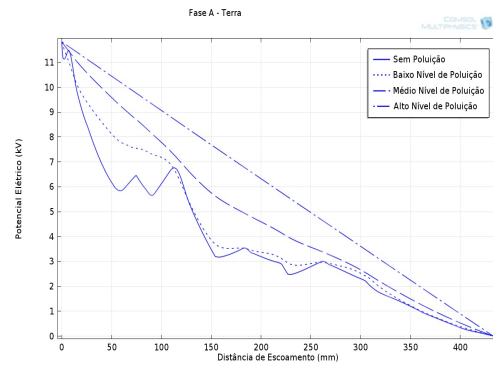
Os parâmetros utilizados para modelar os diferentes níveis de poluição são apresentados na Tabela I. Considerou-se a camada de poluição com espessura de 0,1 milímetros e permissividade relativa de 15 [5]. Para obtenção dos resultados do espaçador sem a presença da poluição, retirou-se a condição de contorno que modela o comportamento da mesma e realizou-se novamente a simulação.

Todos os resultados apresentados nas Figuras 6, 7 e 8 são de simulações realizadas no instante de tempo em que a fase A apresentava o valor máximo de potencial ($11,83kV$). Face à não simetria dos espaçadores, as análises apresentadas precisariam ser estendidas para a condição em que a tensão máxima estivesse aplicada às fases B e C.

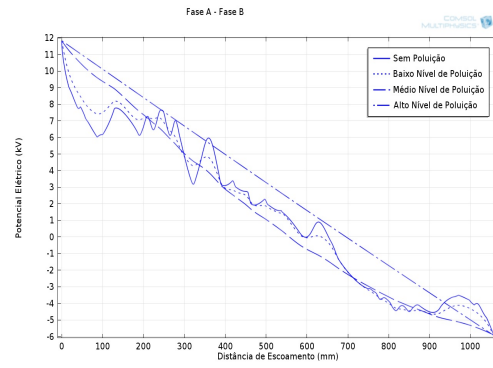
Tabela I

PARÂMETROS UTILIZADOS PARA MODELAR O NÍVEL DE POLUIÇÃO [5].

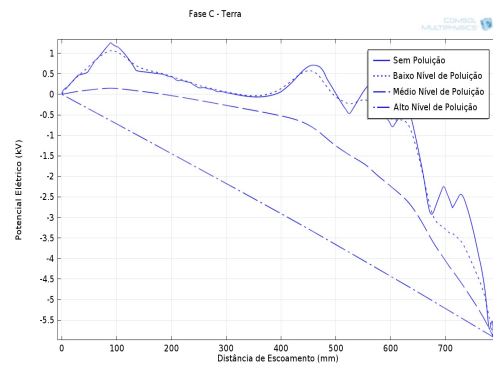
Nível de Poluição	Condutividade
Baixo Nível de Poluição	$10 nS/m$
Médio Nível de Poluição	$1 uS/m$
Alto Nível de Poluição	$0,1 mS/m$



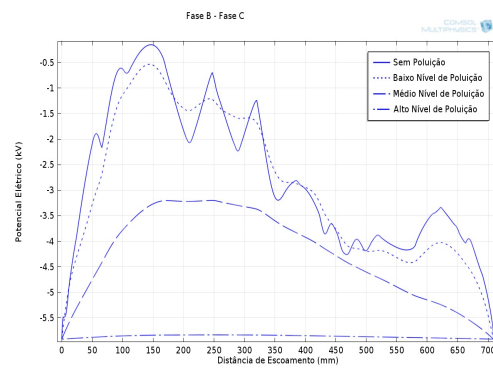
(a) Fase A - Terra



(b) Fase A - Fase B

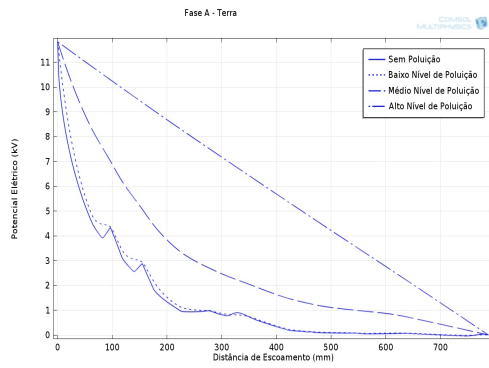


(c) Fase C - Terra

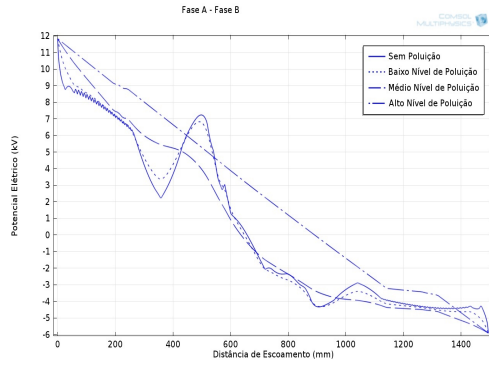


(d) Fase B - Fase C

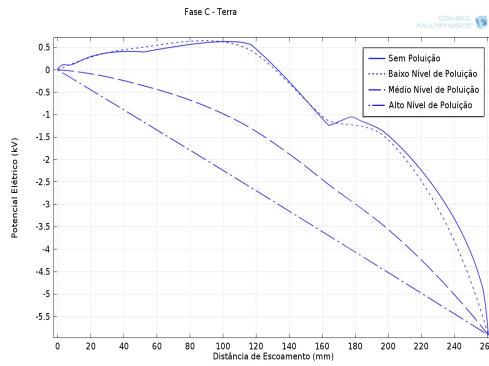
Figura 6. Distribuição de Potenciais para o Espaçador X em Cada Setor.



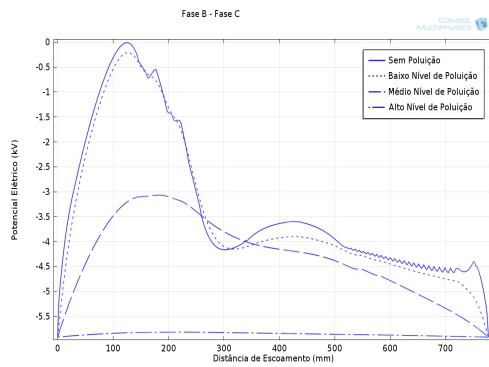
(a) Fase A - Terra



(b) Fase A - Fase B

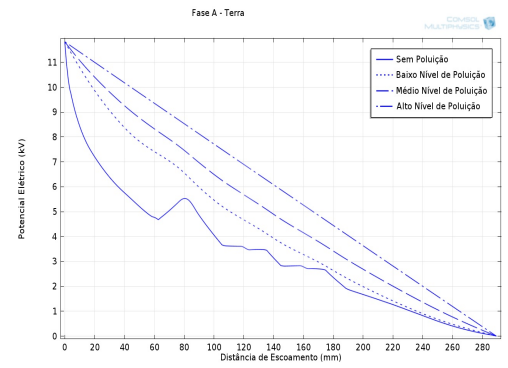


(c) Fase C - Terra

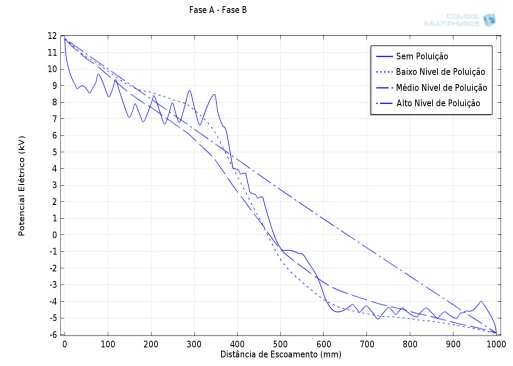


(d) Fase B - Fase C

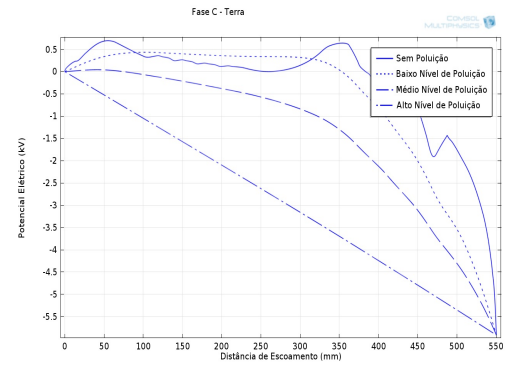
Figura 7. Distribuição de Potenciais para o Espaador Y em Cada Setor.



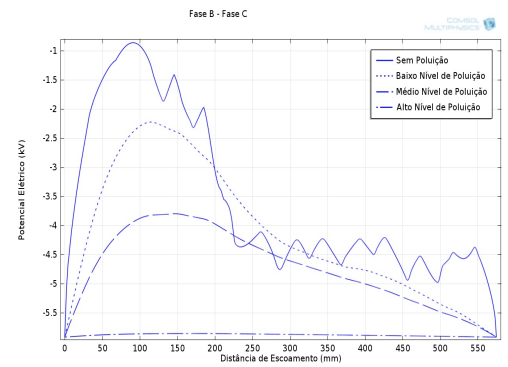
(a) Fase A - Terra



(b) Fase A - Fase B



(c) Fase C - Terra



(d) Fase B - Fase C

Figura 8. Distribuição de Potenciais para o Espaador Z em Cada Setor.

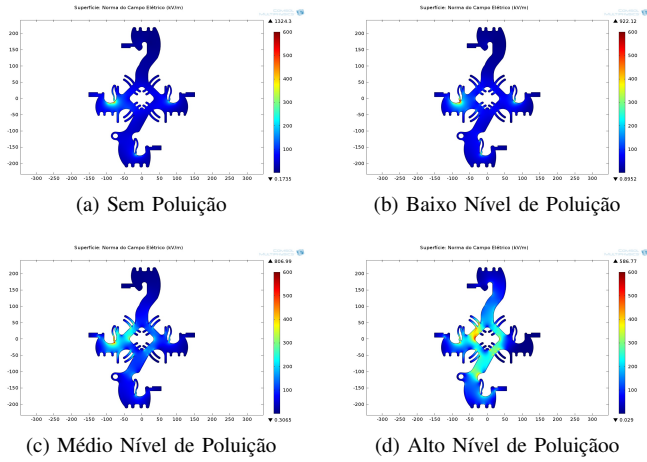


Figura 9. Campo Elétrico Obtidos no Espaçador X.

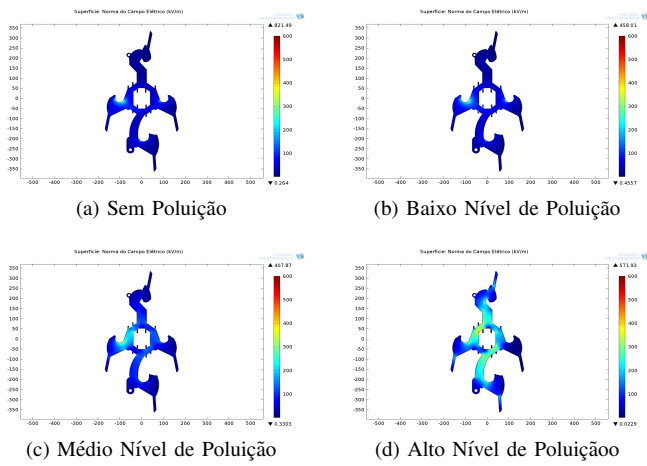


Figura 10. Campo Elétrico Obtidos no Espaçador Y.

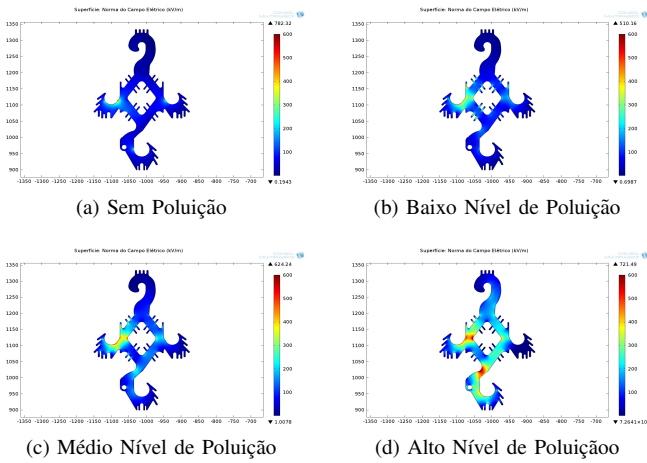


Figura 11. Campo Elétrico Obtidos no Espaçador Z.

B. Determinação da Tensão de Descarga em Função do Nível de Poluição.

Aplicando-se o modelo da Figura 4 e o algoritmo proposto por [3] variou-se o nível de poluição de $2uS$ à $20uS$, com um

passo de $0.5uS$, para os setores da Tabela II:

Tabela II
DISTÂNCIAS DE ESCOAMENTO POR SETOR EM CADA ESPAÇADOR.

Setor	Espaçador X	Espaçador Y	Espaçador Z
Fase A - Terra	43,3cm	78,9cm	28,7cm
Fase C - Terra	78,7cm	26,5cm	55,3cm
Fase A - Fase B	106,6cm	149,4cm	100,1cm
Fase C - Fase B	70,6cm	77,7cm	57,5cm

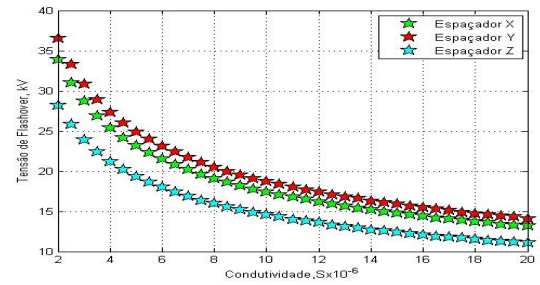
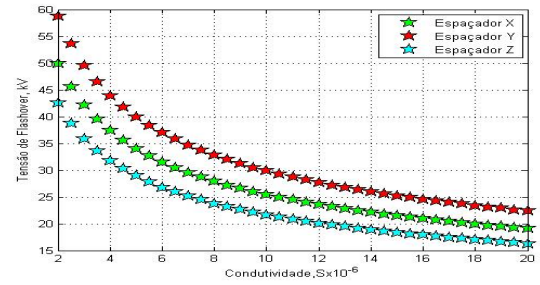
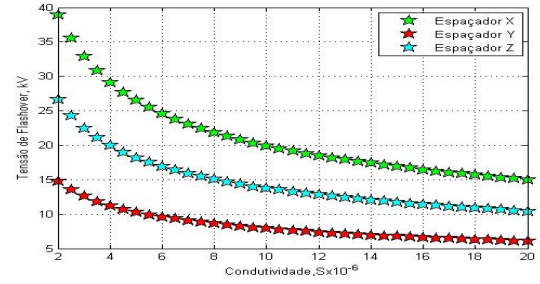
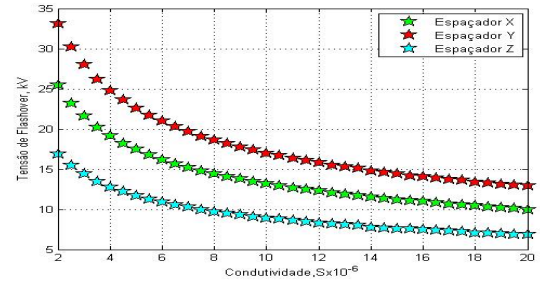


Figura 12. Curvas de Suportabilidade Variando-se o Nível de Poluição.

IV. DISCUSSÕES

Analisando-se as Figuras 6, 7 e 8 percebe-se que quanto maior o nível da poluição, mais uniforme será a distribuição de potencial ao longo do espaçador, independente do acessório analisado, tornando o gráfico linear. Este comportamento é esperado, visto que, quando o nível de poluição aumenta o espaçador passa a operar em um regime predominantemente resistivo, e não mais capacitivo como em condições sem poluição.

Os gráficos foram obtidos no instante de tempo em que a fase A encontra-se no valor de pico $11.86kV$, neste instante as fases B e C apresentam o mesmo nível de tensão, aproximadamente $-6kV$, percebe-se que para o nível mais alto de poluição simulado temos que praticamente toda distância de escoamento entre as fases B e C apresentam o mesmo potencial elétrico independente do espaçador.

Comparando-se as curvas apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8 percebe-se que o espaçador Y é o que menos sofre variação em sua distribuição de potencial, quando submetido a uma poluição leve, visto que dentre os espaçadores é aquele em que a curva referente à superfície pouco poluída mais se assemelha com aquela em ambiente limpo. Analisando-se as curvas percebe-se um padrão em que quanto menor a distância de escoamento, mais rapidamente ocorre o decaimento da tensão, visto que, os potenciais em cada condutor são os mesmos independente do espaçador.

Para se obter as Figuras 9, 10 e 11 são exibidos campos elétricos na faixa de valores entre $0kV/m$ até $600kV/m$ para fins comparativos entre os espaçadores. Percebe-se que quanto maior a poluição, maior será a ocorrência de pontos com maior campo elétrico, ou seja, maior estresse. O espaçador que apresenta a melhor performance, ou seja, menores valores de campo elétrico, quando se varia a poluição, é o espaçador Y, enquanto aquele que apresenta mais regiões com pelo menos $600kV/m$ de campo elétrico é o espaçador Z. Mais informações sobre os valores dos campos elétricos são apresentados na Tabela III.

Tabela III
VALORES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO PRESENTES EM CADA
ESPAÇADOR PARA CADA NÍVEL DE POLUIÇÃO.

Nível de Poluição	Espaçador X	Espaçador Y	Espaçador Z
Sem Poluição	$1324,3kV/m$	$821,49kV/m$	$782,32kV/m$
Baixa Poluição	$922,12kV/m$	$458,01kV/m$	$510,16kV/m$
Média Poluição	$806,99kV/m$	$407,87kV/m$	$624,24kV/m$
Alta Poluição	$586,7kV/m$	$571,93kV/m$	$721,49kV/m$

Apesar dos valores da Tabela III sugerirem que quanto menor a poluição, maior o campo elétrico, essas informações devem ser confrontadas com as Figuras 9, 10 e 11 onde vê-se que esses valores máximos de campo são pontuais, mais precisamente próximo ao local onde ocorre o contato entre o condutor da fase A e o espaçador, causado pela não uniformidade da distribuição de tensão em ambientes de menor poluição.

Devido aos diferentes perfis e distâncias de escoamento presentes no espaçador, como mostrado na Tabela II, observam-se

suportabilidades diferentes para cada setor, via de regra quanto maior a distância de escoamento maior será a suportabilidade.

Analisando-se a Figura 12 percebemos que o espaçador que possui a maior suportabilidade é o espaçador Y apenas para o setor entre a fase C e o terra é que esse espaçador tem os piores resultados. Já o espaçador que apresentou os piores resultados foi o espaçador Z, que possui a menor suportabilidade em quase todos os setores.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta contribuições com relação ao estudo do comportamento de espaçadores em ambientes poluídos. A performance desses acessórios está diretamente ligadas ao nível de poluição depositada, visto que, algumas unidades podem estar sujeitas à descargas intermitentes, causando uma gradual degradação do dielétrico.

Considerando as tensões máximas às quais o espaçador estará submetido em sua operação são, entre fase e terra de $11,8kV$ e entre fases de $19,45kV$, aquele que possui o melhor desempenho com relação à suportabilidade sob ambientes poluídos, é o espaçador X que apesar de não apresentar os maiores valores em boa parte dos setores, ele é o que apresenta um desempenho aceitável nos níveis mais elevados de poluição. O espaçador Y, apesar de apresentar os melhores valores de suportabilidade na maioria dos setores, peca consideravelmente no setor entre a fase C e o terra podendo ocorrer falhas quando submetido a poluições mais elevadas, porém é o espaçador que apresenta melhores resultados com relação à distribuição de campo elétrico no acessório, sendo assim o que, provavelmente, possui maior vida útil.

Os procedimentos adotados neste estudo podem ser reproduzidos para diferentes tipos de espaçadores, ou então para realização de projetos desses acessórios, ajudando a entender como será o seu funcionamento prático e os melhoramentos que podem ser introduzidos no mesmo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ANEEL, ED-AL, FA-CEPE e CAPES pelo financiamento das despesas relacionadas com este projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Xavier, "Aplicação de modelo de elementos finitos para mapeamento da distribuição de potencial em espaçadores de redes de distribuição na classe de tensão de 13.8kv," *Trabalho de Graduação, UFPE*, 2014.
- [2] F. A. M. Rizk, "Mathematical models for pollution flashover," *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1991.
- [3] R. Sundararajan and R. Gorur, "Dynamic modeling of flashover on dielectric surfaces," *Electra*, vol. 78, pp. 71–103, 1981.
- [4] J. Bezerra, "Caracterização de atributos de sinais para utilização de técnicas de reconhecimento de padrões na avaliação do isolamento de instalações e de equipamentos elétricos," *Tese de Doutorado, UFCG*, 2005.
- [5] C. Volat, "Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer," *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013 IEEE, vol. C, pp. 409–413, 2013.
- [6] E. Asenjo, N. Morales, and A. Valdenegro, "Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method," *IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 4, pp. 10–17, 1997.