

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM DUTOS AÉREOS

F. Moisés dos Santos¹, H. Padilha de Barros¹, J. M. Gurgel Neto², A. A. P. Silva², R. M. Lima Neta², J. A. Nascimento³

¹Centro Universitário Cesmac, Engenharia Elétrica, Maceió-AL

²Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Recife-PE

³Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Instituto de Computação (IC), Maceió-AL

moisaf@hotmail.com, neto.gurgel.moraes@gmail.com, alexsandroaleixo@yahoo.com.br, regina.mlmeta@gmail.com, jobson.nascimento@ic.ufal.br

Resumo - Neste artigo foi utilizado uma modelagem computacional para calcular os níveis de interferência eletromagnética gerados por linhas de transmissão em dutos metálicos aéreos, e analisar a sensibilidade do modelo em relação a: configurações geométricas da linha e dos dutos (distâncias horizontais e verticais) e níveis de tensão e corrente das linhas. Este modelo é capaz de calcular os níveis de interferência eletromagnética gerados por uma linha de transmissão, em dutos metálicos aéreos. Parâmetros estes que são necessários nas etapas do projeto e na escolha do material adequado. Tais níveis são avaliados, normalmente, pelos acoplamentos indutivos e capacitivos estabelecidos entre as linhas e os dutos.

Palavras-chave - Linhas de Transmissão, Interferência Eletromagnética, Configuração da linha.

MODELING OF COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN PIPELINE AIR

Abstract - In this article, we used a computational modelling to calculate the electromagnetic interference levels generated by transmission lines in aerial metal ducts, and analyse the sensitivity of the model in relation to: geometric configurations of the line and the ducts (horizontal and vertical distances) and levels voltage and current of the lines. This model is able to calculate the electromagnetic interference levels generated by a transmission line in air metal ducts. These parameters those are required in the stages of design and choice of suitable material. Such levels are evaluated, usually by inductive and capacitive coupling established between the lines and pipelines.

Keywords - Transmission lines, Electromagnetic Interference, geometric line configuration

I. Introdução

A área de estudo das interferências causadas por instalações elétricas sobre o meio ambiente e sobre

outras instalações denomina-se Ecologia Eletromagnética. Estudo esse necessário, principalmente, quando existem aproximações entre tubulações industriais como oleodutos, gasoduto, aquedutos e linhas de transmissão de energia elétrica (LT's).

O aumento das tensões induzidas em dutos é relevante, pois qualquer ser humano pode estar exposto ao risco de choque elétrico se estiver em contato com um duto, sujeito à influência de uma linha de alta tensão (AT). Se os dutos, em relação ao solo, apresentarem uma tensão elevada, podem causar danos aos equipamentos de monitoramento conectados a essa estrutura e a ação prolongada das tensões induzidas sobre os dutos pode causar danos na estrutura metálica dos mesmos, provocando, por exemplo, corrosão da proteção [1]. O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma modelagem computacional que para calcular os níveis de interferência eletromagnética, gerados por linhas de transmissão em dutos metálicos aéreos e analisar a sensibilidade do modelo em relação a: configuração geométrica da linha e dos dutos (distâncias horizontais e verticais) e níveis de tensão e corrente das linhas. Esse modelo será útil nas etapas de projetos ou na análise de projetos já existentes, podendo assim determinar qual tipo de material deve ser usado nos dutos a serem instalados.

Levando-se em consideração os níveis de suportabilidade de tensão induzida por acoplamento magnético com a elevação de potencial do solo pela dispersão da corrente, os níveis de tensão devem ser inferiores à tensão de perfuração de sua camada protetora.

A avaliação das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e dutos depende de três fatores:

- Regime de operação da linha;
- Localização do duto;
- Presença ou ausência de cabo para-raios.

O foco do estudo será baseado em regime permanente, é importante destacar que os níveis de tensões induzidas em regime transitório (curto-circuito, manobra ou descargas atmosféricas) podem ser maiores, porém com menores frequências.

II. Descrição do Sistema sob Estudo

A. Linhas de Transmissão

As quatro partes básicas que compõem o sistema elétrico de potências (SEP) no Brasil são: Geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica.

O objetivo é cumprir todas as etapas seguindo normas de confiabilidade, qualidade, disponibilidade, segurança, com menores custos e impactos ao meio ambiente.

Neste estudo, consideram-se linhas de transmissão como destinadas a transportar energia elétrica com tensão de operação nominal de 230 KV ou superior.

O desempenho de uma linha de transmissão aérea depende muito de suas características físicas, pois essas determinam o comportamento em regime normal de operação e os seus parâmetros elétricos. Fisicamente uma linha de transmissão é composta por uma parte ativa (condutores), e uma parte passiva (isoladores).

A regulamentação de uma faixa de passagem faz-se necessária a fim de garantir um bom desempenho da linha de transmissão aérea e principalmente a segurança dos seres vivos e estruturas [2].

De acordo com orientação técnica da [3], a largura mínima usual para linhas de 69 KV, 88 KV e 138 KV correspondem a 15 m para cada lado do eixo da linha de transmissão. Como observado, a faixa de servidão e de segurança da linha de transmissão constitui tema principal em normas e orientações técnicas de concessionárias de operação de linhas de transmissão [2], [3].

B. Interferências Elétricas entre Linhas de Transmissão e Dutos

Qualquer objeto metálico, localizado próximo a linhas de transmissão, fica sujeito aos acoplamentos resistivo, indutivo e capacitivo. De uma forma geral, pode-se afirmar que as tensões e correntes induzidas funcionam como se estivessem ligadas a uma fonte de tensão convencional. Esses efeitos, quando aplicados por tempo indeterminado, podem causar danos à estrutura e representar risco de choque elétrico às pessoas, animais ou equipamentos em contato com esses dutos [4].

Para o cálculo de níveis de campos elétricos (no nível do solo), gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, faz-se necessário o conhecimento das características geométricas da linha de transmissão e das distribuições de carga na superfície dos condutores, que está associada à tensão de operação da linha [1].

Daí a necessidade de desenvolver uma modelagem computacional para analisar, ainda na fase de anteprojeto, quais as tensões resultantes na tubulação com o objetivo de tomar medidas preventivas para redução de níveis de tensões induzidas e/ou decidir o material mais adequado a ser utilizado na instalação

dos dutos protegendo a própria instalação e as pessoas que entrem em contato com ele.

C. Acoplamentos Condutivo, Indutivo e Capacitivo.

O Condutivo ocorrendo uma falha fase-terra em um determinado ponto da estrutura de uma linha, ocorre uma injeção de corrente no solo através de todas as malhas de terra das estruturas da linha, sendo esse valor maior no ponto da falha, diminuindo sucessivamente na direção dos terminais da linha e aumentando nas estruturas próximas às subestações.

Desta forma, o potencial elétrico criado em qualquer ponto do solo, próximo a uma linha de transmissão, será igual ao somatório dos potenciais criado no ponto pela injeção de corrente no solo. Por uma questão de praticidade, pode ser considerado apenas os potenciais criados pelas estruturas mais próximas ao ponto de cruzamento com o duto.

Este tipo de acoplamento depende dos potenciais criados no solo e dos potenciais transferidos para o metal da tubulação em função das correntes de curtos-circuitos injetadas no solo pelas torres da linha de transmissão.

O acoplamento indutivo é mais evidenciado em dutos enterrados, ocorre pela formação de forças eletromotrizes (fems) induzidas, as quais são função das correntes circulantes nos cabos condutores da linha de transmissão, da impedância mútua linha de transmissão-tubulação, das características do metal e do revestimento da tubulação, da existência ou não de pontos de aterramento ou seccionamento do duto [5].

Sabe-se que tensões induzidas em condutores percorridos por corrente elétrica variável no tempo podem induzir força eletromotriz.

De acordo com experimentos de Faraday, um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo variável no tempo produz uma tensão induzida (chamada força eletromotriz ou simplesmente fem) em circuito fechado condutivo, o que gera um fluxo de corrente [6].

Assim, é possível que uma força eletromotriz apareça na superfície de um duto metálico nas proximidades de uma linha de transmissão.

Acoplamento capacitivo, considera-se um capacitor todo par de condutores separados por um dielétrico, em que pelo menos um destes esteja carregado de forma a propiciar um campo elétrico entre eles [7]. A indução eletrostática desse sistema promove um acúmulo de cargas de polaridades contrárias nas superfícies dos condutores, armazenando assim certa quantidade de energia.

Esse acúmulo de energia é o trabalho necessário para promover o deslocamento das cargas nos condutores. A razão entre essa quantidade de carga e a diferença de potencial entre os condutores é a constante chamada de capacitância [8].

Ou seja:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Onde:

- Q é a quantidade de carga elétrica;
- C a capacitância;
- V a diferença de potencial entre os condutores.

Conforme [9], a interferência capacitiva ocorre quando o duto possui uma boa isolamento em relação à terra. O duto recebe um potencial relativo ao solo que é proporcional à tensão nas linhas de transmissão.

Para o cálculo do campo elétrico produzido por uma linha de transmissão de alta tensão, assim como para outros sistemas, é necessária a solução das equações de Laplace e Poisson com a adoção de soluções de contorno especiais [7].

D. Dutos

O transporte dutoviário é o modo de transporte que utiliza um sistema de dutos - tubos ou cilindros previamente preparados para determinado tipo de transporte, formando uma linha chamada de dutovia ou via composta por dutos onde se movimentam produtos de um ponto a outro.

Os diâmetros dos dutos variam, principalmente, de acordo com o material transportado e a vazão desejada. No Brasil, a malha dutoviária é composta, principalmente, por dutos com diâmetros variando de 4 a 32 polegadas.

III. Cálculo do Campo Elétrico

Para o cálculo de níveis de campos elétricos (no nível do solo), gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, faz-se necessário o conhecimento das características geométricas da linha de transmissão e das distribuições de carga na superfície dos condutores, que está associada à tensão de operação da linha, [10].

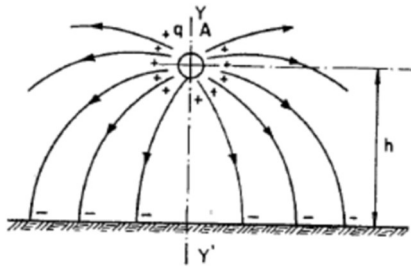


Figura1- Esquema de representação de uma LT monofásica.

Considerando o sistema (linha, ar e solo) linear, homogêneo, isotrópico e não dispersivo, o campo elétrico em um ponto qualquer (P), localizado na região entre os condutores e o solo (no ar), pode ser calculado utilizando-se a equação (2) abaixo,[6].

$$\vec{E} = \frac{\rho L}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{a}\rho \quad (2)$$

Onde:

- $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m - é a permissividade do vácuo;
- ρI - é a densidade linear de carga distribuída na superfície dos condutores (C/m)
- $\hat{a}\rho$ - é o vetor unitário que fornece direção e sentido ao campo elétrico e é a distância vertical entre a distribuição de carga e o ponto (P).

Essa equação é obtida por meio de manipulações da terceira equação de Maxwell (Lei de Gauss), [9], [11].

São também utilizados o Método das Imagens (MI) e o Teorema da Superposição. Para utilização do MI, o solo é considerado como um condutor elétrico perfeito (CEP), ou seja, sua condutividade tende a infinito. O efeito dos níveis de campo elétrico é substituído por cargas imagens, localizadas à mesma distância da interface de separação entre os dois meios e com densidade linear de carga de sinal contrário. A aplicação do MI pode ser representada pela Figura 2.

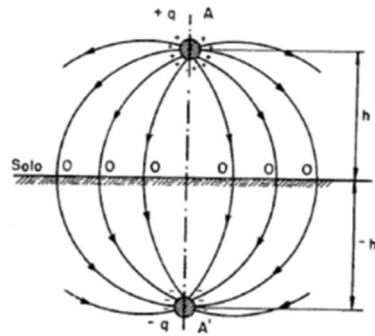


Figura2 - Aplicação de MI.

Com a aplicação do MI e o teorema da superposição, a expressão para cálculo do campo elétrico (equação 3), pode ser expandida conforme equação (3).

$$\vec{E} = \frac{\rho L}{2\pi\epsilon_0\rho R} \hat{a}\rho R - \frac{\rho L}{2\pi\epsilon_0\rho I} \hat{a}\rho I \quad (3)$$

- ρR é a distância entre o ponto de observação e a projeção vertical do mesmo no condutor real;
- ρI é a distância entre o ponto de observação e a projeção vertical do mesmo no condutor imagem;
- $\hat{a}\rho R$ é o vetor unitário que define direção e sentido do vetor campo elétrico (condutor real);
- $\hat{a}\rho I$ é o vetor unitário que define direção e sentido do vetor campo elétrico (condutor imagem).

Para uma linha de transmissão trifásica, devido ao fato de tratar-se de um sistema linear, o campo elétrico total pode ser obtido como a soma de todas as parcelas de campo geradas pelas distribuições de carga e suas imagens (teorema da superposição), [6], [10].

Para o cálculo de níveis de campos elétricos, gerados por linhas de transmissão, operando em regime permanente, cada condutor é caracterizado por um fasor de tensão (V), com partes real e imaginária. As cargas, por unidade de comprimento (C/m), nos condutores podem ser obtidas analiticamente ou por meio de métodos numéricos, [10], [12].

Segundo [11] o método numérico mais utilizado para o cálculo das cargas nos condutores e consequentemente dos níveis dos campos elétricos é o Método de Simulação de Cargas (MSC), pois envolve a solução de uma quantidade reduzida de equações lineares, quando comparado a outras técnicas, [12], [13].

O MSC apresenta como princípio básico a substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores por um conjunto discreto de distribuições de cargas fictícias (Singer, 1973). As cargas fictícias são determinadas respeitando as condições de contorno do problema (potenciais dos condutores e na interface ar-solo). O MSC pode ser expresso, matematicamente, por meio da equação (5) abaixo:

$$\rho L = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (4)$$

Na equação (4), tem-se-que:

- [V] é o vetor de tensões cujos elementos correspondem aos fasores de tensões dos condutores do sistema sob estudo (V).

- [P] é a matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell (m/F).

- [P]⁻¹ é a matriz de capacitância do sistema (F/m);

- ρI é o vetor de fasores de densidades lineares de carga em todos dos condutores do sistema sob estudo (C/m).

IV. Cálculo do Potencial Elétrico

Dado dois pontos quaisquer P e R (de uma região onde existe campo elétrico), os níveis de potencial no ponto P, em relação ao do ponto R, são obtidos, normalmente, mediante a solução numérica da integral de linha do campo elétrico (equação 3), dada pela equação (5) abaixo, [1], [12].

$$V_p - V_r = \int_r^p \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (5)$$

A solução da equação (6) para uma linha de transmissão monofásica, onde o condutor pode ser aproximado por uma linha infinita (com distribuição uniforme de carga por unidade de comprimento, ρL), Figura 1, é dada pela equação (6), a seguir:

$$V_p = \frac{\rho L}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{\rho R}{\rho P}\right) + V_R \quad (6)$$

Deve-se conhecer o potencial no ponto de referência R. Na equação (7), e são as distâncias verticais, respectivamente, dos pontos P e R ao condutor da linha de transmissão. Normalmente, a referência de potencial corresponde à superfície do solo. Como

o solo é um condutor elétrico perfeito, =0. Neste caso, ρR = H.

Utilizando-se o método das imagens, a expressão para o cálculo dos níveis de potencial, é dada pela equação (8), conforme ilustrado na (Figura 3).

$$V_p = \frac{\rho L}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{\rho P_i}{\rho P_R}\right) \quad (7)$$

Na equação (7), ρPR e ρPI correspondem, respectivamente, às distâncias verticais entre o ponto P e os condutores reais (+ρL) e imagens (-ρL). No caso de uma linha de transmissão trifásica, aplica-se a equação (7) para calcular o potencial gerado por cada fase (A, B e C) e sua respectiva imagem. O potencial total (composto por três parcelas) é obtido por superposição.

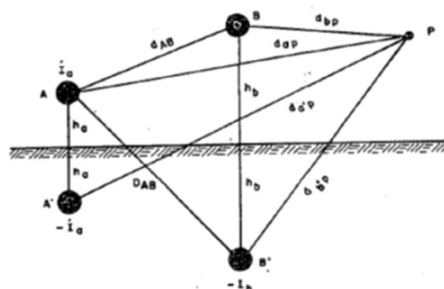


Figura3 - Aplicação do método das imagens para o cálculo do potencial elétrico.

Além disso, [14] apresenta um guia com formulações práticas para computar níveis de potencial induzido em dutos localizados nas proximidades de linhas de transmissão. De acordo com esse guia tais potenciais podem ser obtidos por meio da equação (8). Ressalta-se que os cabos para-raios não são considerados nessa equação e que tal equação é válida apenas para circuito de configuração simples.

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left[\frac{2h_1}{R_i}\right] \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right] \quad (9)$$

$$R_i = \sqrt[3]{rd^2} \quad (10)$$

$$D_{ij}' = \sqrt[m-n]{(D_{11}' \cdot D_{12}' \cdot D_{13}' \dots D_{1m}') \cdot (D_{21}' \cdot D_{22}' \cdot D_{23}' \dots D_{2m}') } \quad (11)$$

$$C = P^{-1} \quad (12)$$

Onde:

- P_{ii} - Potencial gerado pelo condutor;
- P_{ij} - É o potencial elétrico mútuo entre os condutores incluindo o duto;
- h_i - Altura efetiva do condutor;
- R_i - Raio médio Geométrico (RMG);
- D_{ij}' - Distância Média Geométrica (DMG);
- C - Matriz Capacitância.

A Figura 4 ilustra (sem perda de generalidade) os elementos geométricos presentes nas equações (9), (10) e (11).

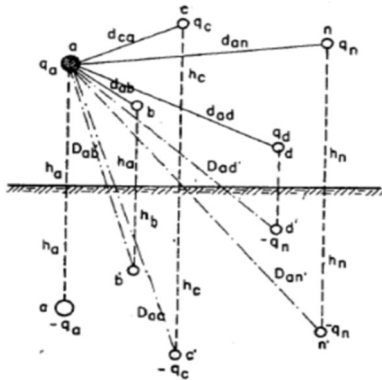


Figura 4 - Variáveis utilizadas para o cálculo dos níveis de potencial induzido.

V. Resultados e Discussões

Após a definição do sistema sob estudo e da metodologia adotada para o cálculo do campo elétrico e do potencial, serão apresentados os resultados em gráficos e tabelas.

O objetivo é apresentar um modelo computacional que nos forneça dados para a melhor escolha da proteção dos dutos, que é o objetivo desse trabalho.

O duto utilizado possui um diâmetro de 0,35 m, está localizado a uma distância horizontal de 15 metros do centro da torre da linha e a uma altura de 0,5 m em relação ao solo. Quanto à linha de transmissão, foram considerados nas simulações níveis de tensão de 345 kV e 500 kV.

Tabela 1 – Característica da Linha 345kV.

Linha de Transmissão Barbacena - MG - 345kV	
Tensão de Operação	345 kV
Corrente de Operação	418,3 A
Nº de Condutores por Fase	2
Espaçamento entre condutores	45,7 cm
Altura dos Condutores Fase A/B/C	14,29 m
Diâmetro dos Condutores Fase	28,74 mm
Distância entre as Fases	9,5 m

Tabela 2 – Característica da Linha 500kV.

Linha de Transmissão Barbacena - MG - 500kV	
Tensão de Operação	500 kV
Corrente de Operação	835,15A
Nº de Condutores por Fase	4
Espaçamento entre condutores	95 cm
Altura dos Condutores Fase A/B/C	17,5 m
Diâmetro dos Condutores Fase	31,95 mm
Distância entre as Fases	7,5 m

A figura 5 apresenta o perfil de tensão induzida no duto pelo efeito capacitivo pela linha de 345 kV. Em qualquer ponto da faixa de servidão, todos os

resultados foram reproduzidos pelo modelo desenvolvido. A figura 6 apresenta o resultado da linha de 500 kV.

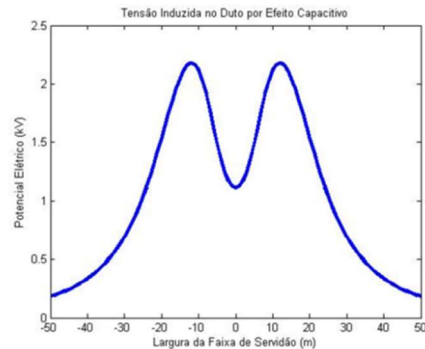


Figura 5 – Tensão induzida no duto pelo Efeito Capacitivo LT 345 kV.

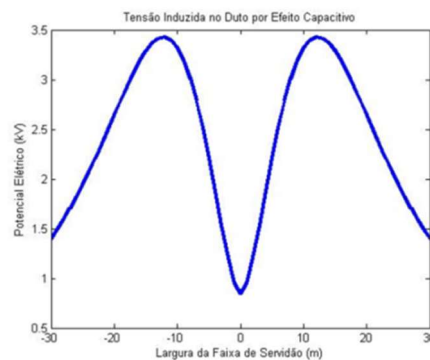


Figura 6 – Tensão induzida no duto pelo efeito capacitivo LT 500 kV.

De acordo com os gráficos das figuras 7 e 8, valores máximos de tensão induzida no duto são bastante elevados, podendo chegar facilmente a milhares volts. No entanto, conforme se percebe no perfil dos gráficos ao longo da faixa de servidão, a escolha apropriada da localização do duto pode evitar valores extremos de tensão.

Verifica-se que a região ideal para instalação do duto seria aquela mais afastada, ou fora da faixa de servidão.

A [15] estabelece valores, ou seja, limites máximos de valores do campo elétrico gerado por linhas de transmissão, de modo a garantir a segurança de pessoas ou animais localizados nas proximidades. Daí a necessidade de calcular os valores para essa grandeza.

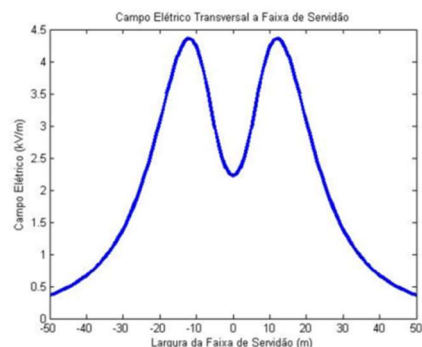


Figura 7 – Campo Elétrico LT 345 kV.

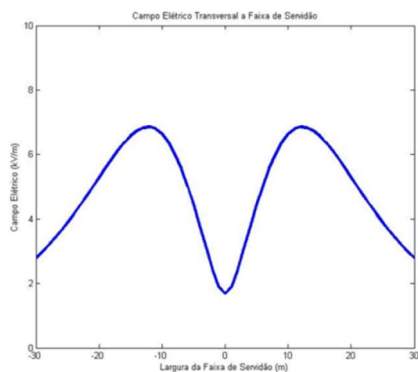


Figura 8 – Campo Elétrico LT 500 kV.

Tabela3 – Valores de Campo Elétrico LT's 345 e 500kV.

Tensão da LT (kV)	Campo Elétrico (kV/m)
345	4,36
500	6,85

Conclui-se, naturalmente, que a geometria da linha de transmissão influi diretamente no valor da tensão do duto e, conseqüentemente, na corrente no duto e no valor de campo elétrico. Tal fato está associado com a distância entre a fonte e o ponto de observação.

Utiliza-se o próprio gráfico do campo elétrico para calcular o potencial elétrico fazendo uso da fórmula $V=E.d$, e $d=H$ (altura do duto), e o modelo computacional calcula esse potencial diretamente no duto, porém os valores encontrados condizem com os encontrados em outras literaturas. Para melhor entendimento observa-se a tabela 4.

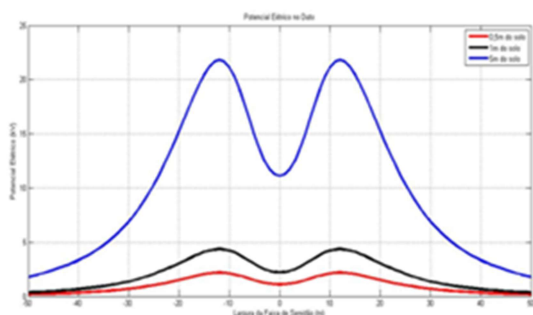


Figura 9 - Potencial para LT 345 kV calculados em três pontos distintos (0,5 m, 1 m e 5 m).

Tabela 4 – Comparação dos valores do Potencial Elétrico.

Altura do Duto (m)	Calculados Figuras 23,32 e 33
	Potencial Elétrico (kV)
0,5	2,18
1	4,36
5	21,80

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, foi demonstrado que o valor do campo eletro-

magnético em dutos aéreos, devido à influência eletromagnética de uma linha de transmissão, depende da distância entre ambos, do comprimento do trecho paralelo a essa linha de transmissão e da constituição física do duto.

Pode-se destacar ainda, a possibilidade de usar essas simulações para determinar o perfil da implantação e/ou melhorias de situações problemas

VI. Conclusão

Pode-se concluir, depois das análises e simulações que, dependendo da aproximação entre linha de transmissão e dutos aéreos, há vários riscos a serem considerados, tanto quanto a vida útil do duto, como também no que diz respeito à segurança de pessoas e animais que possam ter contato direto com este duto.

Para mitigar esses efeitos, faz-se necessária a utilização eficiente de métodos de proteção como: aterramento do duto, proteção catódica e a utilização de ligas metálicas resistentes à corrosão a base de zinco e níquel, na construção dos mesmos.

O tema aqui abordado é um tema atual e de grande importância no que diz respeito à criação de métodos mais eficientes para a conservação e proteção da malha dutoviária aérea, com a implementação de técnicas mais modernas e criação de materiais mais resistentes. Além de servir como parâmetro para futuros projetos em outras áreas da engenharia. Nesse sentido, como sugestão para trabalhos futuros, fazer as medições na prática e confrontar com os valores calculados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao ao Centro Universitário CESMAC, pelo suporte, ajuda essencial no desenvolvimento deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a essa pesquisa e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Referências Bibliográficas

- [1] Santos, M. G. Acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Dissertação de Mestrado - Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2011.
- [2] NBR 5422". Projetos de linhas de transmissão de energia elétrica. "Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - 1985".
- [3] CPFL. Orientação Técnica: Ocupação de Faixa de Linha de Transmissão. 2011. Disponível em: <http://www.cpf.com.br/atendimento-a-consumidores/orientacoes-tecnicas/publicacoes-tecnicas/Paginas/normas-tecnicas.aspx>

- [4] EDUARDO, J. Varela. Interferência de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada em Tubulações Metálicas, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- [5] CHESF, Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Estudo das Interferências Eletromagnéticas, 2012.
- [6] SADIKU M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. Companhia Bookman Editora, 3ª. Edição, 2004.
- [7] JOHNS, C. T. A. Engineering Electromagnetic Fields and Waves, Estados Unidos da America, 1988.
- [8] HAYT, W. H., Eletromagnetismo, Mc Graw-Hill, 1983.
- [9] SWEDI M. H., JOHAR U. M. Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essential & Cautions. International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN, Dhahran, Arábia Saudita, 2003.
- [10] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, 2005.
- [11] MALIK, N. H. A Review of the Charge Simulation Method and its Applications, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989.
- [12] FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. Vol. 1. Editora S.A. Rio de Janeiro, 1977.
- [13] GUIMARÃES, G. E. Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Belo Horizonte, 2005.
- [14] CIGRÉ. Guide on the influence of high voltage AC power systems on metallic pipelines. Working Group, 1995.
- [15] Souza, C. J. Determinação da Largura de Faixa de Segurança de Linhas de Transmissão: Estudo Paramétrico. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.