



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/24
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DEFEITOS NO REVESTIMENTO DE DUTOS ENTERRADOS EM CASOS DE
CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LT EM CORREDORES
COMPARTILHADOS**

**Mário L. Pereira Filho
IPT - SP**

**Antônio F G Ferreira Jr
IPT - SP**

**Pierre Goebel
IPT - SP**

**Gustavo A. Pimentel
IPT - SP**

**Eduardo W. Laurino
PETROBRÁS**

**Gutemberg S. Pimenta
PETROBRÁS**

**Marcelo Araújo
PETROBRÁS**

RESUMO

Este informe estuda o risco de perfuração da parede metálica de dutos de óleo e gás enterrados próximos a cabos contrapeso de torres de linhas de transmissão. Estima a distribuição de corrente e realiza simulações para calcular a região de ionização em torno dos cabos contrapesos quando da ocorrência de descargas atmosféricas. Apresenta resultados e sugere distância mínima de segurança entre os contrapesos e os dutos para prevenir a formação de arco elétrico entre as duas estruturas. Conclui que caso não haja formação de arco elétrico o defeito no revestimento não traz risco de integridade para o duto enterrado.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas atmosféricas, oleoduto, gasoduto, segurança, integridade, curto-circuito, aterramento

1.0 - INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia nos grandes centros urbanos tem levado a um compartilhamento das faixas de servidão de linhas de transmissão de energia elétrica (LT) com outras utilidades tais como oleodutos, gasodutos e adutoras. Em trabalho anterior (1) foi apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta de elementos finitos 3D (MEF) com ênfase na análise de segurança contra choques elétricos dos operadores e transeuntes no caso de ocorrência de curto-circuitos na LT.

O curto-circuito fase-terra ou a incidência de descargas atmosféricas pode ainda trazer ameaças à integridade física do duto e de seu revestimento, pois pode haver ruptura do revestimento e, ainda, suspeita de riscos de perfuração da parede metálica do duto devido à formação de arco elétrico entre os eletrodos de aterramento e a parede do duto. A situação de ruptura do revestimento já foi analisada em diversos artigos (2)-(3), entretanto um aspecto relevante que ainda não foi estudado é a existência de defeitos de revestimento antes da ocorrência da falta, o que pode facilitar o adensamento de corrente na parede do duto..

Este trabalho visa estudar especificamente as consequências de descargas atmosféricas em uma situação de compartilhamento de corredores de utilidades, com ênfase na ionização do solo e possível perfuração da parede dos dutos, de forma que os resultados obtidos permitam uma estimativa de distâncias seguras.

2.0 - MÉTODO UTILIZADO

Os estudos de ionização de solo costumam contemplar casos de eletrodos isolados, tal como hastes de aterramento, em solos uniformes e sem a presença de outras estruturas metálicas passivas no solo, tal como um

duto, e ainda com revestimentos não uniformes, pois os métodos analíticos costumeiramente usados nestes estudos não conseguem lidar satisfatoriamente com irregularidades tão pequenas quanto um defeito no revestimento.

A abordagem utilizada neste projeto consiste do uso de duas ferramentas de simulação complementares. Uma delas é a ferramenta HIFREQ (4), que permite a estimativa da distribuição de correntes em um sistema de aterramento submetido a uma descarga atmosférica e a outra, a ferramenta COMOSOL (5) de elementos finitos 2D capaz de representar os detalhes do defeito do revestimento e que utiliza como dados de entrada a distribuição de correntes previamente calculada.

O fenômeno de ionização de solo, embora não representado diretamente pelas ferramentas, é incorporado mediante variação do diâmetro aparente dos eletrodos de aterramento (6). Os passos utilizados são.

2.1 Cálculo da distribuição de correntes

Utilizando-se os dados originais do sistema de aterramento, simula-se a distribuição de correntes nos eletrodos de aterramento, obtendo-se a densidade linear de corrente σ (A/m), parâmetro de interesse.

2.2 Estimativa da região de ionização

A região de ionização é definida como a região onde o campo elétrico ultrapassa o valor crítico E_c . Este valor depende das características do solo e da forma de onda. Em (7) Geri sugere o valor de 300 kV/m e a CIGRE (8) adota o valor de 400 kV/m. Este último valor será considerado.

O valor da densidade superficial de corrente J (A/m²) é calculada a partir da relação dada pela resistividade do solo ρ :

$$E = \rho \cdot J, \text{ ou } J = E_c / \rho \quad \text{Eq (1)}$$

A área da superfície em contato com o solo de um eletrodo cilíndrico de raio r e comprimento L , desprezando as extremidades, é dada por

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad \text{Eq (2)}$$

Como a relação entre a densidade de corrente superficial e a linear é :

$$S \cdot J = L \cdot \sigma, \text{ ou } 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot J = L \cdot \sigma \quad \text{Eq (3)}$$

O valor de r é determinado por:

$$r = \sigma / (2 \cdot \pi \cdot J) \quad \text{Eq (4)}$$

Repete-se a simulação com o novo valor de r e ajusta-se a condição de contorno de tensão para obter a densidade linear de corrente especificada. Repete-se este procedimento até uma convergência adequada.

3.0 – RESULTADOS OBTIDOS

O estudo foi realizado em um cruzamento entre uma LT e duto enterrado de 14" com revestimento. A Figura 1 mostra a situação. Cada cabo contrapeso tem raio de 1 cm e cerca de 20 metros de comprimento, situação padrão em diversas concessionárias, enterrado a 1 metro de profundidade. Considerou-se que o duto está na mesma profundidade, pior caso no ponto de vista do risco.

A forma de onda da corrente de descarga atmosférica é 10/350 μ s. A amplitude total da corrente incidente sobre o cabo para-raio é de 100 kA e assumiu-se que metade da corrente é injetada no aterramento da torre, 50 kA. O duto está a 3 metros de distância da extremidade dos contrapesos.

A resistividade do solo foi considerada em 1000 Ω .m, e a permissividade relativa $\epsilon_r = 10$. Este valor de resistividade já é alto o suficiente para que o fenômeno de ionização se manifeste com grande intensidade.

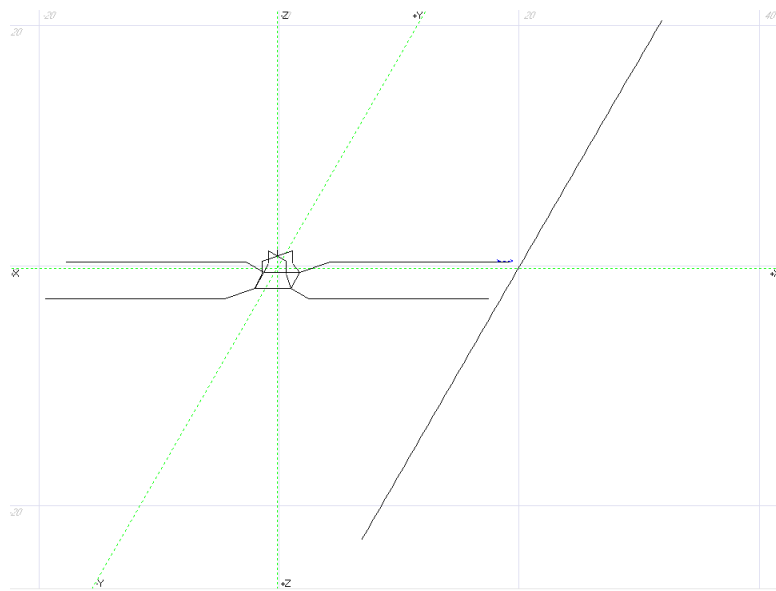


Figura 1 – Geometria da travessia

3.1 Situação sem ionização

O HIFREQ, utilizado para a análise da distribuição de corrente original faz uma análise espectral da corrente aplicada no domínio da frequência e executa a simulação em cerca de 100 frequências, invertendo os resultados com uma transformada inversa para obter os resultados no domínio do tempo. A Figura 2 mostra o resultado do conteúdo espectral. As operações no domínio da frequência são sempre lineares, de forma que o efeito da ionização do solo será considerado no próximo passo.

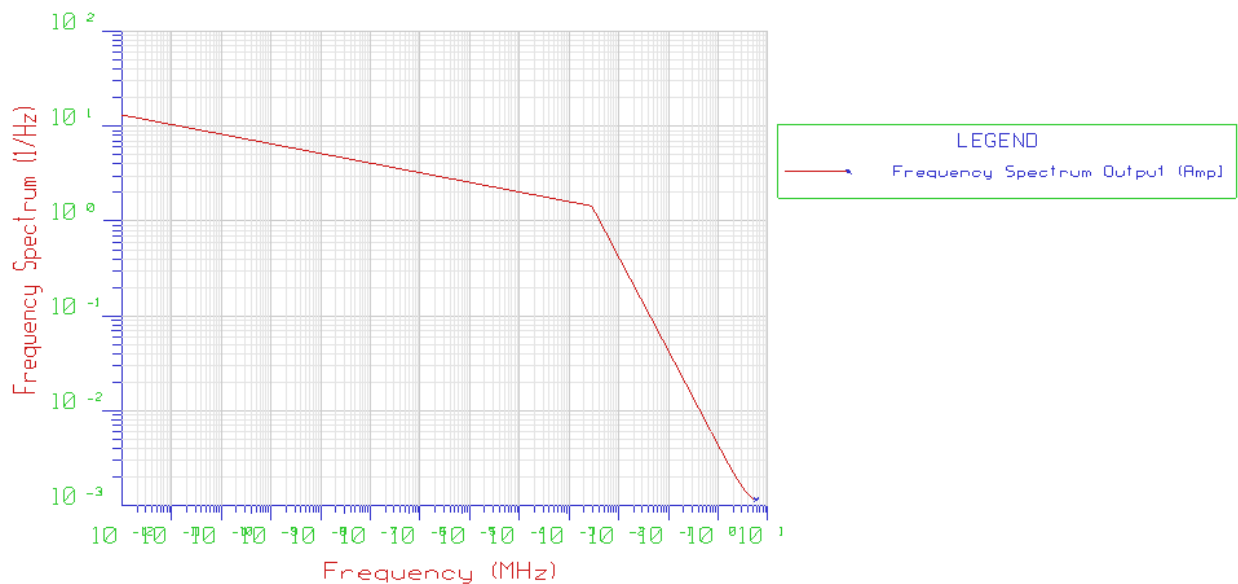


Figura 2 – Densidade espectral

A ferramenta segmenta o comprimento de cada contrapeso em comprimentos da ordem de 2 metros para melhor calcular as correntes. A Figura 3 mostra a elevação de potencial (GPR) nos últimos 2 metros do contrapeso mais próximo ao duto. Observa-se que o valor de pico é de aproximadamente 1400 kV.

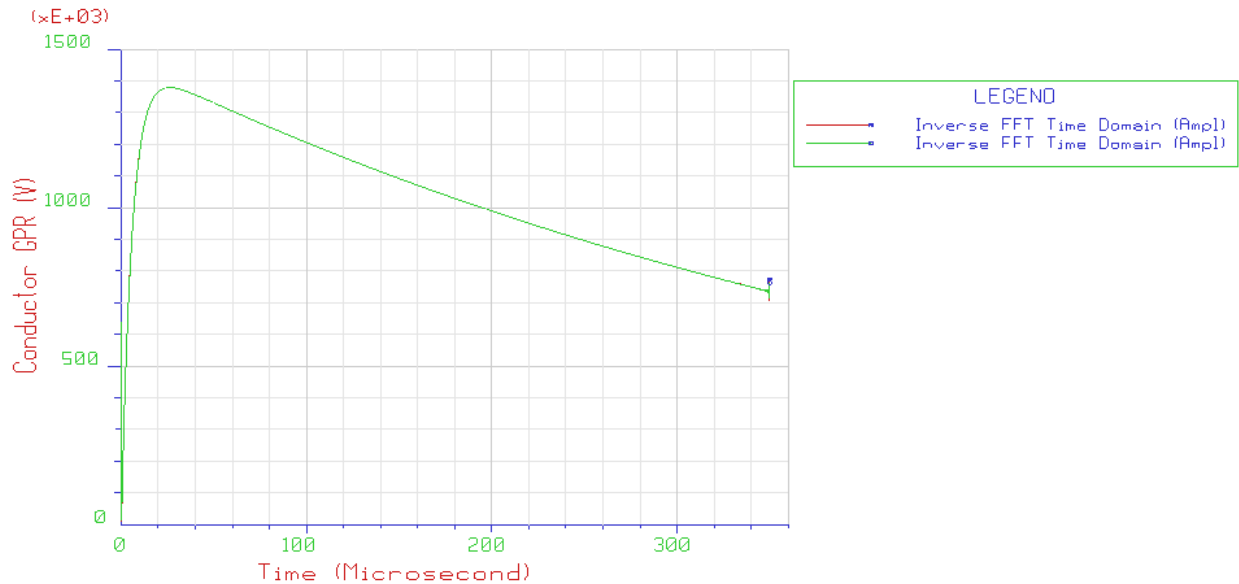


Figura 3 – Elevação de potencial (GPR)

A Figura 4 mostra o valor total da corrente fluindo pelos dois últimos segmentos do contrapeso, com valor de pico de 1700 A no segmento externo. Como cada segmento tem 2 metros de comprimento, é possível estimar o valor da densidade de corrente linear em:

$$\sigma = 1700/2 = 850 \text{ A/m}$$

Eq (5)

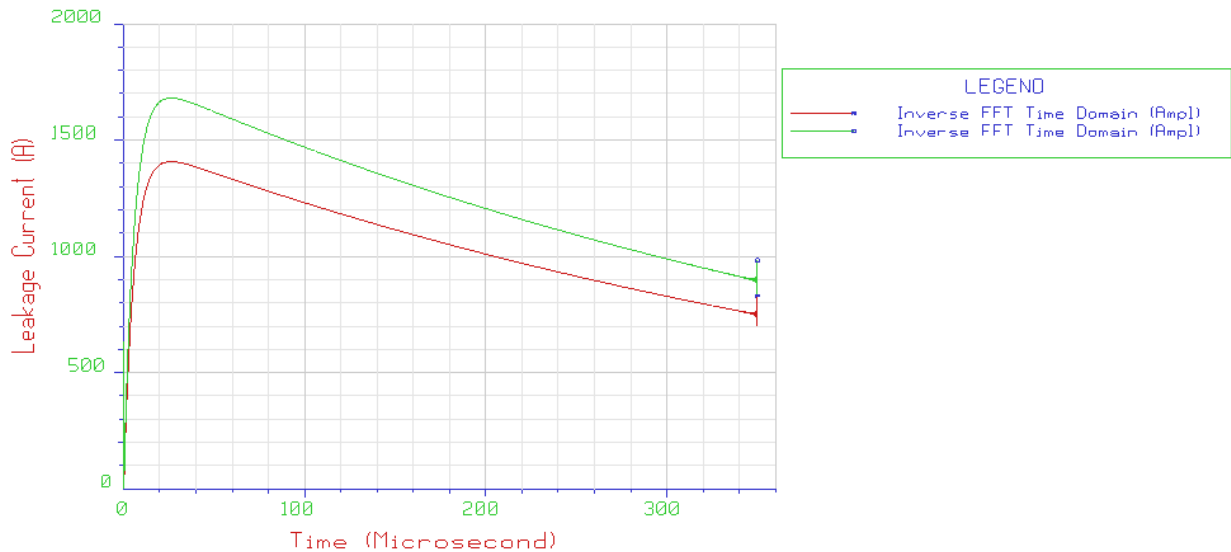


Figura 4 – Elevação de potencial (GPR)

3.2 Situação com ionização

Como o campo elétrico crítico E_c é conhecido e também a resistividade, é fácil estimar a densidade de corrente superficial máxima que poderá ser encontrada sobre os condutores pela Eq. (1):

$$J = 400e3/1e3 = 400 \text{ A/m}^2$$

Eq (6)

O novo valor do raio dos contrapesos será, pela Eq (4)

$$r = 850 / (2 \cdot \pi \cdot 400) = 33,8 \text{ cm}$$

Eq (7)

A nova análise será feita com a ferramenta de elementos finitos, capaz de estimar com melhor exatidão o valor do campo elétrico próximo aos condutores.

A Figura 5 mostra o domínio da simulação 2D axi-simétrica, com uma haste de 3 metros de comprimento representando a extremidade do cabo contrapeso, uma caixa de 30 cm de lado representando o duto revestido, com um defeito de 1cm de raio. A caixa de solo tem 15 metros de profundidade e raio de 6 metros. A solução foi executado no domínio harmônico, com frequência de 60 kHz para considerar as correntes de deslocamento. A linha no centro da haste é apenas um auxiliar da malha de elementos finitos.

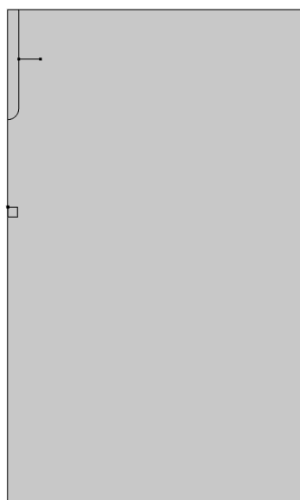


Figura 5 – Domínio de elementos finitos

A Figura 6 mostra o mapa de cores do potencial elétrico, observa-se que o potencial máximo do contrapeso foi de 365 kV .

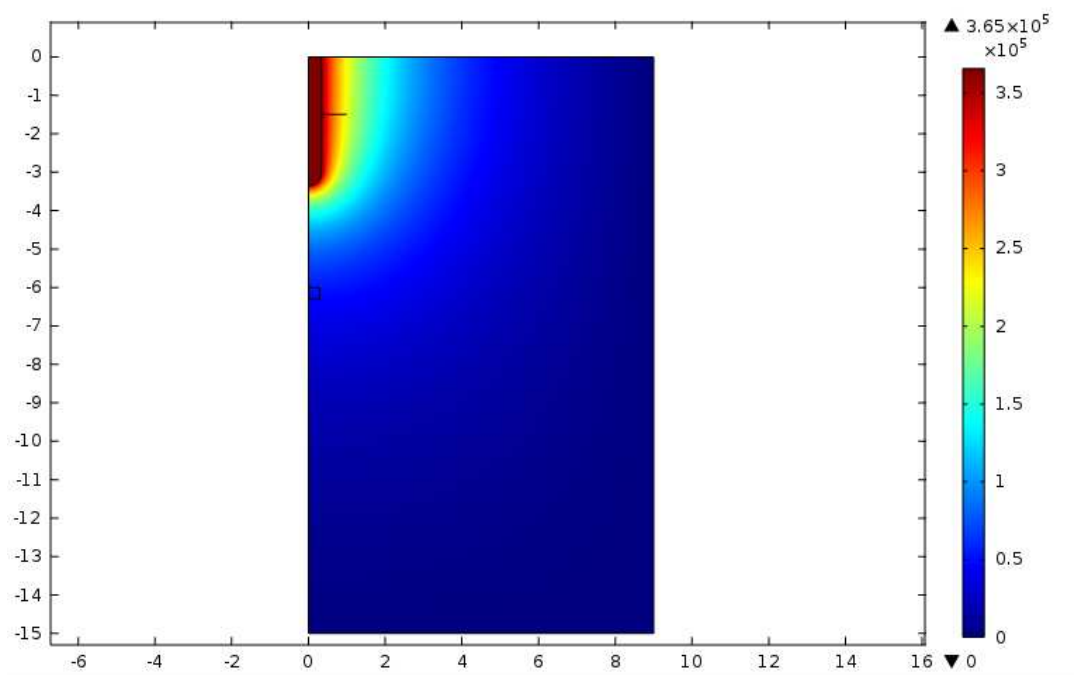


Figura 6 – Potencial elétrico no domínio

A Figura 7 mostra um mapa de curvas de nível do campo elétrico em redor da haste. A linha de 1.0×10^5 corresponde a 100 kV/m e as linhas seguintes tem intervalo de 100 kV/m, observa-se que a linha de 400 kV/m se estende até 3,5 metros, cerca de 16 cm a mais que o metal do contrapeso.

Assim, comparando-se a posição original da extremidade do contrapeso a 3 metros, observa-se que a ionização se estenderá por 0,5 metros na extremidade do contrapeso, ponto mais crítico pois é a região de maior campo elétrico.

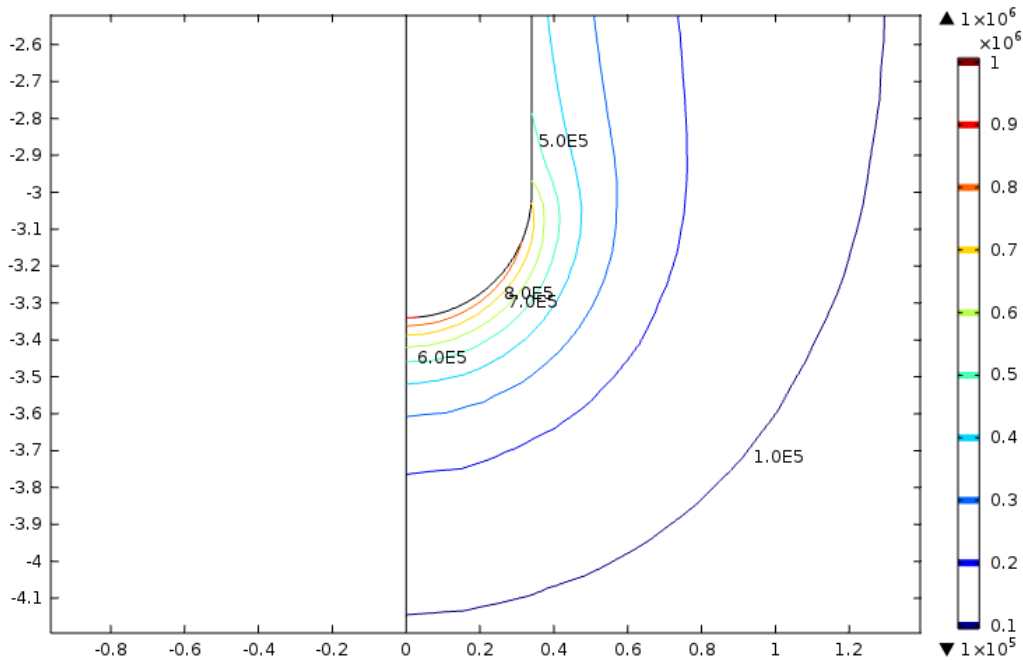


Figura 7 – Curvas de nível do campo elétrico no contrapeso

A Figura 8 mostra as curvas de nível do campo elétrico em redor do defeito. A posição da superfície do defeito é a 6 metros de profundidade, pode-se observar que a curva de 400 kV/m está em 5,97 metros, ou seja, a ionização ocorrerá em uma extensão de apenas 3 cm em redor do defeito. As linha logo acima do defeito são suporte de malha, não são funcionais.

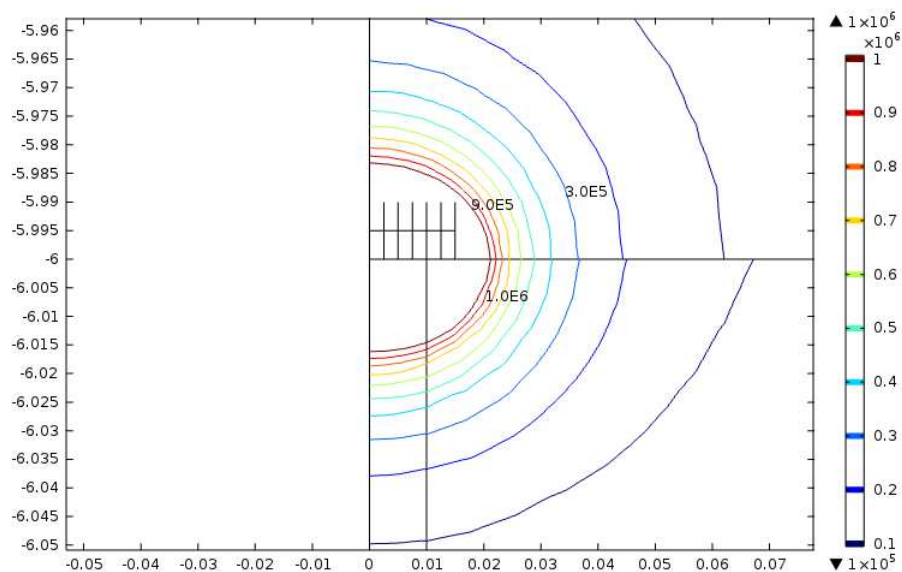


Figura 8 – Curvas de nível do campo elétrico na região do defeito

Considerando o valor anterior de 50 cm de ionização na extremidade do contrapeso, a extensão total do trecho ionizado será de 53 cm.

Como o raio da região de ionização é proporcional ao produto $\rho \cdot \sigma$ e inversamente proporcional a E_c , variações nestes parâmetros terão impacto direto na estimativa da região ionizada.

Por exemplo, uma LT com o dobro do comprimento de contrapeso em uma região com resistividade 10 vezes maior apresentará uma área ionizada com cerca de 5 vezes o raio calculado para este caso, ou seja, 2,65 metros para corrente de 50 kA. Como em áreas de alta resistividade é necessário aumentar o comprimento dos cabos contrapesos para controlar back-flashover, uma distância de 5 metros será suficiente para evitar ionizações para as situações típicas de torres de LT, cobrindo um produto $\rho \cdot \sigma$ de 10^9 V/m.

Considerando que a distância entre o duto e o contrapeso seja maior que o raio de ionização não haverá formação de arco elétrico, a densidade de corrente no metal do duto será limitada pela densidade de corrente máxima admissível e pela área ionizada na região do defeito, assim, para este caso:

$$S_{\text{defeitoion}} = 0.5(4.\pi.0,03^2) = 5,65e-3 \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{Eq (8)}$$

$$J_{\text{defeito}} = I_{\text{defeito}} / S_{\text{defeito}} = (400 \cdot 5,65e-3) / 0,00314 = 2,26 / 0,00314 = 7200 \text{ A/m}^2 \quad \text{Eq (9)}$$

Estudos efetuados em (9) mostram que impulsos de corrente com forma de 12/550 μ s e 85 kA de pico provocaram aquecimento da ordem de 150 °C em aço. Como a corrente total injetada no defeito é de 2,26 A para o caso calculado, não se espera qualquer tipo de dano à parede metálica do duto. Assim, uma vez garantido que não ocorrerá arco elétrico não há expectativa de ameaça à integridade da parede metálica do duto.

3.0 - CONCLUSÃO

O modelo utilizado permitiu a avaliação da região ionizada na interação cabo contrapeso com defeito em revestimento de duto enterrado.

Os resultados sugerem que uma distância de 5 metros entre o cabo contrapeso e o duto previne a formação de arco elétrico entre as duas estruturas mesmo em condições adversas de resistividade e correntes de descarga, eliminando, consequentemente, o risco de danos na parede metálica dos dutos enterrados.

Recomenda-se o aprofundamento dos estudos visando o desenvolvimento de um modelo mais robusto para o comprometimento do campo elétrico crítico em função da resistividade do solo.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MARTINHO, L. B.; VERARDI, S. L. L.; PEREIRA FILHO, M. L.; PALIN, M. F.; SILVA, V. C.; LAURINO, E. W.; ALBERTINI, J. A. C.; PIMENTA, G. S.; CARDOSO, J. R. . "Estudo da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos de óleo ou gás pelo método dos elementos finitos em três dimensões". XXI SNPTTE - 21o. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2011, Florianópolis. Anais do XXI SNPTTE, 2011.
- (2) MUNTEANU et all, "3D Numerical Computation of the Induced Potential Distribution on Buried Pipelines by Neighbor HV Lines Working on Normal and Fault Conditions", 2010 Cigre Session, Paris, France, August, 22-27, 2010.
- (3) VISACRO, S., "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, N. 1, January 2007, pp 381-386.
- (4) HIFREQ , Safe engineering, www.sestech.com
- (5) COMSOL , www.comsol.com
- (6) SALARI, J. C., PORTELA, C. Grounding Systems Modeling Including Soil Ionization. IEEE Trans. On Power Delivery, VI 23, N 4, Oct 2008, p 1939-1945.
- (7) GERI, A. Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999. P 1008-1017.
- (8) CIGRE Working Group on Lightning, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines" CIGRE Guide no. 63, Paris, France, October 1991.
- (9) METWALLY, I. A., A_RAHM, . A, REIDLER, F., ZISCHANK, W. . Computation of transient-temperature profiles in objects exposed to simulated lightning currents. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Mário Leite Pereira Filho - (Codó – MA , 1957). Graduado em Engenharia Elétrica em 1980, Mestrado em Sistemas de Aterramento em 1999 e Doutorado em Campos Eletromagnéticos em 2000. Atualmente é o líder do Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos do IPT, atuando em projetos de compatibilidade eletromagnética, sistemas de aterramento e qualidade de energia. É membro do CIGRE e IEEE.