



APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Determinação de posicionamento ótimo de anel equalizador em Isoladores Poliméricos

Determinación del posicionamiento óptimo de los anillos ecualizadores en aisladores poliméricos

Determining optimal positioning ring Equalizer in Polymeric Insulation

Rafael Mendonça - Rocha Barros
Tarso - Vilela Ferreira

Edson - Guedes da Costa

Recevedo: Dezembro del 2012

Aprovado: Febrero del 2013

Resumo/Resumen/Abstract

O comportamento do campo elétrico nas proximidades do terminal de linha de um isolador polimérico foi estudado em função do posicionamento do anel equalizador, com o objetivo de determinar a posição ótima de instalação do mesmo, dado que o campo elétrico que incide nas primeiras aletas do isolador é afetado de maneira significativa pela posição em que o anel equalizador é instalado. Adicionalmente a utilização de isoladores de vidro como extensão em isoladores poliméricos também foi avaliada, esse tipo de associação é uma prática comum das concessionárias brasileiras, no entanto, sua influência no comportamento do campo elétrico ainda é pouco conhecida. A distribuição do campo elétrico foi determinada por meio de simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos. Os resultados sugerem uma posição ótima para a instalação do anel equalizador e permitiram chegar a algumas conclusões sobre a utilização de isoladores de vidro como extensão em isoladores poliméricos.

Palavras-chave: anéis equalizadores, distribuição de campo elétrico, isoladores poliméricos, método dos elementos finitos.

El comportamiento del campo eléctrico en las proximidades del terminal de línea de un aislador polimérico fue estudiado en función de la ubicación del anillo ecualizador con el objetivo de determinar la posición óptima de instalación del mismo, dado que el campo eléctrico que incide en las primeras aletas del aislador es afectado de manera significativa por la posición en que se instala el anillo ecualizador. Adicionalmente, la utilización de aisladores de vidrios como extensión de aisladores poliméricos también fue evaluada, ese tipo de asociación es una práctica común de las empresas eléctricas brasileñas; sin embargo su influencia en el comportamiento del campo eléctrico todavía es poco conocida. La distribución del campo eléctrico fue determinada por medio de simulaciones computacionales basadas en el método de los elementos finitos. Los resultados sugieren una posición óptima para la instalación del anillo ecualizador y permiten llegar a algunas conclusiones sobre la utilización de aisladores de vidrio como extensión de aisladores poliméricos.

Palabras clave: anillos ecualizadores, distribución del campo eléctrico, aisladores poliméricos, método de los elementos finitos

The behavior of the electric field near the line terminal of a polymeric insulator was studied in function of positioning the ring equalizer, with the objective of determining the optimal position for installing the same. Additionally the use of glass insulators like extension in polymeric insulators was also evaluated. The electric field distribution was determined by means of computer simulations based on the Finite Element Method. The results suggest an optimal position for installing the equalizer ring and led to some conclusions about the use of glass insulators as extension.

Key Words: rings equalizers, distribution of electric field, polymeric insulators, finite elements method.

INTRODUÇÃO

Isoladores em geral são aplicados a sistemas elétricos com a função de manter a distância de isolamento entre duas estruturas com potenciais elétricos diferentes, impedindo uma circulação indesejável de corrente, além de prover a sustentação mecânica dos cabos entre duas estruturas. Quando falham, isoladores podem provocar o desligamento da linha de transmissão, interrompendo o fornecimento de energia elétrica, gerando prejuízos muito maiores que seu custo. Historicamente, os sistemas de isolamento em linhas de transmissão têm sido representados pelos isoladores cerâmicos. Contudo, nos últimos anos, o uso de isoladores poliméricos tem crescido devido a uma série de fatores, como a alta resistência aos choques mecânicos, o peso reduzido e a maior hidrofobicidade superficial isto é, propriedade de repelir a água, impedindo a formação de películas de água, diminuindo correntes de fuga [1]. Junto ao seu uso cresce o interesse sobre o comportamento dos isoladores em condições críticas, como a exposição a campos elétricos muito intensos, essas condições podem levar à perda da sua hidrofobicidade, erosão do material e conseqüente falha do isolamento. A distribuição do campo elétrico ao longo do isolador não é uniforme, tendendo a se acumular mais intensamente nas aletas próximas ao terminal de linha. Caracterizando regiões que poderão levar o isolante a arcos elétricos superficiais, os quais poderão conduzir a unidade a desgastes pontuais precoces.

A má distribuição de campo elétrico pode ser atenuada com o uso de anéis equalizadores. O uso de anéis adequados minimiza a intensidade do campo elétrico nas aletas submetidas aos valores de campo mais intensos. Por este motivo um projeto dos anéis equalizadores apropriados, assim como seu posicionamento no isolador, é essencial ao aumento do tempo de vida das unidades isolantes, como também no aumento da confiabilidade do sistema elétrico. Num outro contexto, os isoladores poliméricos podem perder parte de suas capacidades isolantes quando submetidos a condições adversas, como poluição e descargas parciais. Uma técnica frequentemente adotada pelas concessionárias, na tentativa de manter uma corrente de fuga minimamente aceitável para o caso, é a utilização de isoladores de vidro entre a ferragem fase do isolador polimérico e o condutor, estendendo o comprimento da conexão [2]. Contudo, os esforços termoeletrônicos associados a esta extensão não são claramente documentados. Assim, o objetivo deste trabalho é a avaliação da distribuição de campo elétrico ao longo da superfície do isolador polimérico por meio de simulações computacionais, baseada no Método dos Elementos Finitos. A partir das simulações pretende-se verificar as alterações na distribuição do campo elétrico nas proximidades da alta tensão, em função do posicionamento do anel equalizador, determinando-se assim o ponto ótimo de instalação. E ainda, avaliar a influência da utilização de isoladores de vidro como extensão nos esforços a que o isolador polimérico será submetido.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Isoladores Poliméricos

Existem dois tipos básicos de isoladores elétricos: os cerâmicos e poliméricos. Naturalmente cada tipo de isolador apresenta características físicas e de operação distintas, cada um com suas vantagens e desvantagens. Por ser um composto orgânico a interação da superfície polimérica dos isoladores com o ambiente se dá de maneira dinâmica, sendo afetada pelas condições ambientais, tais como: radiação ultravioleta, poluição, umidade e também pelas descargas elétricas em sua superfície. Este fato dificulta a previsão da vida útil do isolador, estimada entre 30 e 40 anos. Isoladores cerâmicos têm estimativa de vida de 60 a 90 anos [3]. A estrutura do isolador

polimérico é composta por um núcleo constituído de fibra de vidro reforçada, por saias e um revestimento polimérico além das ferragens terminais. O núcleo é constituído de uma haste de fibra de vidro reforçada e tem como função suportar os esforços mecânicos provenientes do condutor. Já o revestimento polimérico é responsável pela proteção do núcleo de fibra de vidro em relação à umidade, contaminadores químicos e radiação ultravioleta. O revestimento polimérico tem aletas que garantem a distância de escoamento do isolador. As ferragens terminais foram designadas para que ocorra a transmissão dos esforços mecânicos do condutor até o núcleo, realizando, desta forma, as ligações: condutor/isolador e isolador/estrutura. Na figura 1, pode ser observada a estrutura de um isolador polimérico.

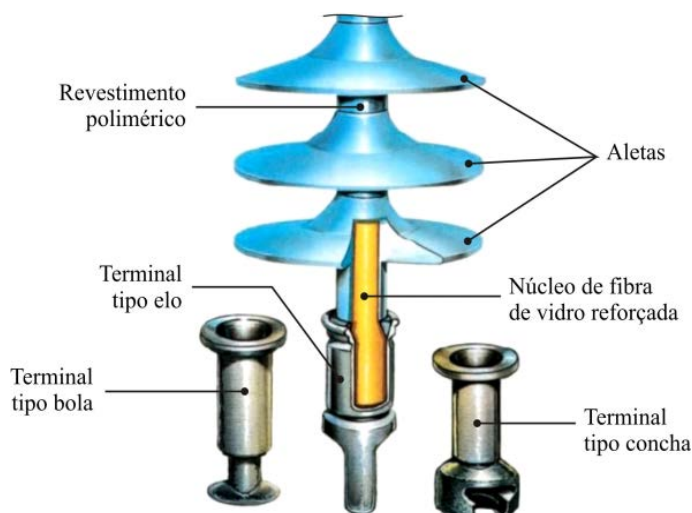


Fig. 1. Estrutura de um Isolador Polimérico [1].

Apesar de o isolador polimérico ser uma tecnologia relativamente nova, ele possui um alto grau de aceitação no mercado devido às suas várias vantagens perante os demais. Além das já citadas podemos destacar ainda: a maior facilidade de instalação, o bom desempenho sob poluição, o baixo custo e a diminuição da complexidade do projeto. Naturalmente eles também apresentam desvantagens quando comparados aos isoladores cerâmicos, notadamente devido ao restrito conhecimento a respeito de seu envelhecimento, uma vez que se trata de uma tecnologia mais recente. Dentre as desvantagens destacam-se: a difícil detecção de falhas em seu interior, a baixa flexibilidade longitudinal em alguns casos e a pouca intercambiabilidade isto é, a incapacidade de se fazer a substituição de apenas parte do isolamento como ocorre com os isoladores cerâmicos.

Reação dos Polímeros ao Campo Elétrico

Como já foi dito, o polímero é um composto orgânico e a sua interação com o ambiente se dá de maneira dinâmica, sendo afetada pelas condições ambientais. A parcela do mecanismo de envelhecimento causada pela presença do campo elétrico é matematicamente modelada pela equação 1, conhecida como equação eletroquímica de Lippman [4].

$$\Delta\gamma = -q\Delta V \quad (1)$$

Onde $\Delta\gamma$ é a tensão mecânica na interface dielétrico-eletródo, q é a separação de cargas pela interface e ΔV a diferença de potencial elétrico através da interface.

Considerando-se o balanço entre forças elétricas e mecânicas e impondo-se a condição de que o campo elétrico é nulo em ambas as fronteiras metálicas que limitam o dielétrico, é possível estender a aplicação a camadas macroscópicas, chegando à equação 2.

$$\Delta\sigma(z) = -\varepsilon(z)E^2(z) \quad (2)$$

Em que, $\sigma(z)$ é o estresse total do plano, E e ε são o campo elétrico e a permissividade do material, respectivamente, na posição z da interface. Como a tensão mecânica tem seu sentido correlacionado ao campo elétrico, tensões elétricas alternadas promovem distensões que alternam temporalmente seu sentido. De modo que, a degradação da interface é acelerada. Desta forma, se uma interface entre dois materiais diferentes fica exposta a um campo elétrico variante no tempo, há uma tendência de que estes materiais sofram micro deformações mecânicas de diferentes intensidades. Estas micro-deformações podem facilitar a ocorrência de regiões com falta de aderência ou formação de cavidades gasosas, onde ocorrerão descargas parciais [5].

Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF foi inicialmente desenvolvido por Alexander Hrennikoff (1941) e Richard Courant (1942) baseado no já existente método de Ritz, e é utilizado para se obter soluções aproximadas de equações diferenciais parciais e de equações integrais em situações onde é impossível (ou extremamente complicado) obter-se uma solução analítica exata [6]. A aproximação é baseada na eliminação completa das equações diferenciais, ou ainda na transformação das equações diferenciais parciais em um sistema de equações diferenciais ordinárias, ou seja, há uma subdivisão do problema em diversos problemas menores e correlatos, processo conhecido como discretização. Os pontos comuns entre os elementos são os nós, onde os resultados das análises são computados [7]. Na figura 2, é possível observar as etapas de discretização de um isolador cerâmico

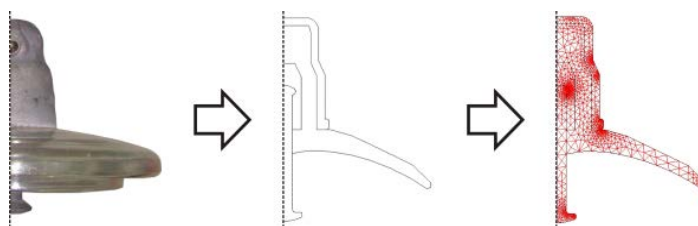


Fig. 2. Etapas de discretização de um isolador cerâmico.

O MEF é indicado para a obtenção da solução de equações com um domínio complexo, e equações cuja solução varia de acordo com a variação do domínio, porque o método divide os problemas complexos em diversos problemas menores. Devido à redução do custo computacional, o MEF passou a ser amplamente utilizado, e tem apresentado resultados muito precisos, satisfazendo a necessidade do problema a que o método é aplicado. Por possuir como características a flexibilidade e estabilidade numérica, pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e metódica.

COMSOL Multiphysics

O COMSOL Multiphysics¹ é um software desenvolvido para análise de problemas físicos, modelagem e simulação. Ele foi criado baseando-se na teoria do Método dos Elementos Finitos, ou seja, trabalha realizando aproximações das soluções de equações diferenciais parciais. As principais vantagens do software são sua robustez e a possibilidade de representar graficamente o objeto a ser estudado. Após o desenho do modelo, são diretamente atribuídas às regiões do mesmo as constantes e grandezas físicas, não sendo necessária a construção das equações do MEF ou a criação de algoritmos de solução. O software também permite uma visualização das soluções das mais variadas formas, entre elas, os mapas de cores e a representação da solução por linhas equipotenciais. Para obter as soluções de problemas utilizando o software necessita-se definir a geometria da região onde o problema deve ser resolvido, indicando as características elétricas de cada sub-região e as condições de contorno.

¹COMSOL Multiphysics é marca registrada de COMSOL AB.

MATERIAIS E MÉTODOS

As simulações foram realizadas aproveitando-se a simetria axial do conjunto para reduzir o esforço computacional inerente ao processo de simulação, a modelagem gráfica foi realizada com a utilização do software AutoCAD®², as análises foram feitas com a utilização do software COMSOL Multiphysics. Na figura 3, podemos ver o isolador simulado assim como seu modelo gráfico para simulação computacional.

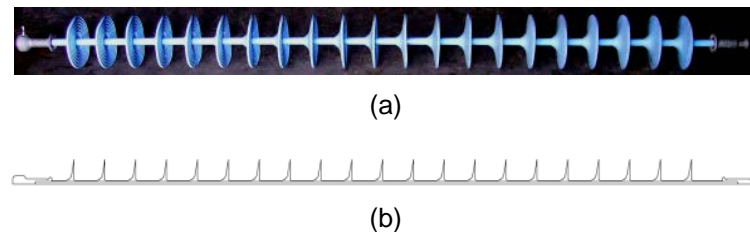


Fig. 3. Isolador polimérico de 230 kV (a) e seu respectivo modelo para simulação computacional (b).

Como já citado anteriormente o intuito das simulações é averiguar a influência da posição do anel, e da utilização de isoladores de vidro como paliativos no valor do campo elétrico sobre o isolador, em especial nas proximidades da fase, região onde ocorre a situação mais crítica de exposição ao campo. Por isso, o estudo detém-se a analisar apenas a região do isolador entre o terminal de linha e a segunda aleta. Observa-se na figura 4, que o potencial elétrico se concentra mais intensamente nesta região.

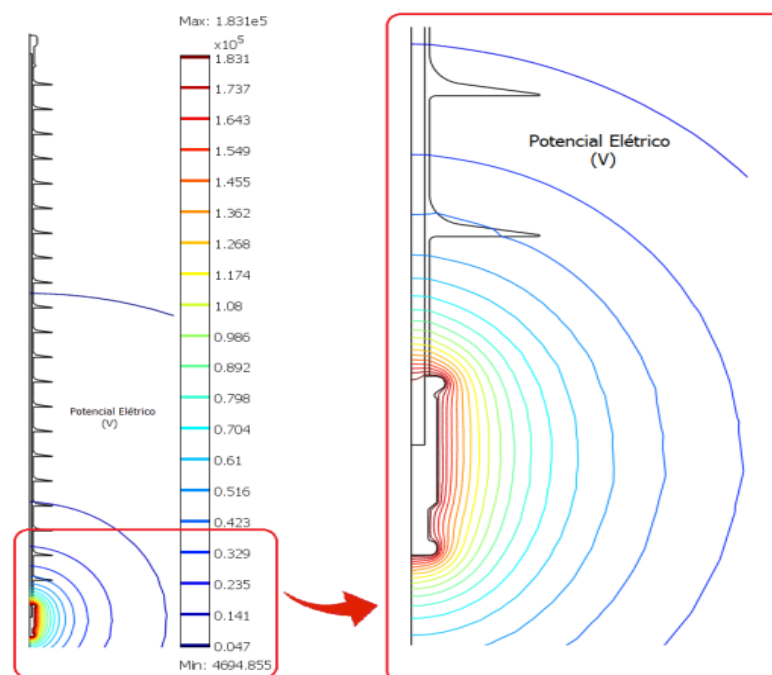


Fig. 4. Distribuição do potencial elétrico ao longo de todo o isolador e um zoom na região de interesse.

Os gráficos de intensidade de campo elétrico na superfície do isolador foram obtidos através de uma ferramenta do software de simulação que apresenta os valores pontuais do campo elétrico encontrados ao longo de um segmento de reta definido pelo usuário. Desta maneira, o segmento

²AutoCAD é marca registrada de Autodesk, Inc.

foi traçado entre a extremidade superior da ferragem fase e a extremidade inferior da segunda aleta, ligando sempre os mesmos dois pontos. Na figura 5, em vermelho é possível visualizar o segmento de reta bem como a região do isolador onde ele foi traçado.

Os casos simulados com os anéis equalizadores em suas diferentes posições e com a utilização dos isoladores de vidro como extensão são descritos na tabela 1. O anel equalizador simulado, comercialmente disponível, é empregado em campo, associado ao isolador em questão.

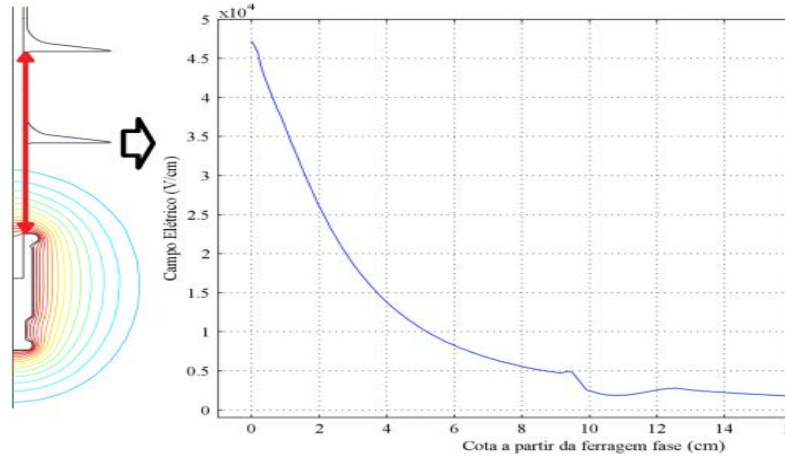


Fig. 5. Criação dos gráficos de representação do campo elétrico na superfície do isolador.

Tabela 1		Detalhamento dos casos simulados.	
<p>Caso 1:</p> <p>Uso do isolador sem nenhum tipo de anel de equalização.</p>		<p>Caso 5:</p> <p>Isolador com anel instalado um pouco acima do centro da ferragem fase.</p>	
<p>Caso 2:</p> <p>Isolador com anel instalado na extremidade inferior da ferragem fase.</p>		<p>Caso 6:</p> <p>Isolador com anel instalado na extremidade superior da ferragem fase.</p>	
<p>Caso 3:</p> <p>Isolador com anel instalado um pouco acima da extremidade inferior da ferragem fase.</p>		<p>Caso 7:</p> <p>Um isolador de vidro colocado entre o IP e o condutor.</p>	
<p>Caso 4:</p> <p>Isolador com anel instalado no centro da ferragem fase.</p>		<p>Caso 8:</p> <p>Dois isoladores de vidro colocados entre o IP e o condutor.</p>	

RESULTADOS E DISCUÇÕES

Influência do Posicionamento do Anel Equalizador

Na figura 6, são apresentadas as curvas de campo elétrico na superfície do isolador gerada para as posições distintas de instalação do anel equalizador, posteriormente a tabela 2, apresenta os valores máximos do campo elétrico registrado para cada caso.

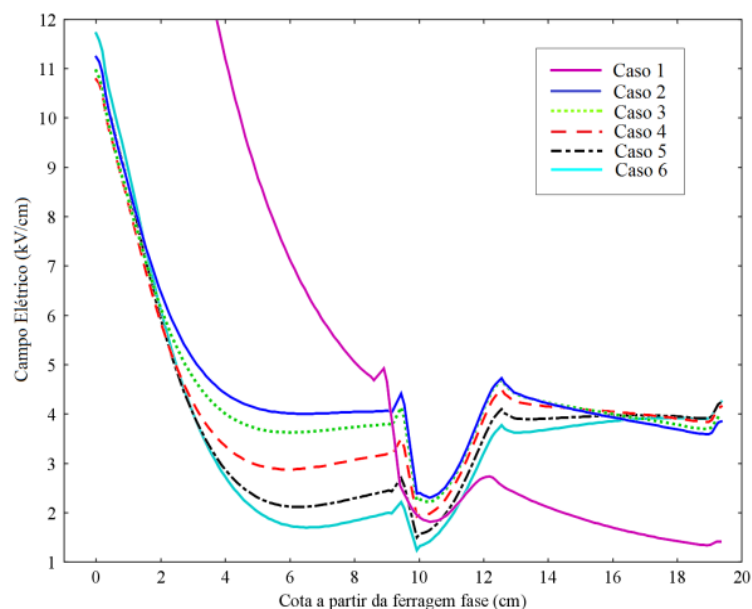


Fig. 6. Influência da posição do anel equalizador no campo elétrico sobre o isolador polimérico.

Tabela 2. Valores de Intensidade Máxima do Campo Elétrico Registrado para os Casos Simulados.

Caso	Campo Elétrico Máximo (kV/cm)
1	47,154
2	11,235
3	10,963
4	10,791
5	11,241
6	11,711

A análise dos resultados mostra que a posição de instalação do anel equalizador é um fator relevante na redução do campo elétrico nas proximidades da fase, é observada uma discrepância em torno de 10% no valor do campo, quando se compara o melhor e o pior caso com a presença do anel.

O Caso 1 apresenta um valor de campo elétrico excessivamente alto em relação aos casos com a presença do anel equalizador, a exposição ao valor registrado é prejudicial ao isolador, podendo gerar no mesmo os desgastes já citados. No Caso 2, a distribuição do campo elétrico já é significativamente melhor, visto que houve uma redução de 76% no valor do campo em relação ao uso do isolador sem o anel (Caso 1).

Os resultados indicam que, o posicionamento do anel no Caso 4 (instalado no centro da ferragem fase) alcança a maior redução no valor máximo e a melhor distribuição do campo elétrico. O gráfico apresentado na figura 7, evidencia a análise.

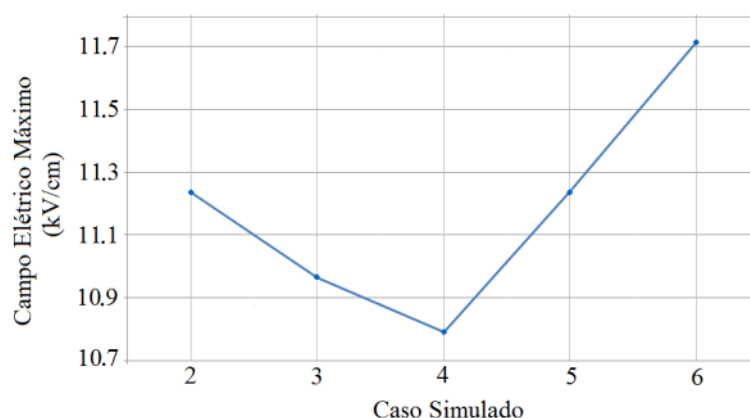


Fig. 7. Variação dos valores máximos do campo elétrico, em função dos casos simulados com a presença do anel equalizador.

Utilização de Isoladores de Vidro Como Extensão

Na figura 8, são apresentadas as curvas de campo elétrico para os casos em que se utilizou isoladores de vidro associados ao isolador polimérico (casos 7 e 8).

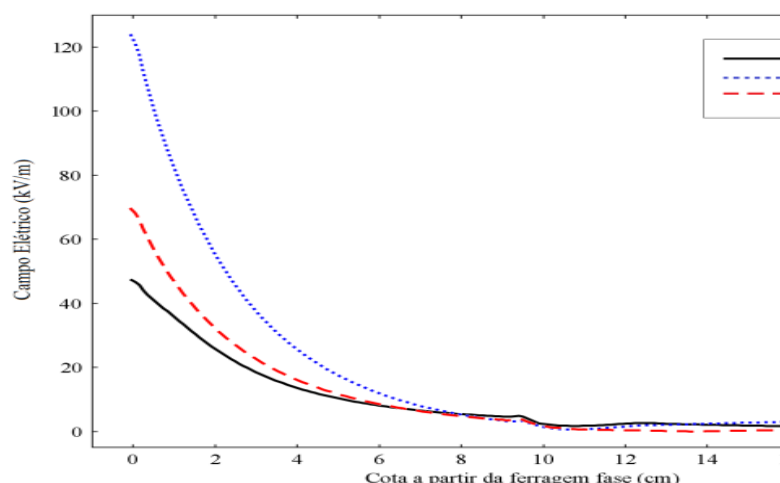


Fig. 8. Curva de representação do campo elétrico para os Casos 7 e 8.

A configuração que utiliza um isolador de vidro associado ao isolador polimérico apresentou o maior valor de campo elétrico dentre todos os casos estudados, 123,283kV/cm. Evidenciando o desempenho insatisfatório da configuração do ponto de vista da distribuição do campo elétrico.

O uso de dois isoladores de vidro associados ao isolador polimérico também não demonstra um comportamento satisfatório, o valor máximo do campo elétrico foi de 69,381kV/cm. O uso dos isoladores de vidro em série, tem como finalidade reduzir a corrente de fuga nos sistemas de isolamento em que o isolador polimérico deixa de funcionar como desejado, ou seja, perde parte de suas capacidades isolantes, diminuindo assim os estresses elétricos a que ele estaria exposto, mas não leva em conta a distribuição de campo elétrico sobre o mesmo, o que o torna uma prática ambígua.

CONCLUSÕES

A variação na distribuição do campo elétrico ao longo da superfície do isolador polimérico em função do posicionamento do anel equalizador foi numericamente avaliada, permitindo determinar a posição ótima de instalação do mesmo. Adicionalmente um estudo sobre a utilização de isoladores de vidro associados ao isolador polimérico foi apresentado. Os resultados demonstram que a posição de instalação do anel equalizador é um fator relevante na redução do campo elétrico sobre as regiões mais críticas do isolador polimérico. Dado que, o posicionamento adequado pode levar a uma redução de até 10% no valor do campo elétrico, reduzindo o efeito cumulativo da exposição ao campo, retardando assim a degradação do isolador, além disso, trata-se de uma medida de custo zero que melhora as condições de atuação do sistema de isolamento. A posição ótima para instalação do anel equalizador em questão é no centro da farragem fase, configuração apresentada no Caso 4. Apesar de reduzir a corrente de fuga, a instalação de isoladores de vidro associados ao isolador polimérico pode ser prejudicial ao mesmo, pois as simulações mostram que os valores de campo elétrico na superfície do isolador polimérico podem mais que dobrar após a associação. Portanto, o uso de isoladores de vidro associados a isoladores poliméricos deve ser revisto, levando em conta a distribuição do campo elétrico sobre a superfície polimérica.

REFERÊNCIAS

- [1] LAPP INSULATORS COMPANY LCC. High-Voltage Insulators. [Online], Leroy, 2005. [Acesso em 30 de junho de 2011], Disponível em: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>
- [2] FERREIRA, T. V., "Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos". M. Sc. Dissertação, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.
- [3] HALL, J. F., "History and Bibliography of Polymeric Insulators of outdoor Applications". Em: IEEE Trans. Power Delivery, 1993.
- [4] LEWIS, T. J., "A new model for electrical ageing and breakdown in dielectrics". Em: 7th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Bath, 1996.
- [5] TANAKA, T., "Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics". Em: IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. ED-12, 2005.
- [6] HUEBNER, K. H.. *The finite element method for engineers*. NY: Jhon Wiley, p. 627, New York, 1995.
- [7] PEREIRA, L. A., Método dos Elementos Finitos 2D Aplicados ao Eletromagnetismo. [Online], Porto Alegre, 2012, [Acesso em 15 de Dezembro de 2012], Disponível em: http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D_Eletromagnetismo.pdf

AUTORES

Rafael Mendonça Rocha Barros

Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Elétrica, DEE. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, Brasil.
e-mail: rafael.barros@ee.ufcg.edu.br

Tarso Vilela Ferreira

Doutor em Engenharia Elétrica, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Elétrica, DEE. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, Brasil.
e-mail: tarso@dee.ufcg.edu.br

Edson Guedes da Costa

Doutor em Engenharia Elétrica, Professor Associado, Departamento de Engenharia Elétrica, DEE. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, Brasil.
e-mail: edson@dee.ufcg.edu.br