

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação de modelos computacionais para simulação do sistema de aterramento de torres de transmissão e cálculo da tensão de stress imposta ao revestimento isolante de tubulações enterradas

Amauri G. Martins Jr.^a, Antônio Carlos R. Valente^b, Paulo César de O. Teixeira^c

Abstract

Describes a typical interference case between a 500 kV transmission line and a 12 km long gas pipeline with diameters 8” and 10”, buried in heterogeneous and anisotropic soil. A phase-to-ground fault is simulated on the transmission line for evaluation of induced pipeline coating stress voltages. Results from two different calculation models are presented and compared. The first model, based on a circuital nodal analysis method and widespread amongst commercially available software, assumes that: 1) tower grounding is a punctual current source; 2) soil is uniform; and 3) buried conductors are equipotential. The second model, which relies on the numerical solution of the time-domain Maxwell’s Equations, accounts for the spatial distribution of the tower grounding (counterpoises), multi-layer soil structure and conductors’ self-impedance. The advantages and disadvantages of each model are discussed, along with their effectiveness and validity domain, aiming towards the preservation of pipeline integrity, the environment and personnel safety. Emphasizes the ethical aspects and responsibilities of the professional in charge of such studies in adopting realistic and reliable methods.

Keywords: AC Interference, Electromagnetic Interference, Numerical Methods, Mitigation, AC Induced Voltage

Resumo

Descreve um caso típico de interferência entre uma linha de transmissão em alta tensão de 500 kV e um gasoduto em aço carbono com aproximadamente 12 km, diâmetros 8” e 10”, enterrado em solo heterogêneo e anisotrópico. É simulada a ocorrência de falta monofásica fase-terra na LT, para análise das tensões de stress impostas ao revestimento do duto. Os resultados de dois modelos computacionais distintos são apresentados e comparados. O primeiro, baseado em um método de análise circuital nodal e implementado por uma série de softwares comercialmente disponíveis, considera que: 1) o aterramento da torre é uma fonte concentrada de corrente; 2) o solo é uniforme; e 3) os condutores enterrados são equipotenciais. O segundo modelo, fundamentado na solução numérica das Equações de Maxwell no domínio do tempo, leva em conta a distribuição espacial do aterramento das torres (contrapesos), a estratificação do solo em camadas e as impedâncias próprias dos condutores. São discutidas a eficácia, vantagens e desvantagens de cada modelo, bem como respectivos domínios de validade, com vistas à preservação da integridade do duto e, principalmente, do patrimônio humano e ambiental. Enfatiza as implicações éticas e a

^a Engenheiro Eletricista – ENGENHARIA DE CORROSÃO LTDA

^b Engenheiro Eletricista – COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO – COMGÁS

^c Engenheiro Eletricista – CIA. DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP

responsabilidade do profissional encarregado de tais estudos em adotar métodos precisos, confiáveis e realistas.

Palavras-chave: Interferências AC, Interferências eletromagnéticas, Métodos numéricos, Mitigação, Tensão AC induzida.

Introdução

A influência eletromagnética de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão sobre tubulações metálicas vem sendo abordada por especialistas de todo o mundo há, pelo menos, quarenta anos e o tema, no entanto, permanece atual e ainda impõe desafios. No Brasil, a expansão da malha dutoviária, os investimentos no setor elétrico e os regulamentos ambientais cada vez mais restritivos em relação ao uso do espaço vêm tornando cada vez mais frequentes os casos de interferência, ou mesmo compartilhamento, de faixas de servidão.

Um duto metálico, quando exposto aos condutores energizados de uma linha de transmissão (LT), é sujeito a uma variedade de fenômenos, que resultam na indução de tensões AC ao longo de seu traçado, decorrentes dos acoplamentos indutivo, condutivo e capacitivo entre as estruturas, em regimes permanente e transitório. Os mecanismos de acoplamento são função direta da geometria das instalações, tipo e disposição dos condutores, configuração dos contrapesos, classe de tensão, níveis de corrente, tipo de revestimento do duto e resistividade elétrica do solo, dentre outros, e acarretam riscos potenciais à integridade das instalações e das pessoas envolvidas, principalmente: choque elétrico por tensões de toque ou passo, ruptura do dielétrico do revestimento isolante, danos por imposição de corrente ao metal e equipamentos ligados ao duto e corrosão AC.

Por se tratar da interação de dois sistemas críticos, que demandam alta disponibilidade e possuem elevadas classificações de risco, a única estratégia viável para lidar com o problema é a predição, durante a fase de projeto das instalações, e a mitigação, caso se constate alguma violação provável aos critérios de segurança preceituados [1]. Para tanto, estão disponíveis no mercado diversos algoritmos de simulação numérica os quais, com o crescimento do poder computacional, vêm produzindo resultados progressivamente mais realistas.

Algoritmos de cálculo obsoletos tendem a admitir premissas e simplificações matemáticas nem sempre precisas, o que pode levar a duas respostas extremas: os resultados são mascarados e riscos reais deixam de ser previstos, ou são demasiadamente conservadores, ocasionando gastos excessivos com projetos de mitigação.

Um modelo de simulação numérica comumente adotado por uma série de softwares comerciais considera o aterramento das torres da LT como um elemento concentrado, imerso em meio uniforme com resistividade elétrica ρ . No modelo de aterramento concentrado, ilustrado na Figura 1, a estrutura em falta se comporta como uma fonte hemisferoidal de corrente I , produzindo uma elevação de potencial no solo U em um ponto P , que se demonstra em [2] ser dada por:

$$U = \alpha \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

Em que:

- α = constante função da geometria do eletrodo de aterramento, sendo unitário para fonte puntiforme;
 ρ = resistividade elétrica do solo, em $\Omega.m$;
 I = corrente de falta drenada ao solo, em A;
 r = distância ao ponto de observação, em m.

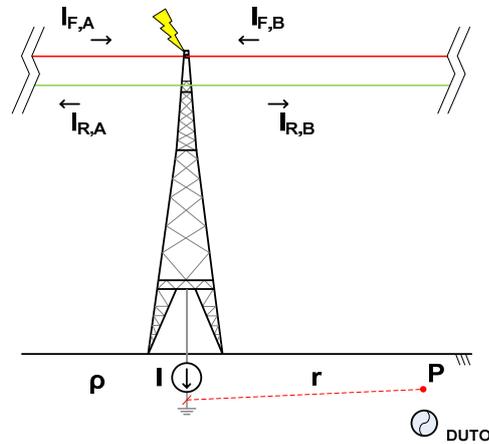


Figura 1 - Ilustração esquemática do modelo de aterramento concentrado

Modelos computacionais mais completos levam em consideração as dimensões físicas e constituição dos condutores que compõem o aterramento das torres, usualmente denominados cabos contrapeso, assim como a estratificação do solo em camadas com espessuras e resistividades distintas. No modelo de aterramento distribuído, esquematizado na Figura 2, os condutores de aterramento são subdivididos em segmentos, pequenos o bastante a ponto de se comportarem como fontes concentradas. Os valores de corrente I_j , drenados ao solo por cada fonte equivalente, são função da impedância própria do condutor de aterramento. A influência da heterogeneidade do meio é expressa em termos de coeficientes de reflexão entre camadas de solo adjacentes.

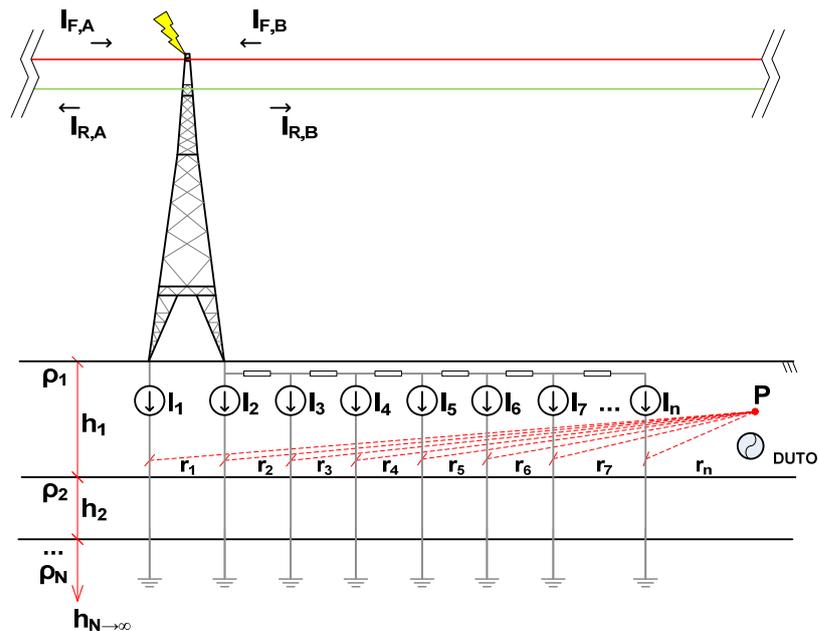


Figura 2 - Ilustração esquemática do modelo de aterramento distribuído

Nestas condições, pode-se demonstrar [3] que a elevação de potencial no solo U , no ponto de observação P , é na forma da expressão abaixo:

$$U = \frac{\rho_1}{2\pi} \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{r_j} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{2ih_1}{r_j} \right)^2}} \right] \quad (2)$$

Sendo:

ρ_1 = resistividade elétrica do solo na camada superior, em $\Omega.m$;

I_j = corrente drenada por cada fonte ao solo, em A;

r_j = distância da fonte ao ponto de observação, em m;

k_i = coeficiente de reflexão entre duas camadas de solo adjacentes, definido por $(\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i)$;

h_1 = espessura da camada superior do solo, em m;

i = n°. da camada observada.

Este trabalho apresenta a resposta dos dois modelos de simulação numérica descritos para um dado problema de interferência eletromagnética, com o objetivo de evidenciar os parâmetros significativos e sob que condições os resultados podem ser considerados válidos. Não se pretende aqui abordar analiticamente os fenômenos de acoplamento magnético ou cálculos de curto-circuito, nem desenvolver o equacionamento dos métodos numéricos envolvidos, uma vez que são tópicos ricos em conteúdo e merecedores de atenção exclusiva. Aos interessados sugere-se as referências: [4][5][6].

Espera-se contribuir com informação aos operadores de dutos e de linhas de transmissão, notadamente os incumbidos da tomada de decisão em processos autorizativos e termos de ajuste, oferecendo, assim, subsídios à construção de instalações seguras e econômicas.

Metodologia e dados gerais do estudo de caso

É estudado um caso real de cruzamento entre uma linha de transmissão de energia elétrica em 500 kV e um gasoduto em aço carbono com diâmetros 8" e 10", revestimento polietileno em tripla camada e 12 quilômetros de comprimento. As características relevantes do gasoduto e da linha de transmissão são relacionadas, respectivamente, nas tabelas 1 e 2. Os dados geométricos do gasoduto e da linha de transmissão foram fornecidos pelas concessionárias envolvidas e são apresentados na Figura 3.

Tabela 1 - Parâmetros gerais do gasoduto

Diâmetro nominal do duto	12" / 10"
Espessura da parede do duto	9,5 / 9,2 mm
Resistividade elétrica do aço	$1,72 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
Permeabilidade magnética do aço	$3,77 \times 10^{-4} H/m$
Espessura média do revestimento	3,0 mm
Resistividade elétrica revestimento	$10^8 \Omega \cdot m$

Tabela 2 - Parâmetros gerais da linha de transmissão

Comprimento	~183.000,00 m
Total de estruturas	549
Condutor Fase	3 × CAA ACSR 1113,0 MCM
Condutor Pára-raios	2 × AÇO ½" EHS
Vão médio	334,0 m
Aterramento / Contrapesos	4 × 150,0 m
Corrente nominal	2729,0 A

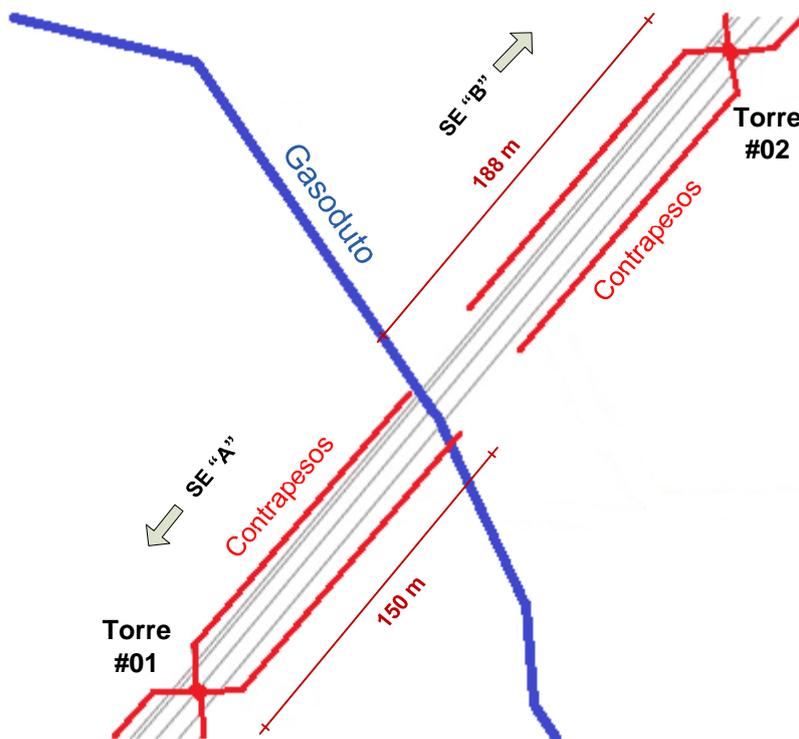


Figura 3 - Visão geral da aproximação entre gasoduto e LT

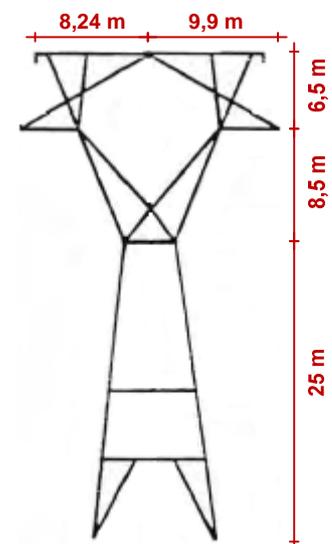


Figura 4 - Silhueta típica das torres

Os níveis de curto-circuito adotados para simulação foram obtidos a partir da base de dados ANAFAS divulgada pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, ligada ao Ministério de Minas e Energia, com horizonte de planejamento 2020, e são resumidos abaixo:

Tabela 3 - Níveis de curto circuito nas subestações terminais

Subestação	Monofásico	Resistência Aterramento
SE "A"	23,73 ∠ -84,56 kA	1,0 Ω
SE "B"	27,39 ∠ -87,22 kA	1,0 Ω

A resistividade elétrica do solo foi medida nas regiões próximas às torres da travessia, empregando o método dos quatro pinos (Wenner) em conformidade com o disposto na norma ABNT NBR-7117 [7], para as profundidades de: 1,5 m; 3,0 m; 4,5 m; 6,0 m; 9,0 m e 18,0 m. As leituras foram realizadas perpendicularmente ao eixo da linha de transmissão, e distantes de 10,0 m dos contrapesos, de modo a evitar distorções por indução e acoplamento resistivo com os condutores de aterramento. Os dados utilizados nos cálculos são relacionados na tabela e figuras seguintes:

Tabela 4 - Resistividade elétrica do solo para as Torres #01 e #02

Ponto de medição	Solo uniforme	Estratificação do solo em duas camadas		
	ρ	ρ_1	ρ_2	h_1
Torre #01	528,0 Ω .m	531,15 Ω .m	1864,75 Ω .m	3,12 m
Torre #02	382,0 Ω .m	381,28 Ω .m	1493,04 Ω .m	1,20 m

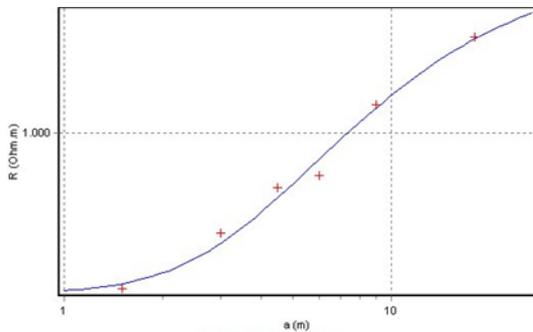


Figura 5 - Estratificação do solo em duas camadas para a Torre #01

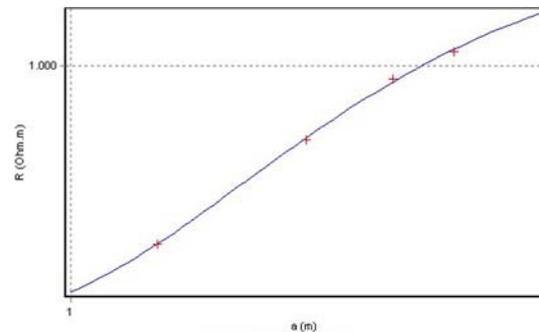


Figura 6 - Estratificação do solo em duas camadas para a Torre #02

A partir dos dados disponíveis foi obtido o perfil de tensões impostas ao revestimento isolante do duto, na hipótese de ocorrência de uma falta monofásica fase-terra na Torre #01. Visando a um posicionamento imparcial, os modelos foram construídos utilizando os módulos de software denominados SESTLC (aterramento concentrado) e HIFREQ (aterramento distribuído), integrantes do pacote computacional CDEGS, ambos desenvolvidos pelo mesmo fabricante (SES – Safe Engineering Services Ltd.) e reconhecidos como validados experimentalmente [8][9].

O software CDEGS (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis* – distribuição de corrente, campos eletromagnéticos, aterramento e análise da estrutura do solo) é um conjunto integrado de ferramentas de engenharia, destinado a análises de problemas relacionados a sistemas de aterramento, campos eletromagnéticos e interferências eletromagnéticas. Uma descrição sucinta dos métodos numéricos empregados pelos módulos utilizados neste trabalho é apresentada abaixo.

O SESTLC é um analisador de linhas de transmissão baseado em teoria de circuitos elétricos, utilizado para estimativas rápidas de parâmetros de linha, tensões induzidas em regimes permanente ou de falta, campos elétricos e magnéticos, associados a configurações arbitrárias de linhas de transmissão e estruturas interferidas, no caso de solo uniforme. Seu algoritmo de cálculo segue três etapas principais:

1. Os parâmetros de linha de transmissão são calculados com base na aproximação por um plano complexo de retorno para representação de solos de resistividade não-nula, proposta por Deri *et al* [10] e aprimorado posteriormente por outros pesquisadores. É levada em consideração a resistividade elétrica média do solo.
2. Utilizando teoria de circuitos, são computadas as correntes de retorno nos condutores neutro ou pára-raios, em regimes permanente e transitório, a partir do que são calculadas as forças eletromotrizes induzidas (FEM).
3. A estrutura interferida, ou circuito vítima, é subdividida em segmentos (vãos ou seções). A força eletromotriz total calculada na etapa anterior, o potencial no espaço (por acoplamento capacitivo com a linha exposta) e a elevação de potencial no solo causada pelas correntes nas torres são determinadas em cada segmento. Grandezas elétricas em cada segmento, tais como elevação de potencial do solo, correntes longitudinais e correntes de fuga são determinadas por um modelo de circuito π recursivo, considerando as impedâncias em série e as admitâncias *shunt* de todos os segmentos.

O módulo de computação HIFREQ baseia-se na solução das Equações de Maxwell para redes arbitrárias de condutores aéreos e/ou enterrados, na presença de solo com múltiplas camadas. É levada em conta não apenas a impedância própria dos condutores, mas também os acoplamentos indutivo, capacitivo e condutivo (impedâncias mútuas) entre todas as estruturas modeladas. O HIFREQ é utilizado em estudos de regime permanente ou transitório e frequência arbitrária, para casos complexos de aterramento elétrico, descargas atmosféricas e compatibilidade eletromagnética, dentre outros. No HIFREQ, o cálculo de campos eletromagnéticos ocasionados por condutores energizados é um processo em duas etapas principais:

1. A distribuição da corrente ao longo dos condutores é obtida por meio do Método dos Momentos (MOM).
2. Os campos eletromagnéticos originados por estas correntes circulantes são computados pela solução numérica da integral de Sommerfeld [11], aplicada a um meio composto por camadas horizontais de materiais com respectivas resistividades elétricas, permissividades elétricas e permeabilidades magnéticas.

Foram executados dois modelos SESTLC, sendo um com a fonte de falta posicionada no local da torre, outro com a fonte deslocada para a extremidade do contrapeso, de modo a considerar a distância efetiva entre o aterramento da torre e o gasoduto. Também foram executados dois modelos HIFREQ, ambos utilizando a posição real da torre e a disposição dos contrapesos, porém um com solo uniforme, outro com solo estratificado em duas camadas.

Além da resposta numérica, foi avaliado o tempo computacional necessário para execução de cada modelo, dado que os cálculos foram realizados em uma máquina com processador de 2 GHz e 2 núcleos, com 4 GB de memória RAM, sistema operacional de 64 bits.

A resistência de aterramento das torres foi considerada 5 Ω para a torre em falta e 15 Ω para as demais torres da linha de transmissão nos modelos SESTLC. Para os modelos HIFREQ, a resistência de aterramento real dos contrapesos foi calculada, em função das resistividades do solo.

Resultados e discussão

O valor máximo provável da tensão imposta ao revestimento do duto para cada simulação e respectivos tempos computacionais são sumarizados na Tabela 5. Os perfis de tensão resultantes são apresentados na Figura 7. As curvas correspondem ao somatório das contribuições de ambas as torres da travessia.

Tabela 5 - Resultados gerais para cada simulação

Curva	Simulação	Máxima tensão provável	Desvio	Tempo computacional
1	SESTLC, Fonte s/ Torre	5,68 kV	22,81%	2 min, 23 s
2	HIFREQ, Solo Uniforme	27,98 kV	14,21%	1 h, 42 min, 19 s
3	HIFREQ, Solo 2 Camadas	48,23 kV	6,41%	1 h, 45 min, 26 s
4	SESTLC, Fonte Deslocada	177,5 kV	43,43%	3 min, 21 s

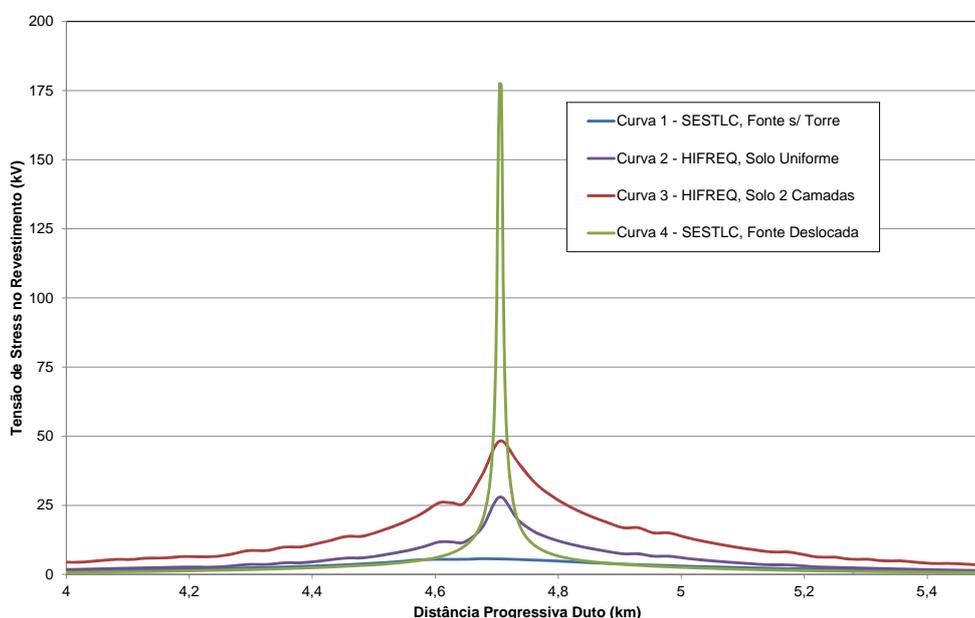


Figura 7 - Gráfico de tensão de stress no revestimento versus distância

As simulações mostram que a tensão AC induzida no duto é causada predominantemente por acoplamento condutivo pelo solo. Como mostrado na Figura 3, os condutores contrapeso das torres se aproximam consideravelmente do gasoduto no local da interferência, chegando a cruzá-lo.

Por esta razão, no modelo de aterramento concentrado (Curva 1), o pico de tensão imposta ao revestimento é baixo, com magnitude inferior ao limiar de suportabilidade nominal para o polietileno em tripla camada, qual seja: 25 kV. Este resultado poderia levar a uma conclusão precipitada de ausência de riscos à integridade do gasoduto.

No modelo de aterramento distribuído (Curvas 2 e 3), por outro lado, observa-se substancial transferência de energia da torre em falta para o gasoduto enterrado, uma vez que responde à

geometria real do sistema de aterramento das torres. Os valores verificados indicam risco de ruptura do revestimento do gasoduto, para o que se requer adoção de ações mitigadoras.

No modelo de aterramento concentrado modificado, isto é, com o artifício de se deslocar a fonte de falta para o ponto mais próximo da estrutura interferida (Curva 4), a totalidade da corrente de curto-circuito drenada ao solo é imposta ao duto, conduzindo a um parecer excessivamente conservador, cuja solução de mitigação é superdimensionada, desnecessária ou mesmo inviável, técnica e economicamente.

Os tempos de processamento são muito menores para o modelo de aterramento concentrado, o que se explica em razão das simplificações matemáticas admitidas. O algoritmo de cálculo para o modelo de aterramento distribuído realiza operações com matrizes esparsas com grande número de elementos, o que requer elevado esforço computacional, muito embora os tempos de execução indicados na Tabela 5 sejam considerados aceitáveis.

A comparação entre si das Curvas 2 e 3 demonstra, ainda, a influência da estrutura de solo na resposta do modelo de cálculo. Como descrito na Tabela 4, a resistividade elétrica do solo na camada profunda é superior à da camada superficial, ou seja: o coeficiente de reflexão entre as duas camadas é positivo. Da análise dos numeradores indicados na equação (2), o que se espera é um incremento na tensão de pico para o modelo em duas camadas, sendo o que se confirma pela comparação entre as curvas.

Conclusões

Foram apresentados dois modelos computacionais para simulação do sistema de aterramento de torres de transmissão e cálculo da tensão de stress imposta ao revestimento isolante de tubulações enterradas, sendo realizadas simulações de um caso real de cruzamento entre uma linha de transmissão e um gasoduto, utilizando, para efeitos comparativos, diferentes premissas de cálculo.

O modelo de aterramento concentrado apresentou imprecisões quando a distância entre a fonte de falta e a estrutura interferida é grande se comparada à distância elétrica efetiva, isto é: a menor distância entre o aterramento das torres e o duto. Tais imprecisões podem levar a julgamentos técnicos equivocados, com resultados insuficientes para assegurar a integridade do duto e a segurança de pessoas ou, no caso de adotadas premissas demasiadamente conservadoras, a projetos caros e pouco eficientes, quando não inviáveis.

O modelo simplificado é útil para estimativas rápidas e de caráter preliminar, não se recomendando sua adoção, nem aceitação, para estudos de casos complexos e/ou validação de projetos de mitigação. Para estes, estão disponíveis ferramentas confiáveis, consagradas pelo uso e validadas por meio de medições em campo.

Dos resultados provenientes do modelo de aterramento distribuído, constatou-se que a disposição espacial dos condutores contrapeso das torres da linha de transmissão, assim como a estrutura geofísica do solo, são parâmetros diretamente determinantes da resposta das simulações de interferências eletromagnéticas, não podendo ser negligenciados.

Considera-se, portanto, de importância fundamental que, na realização de estudos de interferências eletromagnéticas, sejam utilizados métodos numéricos realistas. Porém, é

igualmente necessário e que se zele pela qualidade das informações coletadas em campo, notadamente as medições de resistividade e o levantamento topográfico, em especial das distâncias entre as torres e as estruturas interferidas, com uso de instrumentos (terrômetro, GPS) precisos e devidamente calibrados, operados por equipes treinadas.

Os profissionais incumbidos da realização e validação de tais estudos são sujeitos a grande responsabilidade, ética, técnica, civil e criminal, caso ocorra um acidente causado pela implementação de um projeto de mitigação embasado em análises superficiais, sem detrimento da propositura de soluções técnicas viáveis e econômicas.

Agradecimento

Os autores agradecem publicamente aos colegas da SES – Safe Engineering Services (www.sestech.com), pelo suporte prestado na execução dos modelos HIFREQ, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências bibliográficas

- [1] ANSI / IEEE, **IEEE Std. 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY.
- [2] STEFANESCO S., SCHLUMBERGER C. & M., 1930, **Sur la Distribution Electrique Potentielle Autour d'une Prise de Terre Ponctuelle dans un Terrain a Couches Horizontales Homogenes et Isotropes**, Journal de Physique et Radium, Vol. I, Serie VII, No. 4, pp. 132-140.
- [3] MUSKAT M., 1933, **Potential Distribution About an Electrode on the Surface of the Earth**, Physics, Vol. 4, No. 4, April 1933, pp. 127-147.
- [4] J. R. CARSON, 1926, **Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return**, Bell Syst, Tech. J., No. 5, pp. 539-554.
- [5] J. MA, F. P. DAWALIBI, 1998, **Modern Computational Methods for the Design and Analysis of Power System Grouding**, Proceedings of the 1998 International Conference on Power Sytem Technology, Beijing, Aug. 18-21, Vol. 1, pp. 122-126.
- [6] CIGRÉ, **Working Group 36.02: Electromagnetic Compatibility with Telecommunication Circuits, Low Voltage Networks and Metallic Structures**, 1995, CIGRÉ, Paris, FR.
- [7] ABNT, **NBR-7117: Medição de resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)**, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [8] F. P. DAWALIBI, F. DONOSO, 1993, **Integrated Analysis Software for Grouding, EMF and EMI**, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp. 19-24.
- [9] S. FORTIN, W. RUAN and F. P. DAWALIBI, 2004, **Comparison of Computational Methods for the Design and Analysis of Power System Grounding: Parametric Analysis**, Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Clearwater Beach, FL, USA, November 28 - December 1, pp. 357-363.
- [10] DERI, A., TEVAN, G., SEMLYEN, A., et al., 1981, **The Complex Ground Return Plane: A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 100, n. 8 (Aug), pp. 3686–93.

[11] SOMMERFELD, A., **Partial Differential Equations in Physics**, Academic Press, New York, 196