

Implementação de um Modelo Circuitual para Estudos de Acoplamento Indutivo em Regime Permanente

Caio M. Moraes * Amauri G. Martins-Britto ** Felipe V. Lopes ***

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: caiomissiaggia96@gmail.com).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: amaurigm@lapse.unb.br)*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: felipevlopes@unb.br)*

Abstract: This work presents a circuit model implementation based on the Alternative Transients Program (ATP), intended for the study of electromagnetic interferences involving transmission lines and pipelines. The proposed model differs from the studies commonly reported in the literature because it is able to effectively determine the induced voltages in the target system under complex approximation geometries, which may be composed of crossings, parallelisms and oblique sections between the interfering and interfered systems. To validate the implementation, a hypothetical case of crossing between a 115 kV transmission line and a pipeline is first simulated, and results are compared with an industry-standard software. Then, a real case of a shared right-of-way between an 88 kV transmission line and an underground pipeline is analyzed, with real soil resistivity measurements. Results show that the proposed approach is effective for application in case studies involving complex geometries and in real situations of electromagnetic interferences, presenting excellent agreement with the reference results.

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma implementação de um modelo circuitual, baseado no programa *Alternative Transients Program* (ATP), destinada ao estudo de interferências eletromagnéticas envolvendo linhas de transmissão e tubulações metálicas. O modelo empregado se distingue dos estudos comumente reportados na literatura por sua eficácia em determinar eficazmente as tensões induzidas no sistema alvo em geometrias complexas de aproximação, as quais podem ser compostas por cruzamentos, paralelismos e obliquidades entre os sistemas interferente e interferido. Para validação da implementação, primeiramente é simulado um caso hipotético de cruzamento entre uma linha de transmissão em 115 kV e uma tubulação metálica, em que os resultados são comparados com os de um programa comercial considerado referência na indústria. Em seguida, é estudado um caso real de compartilhamento de faixa de servidão entre uma linha de transmissão em 88 kV e uma tubulação metálica subterrânea, com medições reais de resistividade do solo. Dos estudos realizados, verifica-se que a modelagem proposta é eficaz para aplicação em estudos de casos envolvendo geometrias complexas e em situações reais de interferências eletromagnéticas, apresentando excelente correlação com os resultados de referência.

Keywords: ATP; Eletromagnetic interferences; EMTP; Inductive coupling; Induced voltages; Overhead transmission lines; Pipelines; Soil resistivity.

Palavras-chaves: ATP; EMTP; Linhas de transmissão; Interferências eletromagnéticas; Resistividade do solo; Tensões induzidas; Tubulações metálicas.

1. INTRODUÇÃO

As interferências eletromagnéticas causadas pela proximidade entre linhas de transmissão e tubulações metálicas, como oleodutos e gasodutos, é um tema que vem sendo estudado desde o início dos anos 60, com as contribuições de Favez e Gougeuil (1966) e Pohl (1966). Com a crescente industrialização dos países, as malhas dutoviárias vêm aumentando sua complexidade e extensão, a fim de viabilizar o abastecimento dos grandes centros urbanos com recursos essenciais como gás natural, derivados de

petróleo, água etc. Ao mesmo tempo, observa-se, nas companhias de energia, um aumento significativo da carga instalada e dos níveis de curto-circuito, em decorrência do crescimento da demanda de energia visando atender às metrópoles. Devido ao aumento da potência transmitida pelas linhas de transmissão, da complexidade das malhas dutoviárias e ao crescimento de restrições do uso espacial por órgãos ambientais, o compartilhamento das faixas de servidão entre linhas de transmissão e tubulações metálicas estão se tornando mais frequentes, estimulando estudos

nessa área de pesquisa, como CIGRÉ WG-36.02 (1995), Christoforidis et al. (2003) e Qi et al. (2013), por exemplo.

Quando uma estrutura metálica é exposta aos condutores energizados de uma linha de transmissão, está sujeita a uma série de fenômenos eletromagnéticos, que resultam na indução de tensões e correntes ao longo de todo o seu traçado, tanto em regime permanente quanto em regime transitório da linha de transmissão. De acordo com o documento CIGRÉ WG-36.02 (1995), essas tensões e correntes induzidas são decorrentes de três tipos de acoplamento entre as estruturas: o indutivo, o capacitivo e o condutivo.

Como consequência desses fenômenos eletromagnéticos, riscos à integridade dos operadores e às instalações envolvidas podem surgir, como: choque elétrico causado por tensões de toque e de passo, danos por imposição da corrente alternada ao metal e aos equipamentos eletricamente conectados às estruturas e a ruptura da rigidez dielétrica do revestimento da tubulação metálica, o que pode ocasionar outros riscos, como exposição à corrosão eletroquímica.

Tendo em vista as considerações descritas acima, é de grande importância conhecer os riscos decorrentes do compartilhamento da faixa de servidão entre linhas de transmissão e tubulações metálicas e, com isso, buscar estratégias para reduzir os perigos associados aos fenômenos eletromagnéticos e tornar os projetos dessas instalações mais seguros, tanto para as pessoas como para os bens envolvidos, utilizando soluções tecnicamente econômicas e viáveis de mitigação de riscos.

A aplicação de programas do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) a problemas de interferências eletromagnéticas já é adotada há algum tempo por pesquisadores da área, porém, os estudos documentados que utilizam essa abordagem, em sua maioria, tratam de sistemas relativamente simples, com geometrias de compartilhamento da faixa de servidão compostas apenas por paralelismos entre a estrutura interferida e a interferente, conforme artigos publicados por Fraiji e Bastos (2007), Milesevic et al. (2014) e Baraúna e Lima (2007).

Diante da importância do tema e das limitações nas abordagens atualmente discutidas na literatura, apresenta-se uma implementação baseada em um novo modelo circuital, proposto por Martins-Britto (2017), utilizando como ferramenta computacional o EMTP/ATP, amplamente utilizados para estudos de transitórios eletromagnéticos, objetivando prever os efeitos do acoplamento indutivo, envolvendo linhas de transmissão em regime permanente e tubulações metálicas, envolvendo geometrias arbitrárias.

Esse trabalho é de interesse prático para as distribuidoras e transmissoras de energia, assim como as indústrias que fazem uso de sistemas de transporte dutoviário, tais como as petroquímicas, de minérios e de abastecimento de água, e contribui com a implementação de um modelo circuital simples e preciso para o estudo de fenômenos de acoplamento indutivo, adequado para simulação de casos realistas de compartilhamento de faixa de servidão entre linhas de transmissão e tubulações metálicas.

2. SUBDIVISÃO EM PARALELISMOS EQUIVALENTES

Em casos reais a linha de transmissão (LT), denominada circuito fonte, e a tubulação metálica, denominada circuito alvo, não seguem encaminhamentos completamente paralelos ao longo dos respectivos traçados, como ilustra a Figura 1, uma vez que, por questões construtivas, podem ocorrer trechos de obliquidades, paralelismos e cruzamentos entre os circuitos. Por isso, as obliquidades e cruzamentos são aproximados por paralelismos equivalentes no circuito alvo, conforme as recomendações do CIGRÉ WG-36.02 (1995). Nessa modelagem, o circuito alvo (tubulação metálica) é subdividido em segmentos paralelos ao circuito fonte (LT), cada qual com comprimento equivalente L_{eq} e distância de afastamento equivalente d_{eq} , como representado nas Figuras 2 e 3.

Para a modelagem precisa de traçados complexos em segmentos paralelos equivalentes, cada região de acoplamento deve conter apenas um segmento retilíneo do circuito fonte, e cada segmento do circuito alvo deve estar compreendido inteiramente na região de acoplamento dentro da qual é interferido.

Os pontos de intersecção de cada região são determinados a partir do encontro das projeções das torres com o ponto mais próximo no circuito alvo. Os pontos de intersecção de cada duas torres da LT determinam uma região de acoplamento.

Tendo como base o exemplo da Figura 1, os vãos da LT são representados pelos segmentos de reta T_1T_2 e T_2T_3 , cujos pontos de intersecção de suas projeções até o ponto mais próximo do circuito alvo são enumerados de A a C. As regiões de acoplamento são representadas pelos paralelogramos que correspondem aos segmentos T_1T_2AB e T_2T_3BC .

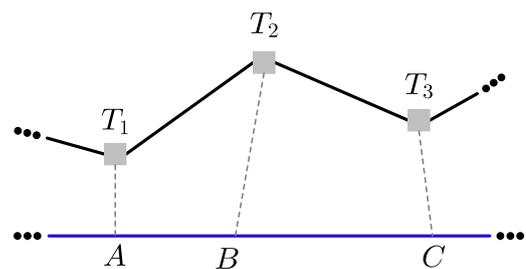


Figura 1. Intersecção e regiões de acoplamento em uma geometria arbitrária.

2.1 Aproximação oblíqua entre circuitos fonte e alvo

Nos casos de aproximação oblíqua entre circuito fonte e alvo, com distâncias de afastamento d_1 e d_2 em relação às projeções das torres da LT, como retratado na Figura 2, a obliquidade pode ser transformada em um segmento paralelo ao circuito fonte, com afastamento equivalente

d_{eq} , descrito de acordo com CIGRÉ WG-36.02 (1995), por meio da seguinte expressão:

$$d_{eq} = \sqrt{d_1 d_2}, \quad (1)$$

desde que as distâncias d_1 e d_2 obedeam a condição expressa em (2):

$$\frac{1}{3} \leq \frac{d_1}{d_2} \leq 3. \quad (2)$$

Caso a condição descrita em (2) não seja atendida, o segmento oblíquo do circuito alvo é subdividido, em dois ou mais segmentos, sucessivamente, até que o critério seja observado.

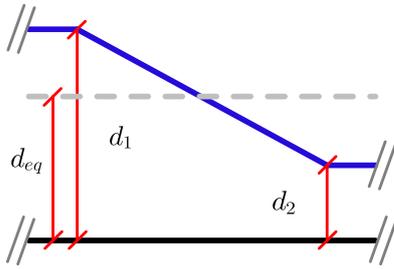


Figura 2. Aproximação oblíqua entre circuito fonte e alvo.

2.2 Cruzamento entre circuitos fonte e alvo

No caso do cruzamento, é utilizado um método proposto por Martins-Britto (2017). A tubulação é dividida no centro do cruzamento com a LT, onde é centrada uma circunferência de raio igual a 10 metros. Os pontos de intersecção do circuito alvo com a circunferência determinam dois pontos com afastamentos d_1 e d_2 em relação ao circuito fonte. A região interna da circunferência é subdividida em duas partes, uma antes e uma após o cruzamento, em que as distâncias equivalentes são definidas por $d_{eq,1} = \frac{d_1}{2}$ e $d_{eq,2} = \frac{d_2}{2}$. A região externa à circunferência é tratada como um trecho de obliquidade. A Figura 3 exemplifica esse método para cálculo de paralelismo equivalente no cruzamento.

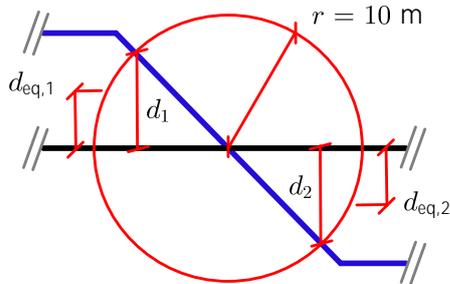


Figura 3. Cruzamento entre circuito fonte e alvo.

3. CÁLCULO DAS TENSÕES INDUZIDAS

Tubulações metálicas subterrâneas, ao serem expostas paralelamente aos condutores energizados de uma linha de transmissão, estão sujeitas às forças eletromotrizes (fem) induzidas causadas pelos campos magnéticos variantes no tempo produzidos pelas correntes que fluem nos condutores da LT. A fem induzida causa circulação de corrente e, conseqüentemente, a elevação do potencial da parede metálica da tubulação. A Figura 4 exemplifica esse fenômeno.

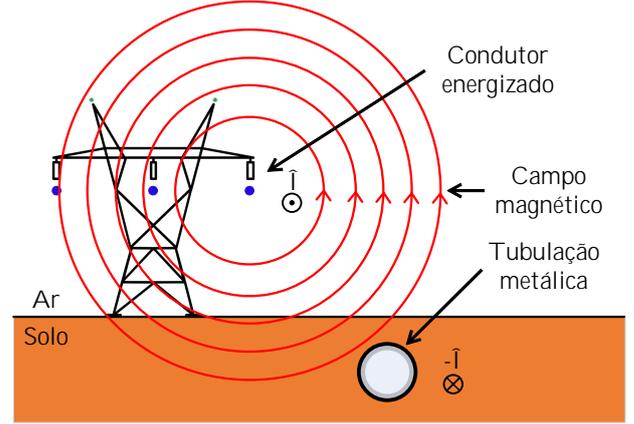


Figura 4. Representação do acoplamento indutivo entre LT e tubulação metálica subterrânea.

Para cada região de acoplamento, determinada de acordo com as diretrizes descritas na seção 2, têm-se a seguinte relação entre tensão e corrente do sistema:

$$\hat{V} = \mathbf{Z} \cdot \hat{I}, \quad (3)$$

em que \mathbf{Z} é a matriz impedância do sistema descrita como:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^P & Z_{1,2}^P & \cdots & Z_{1,n}^P \\ Z_{2,1}^P & Z_{2,2}^P & \cdots & Z_{2,n}^P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n,1}^N & Z_{n,2}^N & \cdots & Z_{n,n}^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

em que o sobrescrito P identifica os elementos energizados, como os condutores fase da LT, e o sobrescrito N denota os elementos inertes, como a tubulação metálica, condutores neutros, para-raios etc.

As impedâncias série e mútua de cada elemento da matriz \mathbf{Z} são obtidas por meio da fórmula expandida em série de potências de Carson (1926). Tendo como base a geometria representada na Figura 5, as impedâncias mútuas e próprias são calculadas, para dois condutores i e j quaisquer, por meio de:

$$Z_{i,i} = R_{int,i} + \Delta R_{i,i} + jw \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D'_{i,i}}{r_i} + X_{int,i} + \Delta X_{i,i} \right), \quad (5)$$

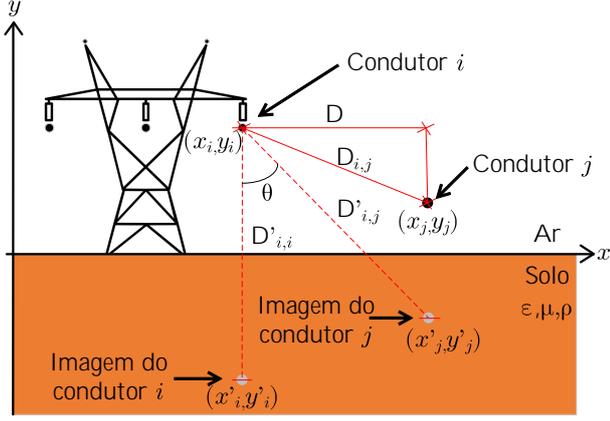


Figura 5. Condutores aéreos e suas imagens.

$$Z_{i,j} = \Delta R_{i,j} + j\omega \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D'_{i,j}}{D_{i,j}} + \Delta X_{i,j} \right), \quad (6)$$

em que $Z_{i,i}$ é a impedância série do condutor i , em ohms por quilômetro; $Z_{i,j}$ é a impedância mútua entre os condutores i e j , em ohms por quilômetro; $R_{int,i}$ é a resistência interna do condutor i , em ohms por metro; $D'_{i,j}$ é a distância entre o condutor e a imagem do condutor j , em metros; $D_{i,j}$ é a distância entre os condutores i e j , em metros; $X_{int,i}$ é a reatância interno do condutor i , em metros; r_i é o raio do condutor i , em metros; $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, em radianos por segundo; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a constante de permeabilidade magnética do espaço livre; ΔR e ΔX são os termos de correção de Carson, em ohms por quilômetro.

Os termos de correção de Carson ΔR e ΔX são as parcelas da equação de Carson que consideram as perdas de corrente que retornam pelo solo imperfeito, ou seja, com resistividade finita, e são descritas por séries infinitas apresentadas em (7) e (8).

$$\Delta R = \mu_0 \omega \left\{ \frac{1}{8} - \frac{\sqrt{2}}{6\pi} r \cos \theta + \frac{1}{16} r^2 [(1,3659 - \ln(r)) \cos 2\theta + \theta \cos 2\theta] - \dots \right\}, \quad (7)$$

$$\Delta X = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1,851382}{r} \right) + \frac{\sqrt{2}}{6\pi} r \cos \theta - \frac{\pi}{6\pi} r^2 \cos 4\theta - \dots \right], \quad (8)$$

$$r = D'_{i,j} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{\rho}},$$

em que ρ denota a resistividade elétrica do solo, em ohms.metro, e θ é o ângulo definido na Figura 5. Para impedância própria, $\theta = 0$. Para impedância mútua, θ é calculado por:

$$\theta = \frac{\cos^{-1}(y_i + y_j)}{D_{i,j}}, \quad (9)$$

em que y_i e y_j são as alturas dos condutores i e j , em metros.

É importante observar que o estudo baseado em uma estrutura de solo uniforme, como expresso pelo termo homogêneo ρ em (7) e (8), não constitui limitação à aplicação do modelo proposto neste trabalho, visto que, como demonstrado por Martins-Britto et al. (2019) e Tsiamitros et al. (2007), existem técnicas disponíveis para representar solos compostos por múltiplas camadas em termos de equivalentes uniformes em problemas de acoplamento indutivo.

De acordo com Dommel (1986), o programa EMTP/ATP, adota a solução de Carson expandida em uma série de potências adaptativa, em que o número de termos da série de potências é calculado em função dos parâmetros de entrada do problema (resistividade, frequência e afastamento entre condutores), de modo que a resposta forneça um erro próximo a zero em relação à solução analítica da integral de Carson.

4. SIMULAÇÃO DE UM CASO TESTE

4.1 Descrição do cenário

A Figura 6 representa o plano XY de um cruzamento simples em 90° entre uma LT e uma tubulação metálica. O sistema é composto por uma LT que opera em 115 kV, circuito simples, configuração vertical e com 5 quilômetros de extensão. A LT é energizada com uma corrente de 830 A por fase, com sequência de fases ABC, frequência de 60 Hz e a resistência de aterramento nas subestações terminais é de 1 Ω . A Figura 7 apresenta a geometria da torre referida e a Tabela 1 especifica os tipos de condutores utilizados na LT e suas características.

Tabela 1. Especificação dos condutores da LT para o cruzamento de 90°

Condutor	Raio externo [m]	R [Ω /km]	X [Ω /km]
CAA Peacock	0,0121006	0,0971988	0,0164932
Aço 3/8 EHS-CG	0,004572	3,42313	0,261225

Compartilhando a faixa de servidão com a LT, tem-se uma tubulação de aço carbono subterrânea, enterrada a 1,5 metros de profundidade e com diâmetro de 16", com resistência de aterramento igual a 10 Ω em suas extremidades. As características da tubulação e do seu revestimento isolante estão apresentadas na Tabela 2, em que a resistividade relativa é definida em relação ao valor de referência do cobre recozido, dado por $\rho_0 = 1,72 \times 10^{-8}$ Ω .m.

Para fins de teste, é considerado um modelo de solo uniforme, composto por uma única camada, cuja espessura é assumida infinita, com resistividade elétrica igual a 100 Ω .m.

4.2 Tensão induzida na tubulação

Os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta são comparados com os do *software* comercial Right-of-

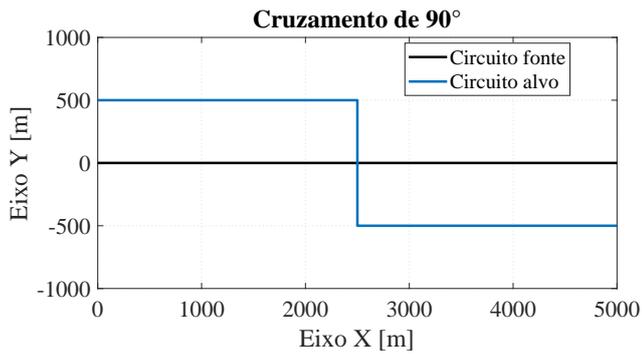


Figura 6. Traçado do cruzamento de 90° entre a LT e a tubulação metálica.

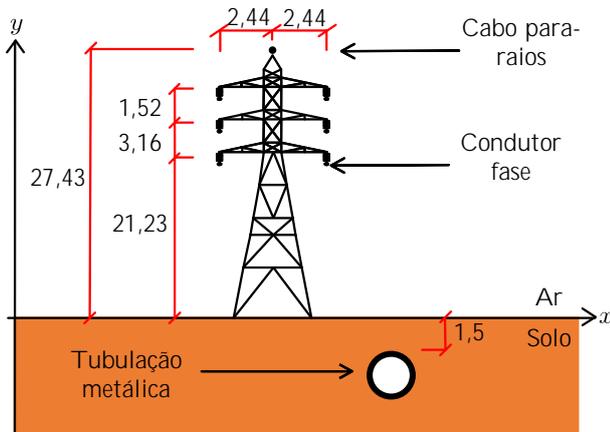


Figura 7. Geometria do sistema para o caso hipotético de cruzamento em 90°.

Tabela 2. Características da tubulação de aço carbono 16" e do revestimento

Parâmetro	Valor
Raio externo [m]	0,2032
Resistência AC [Ω /km]	0,0870287
Reatância [Ω /km]	0,0866951
Resistividade relativa do metal	10
Permeabilidade magnética relativa do metal	300
Resistividade do revestimento [Ω .m]	1×10^8
Espessura do revestimento [m]	3×10^{-3}
Profundidade da geratriz [m]	1,5

Way, cujos métodos de cálculo são documentados por Dawalibi e Donoso (1993), programa bastante difundido para o cálculo de interferências eletromagnéticas no mundo. É um programa que baseia sua modelagem em um modelo circuitual no domínio fasorial (regime harmônico) e considera solos de múltiplas camadas nos cálculos das impedâncias próprias e mútuas.

A Figura 8 apresenta o perfil da tensão induzida no duto ao longo do traçado do cruzamento em 90°.

No ponto em que é observada a maior tensão induzida ao longo do trajeto, calcula-se o erro entre a metodologia proposta e a resposta de referência. Opta-se por avaliar o erro no ponto de tensão máxima por ser considerado o mais crítico em relação a segurança das instalações e pessoas,

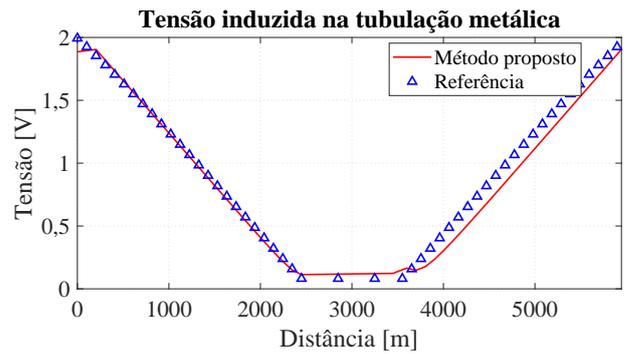


Figura 8. Gráfico de tensão induzida versus distância para o traçado de cruzamento em 90°.

onde, em tese, podem ser necessárias medidas de mitigação das tensões induzidas.

O resultado obtido utilizando o programa EMTP/ATP, está de acordo com as respostas produzidas pelo software de referência. O erro observado na resposta, no ponto mais crítico, é de apenas 4,4%, sendo que há grande concordância entre as duas curvas de tensão.

Os resultados obtidos estão de acordo com os valores adotados como referência, pelo que a implementação do modelo circuitual é considerada válida. Na seção seguinte, o modelo proposto é utilizado para investigar um caso mais complexo, considerando um compartilhamento de faixa de servidão concreto, com paralelismos, obliquidades e cruzamentos, medições de resistividade do local e considerando as características reais de construção tanto da LT como da tubulação metálica.

5. SIMULAÇÃO DE UM CASO REAL

5.1 Descrição do cenário

A Figura 9 representa um trecho de aproximadamente 1,2 km de extensão, em que uma tubulação subterrânea, mantida por uma grande operadora de transporte dutoviário do estado de São Paulo, compartilha a faixa de servidão com uma linha de distribuição de energia elétrica em 88 kV.



Figura 9. Traçado da LT e da tubulação metálica para o caso real.

O sistema é composto por uma LT de circuito simples, de configuração vertical, que opera em 88 kV. Em condições nominais de carregamento, a LT é energizada com 780 A, com sequência ABC, em frequência de 60 Hz e possui resistência de aterramento de 1Ω nas subestações terminais. A Figura 10 ilustra a geometria do sistema e a Tabela 3 especifica os tipos de condutores utilizados na LT e suas características.

Tabela 3. Especificação dos condutores da LT do caso real

Condutor	Raio externo [m]	R [Ω /km]	X [Ω /km]
CAA Grosbeak	0,0125705	0,0924806	0,0156758
Aço 3/8 EHS-CG	0,004572	3,42313	0,261225

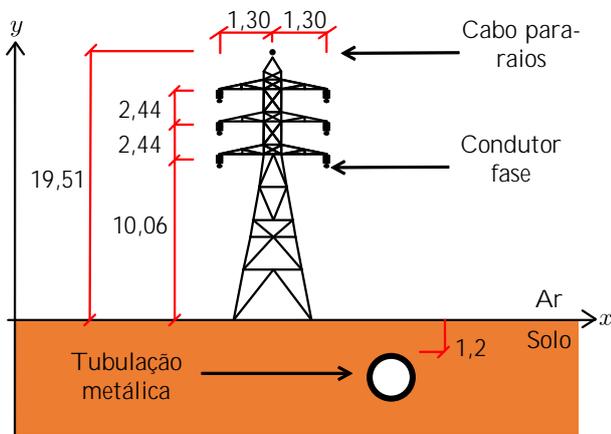


Figura 10. Geometria do sistema para o caso real.

A tubulação subterrânea é construída em aço carbono e possui diâmetro de 14", sua geratriz está a uma profundidade de 1,2 metros e a tubulação é aterrada em suas extremidades com resistências de 10Ω . A Tabela 4 apresenta as características da tubulação e do seu revestimento.

Tabela 4. Características da tubulação de aço carbono 14" e do revestimento

Parâmetro	Valor
Raio externo [m]	0,1778
Resistência AC [Ω /km]	0,099516
Reatância [Ω /km]	0,0990797
Resistividade relativa do metal	10
Permeabilidade magnética relativa do metal	300
Resistividade do revestimento [Ω .m]	1×10^8
Espessura do revestimento [m]	3×10^{-3}
Profundidade da geratriz [m]	1,2

A Tabela 5 apresenta o valor das medições de resistividade aparente em diferentes profundidades no solo da região. Considerando o modelo de solo uniforme, a resistividade elétrica encontrada é de $427,3656 \Omega$.

Tabela 5. Medições de resistividade aparente do solo

Profundidade	Resistividade aparente [Ω .m]
1	336,8672
2	426,9484
4	367,2750
8	441,8132
16	427,3734
32	581,1087
64	410,1733
Solo uniforme	427,3656

5.2 Regiões de acoplamento e circuito equivalente do sistema

A Figura 11 apresenta o plano XY do caso, juntamente com o posicionamento das torres (T1,T2,T3,...,T16), suas projeções e as regiões de acoplamento determinadas utilizando o método proposto.

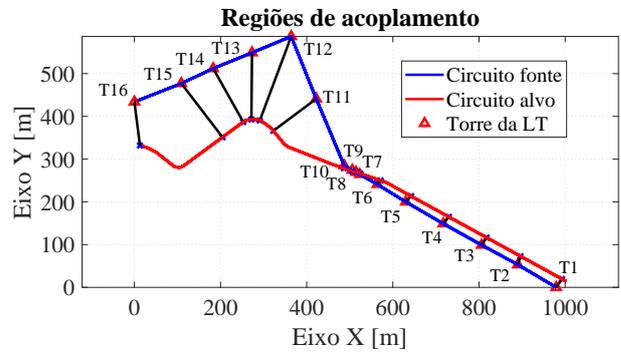


Figura 11. Plano XY e regiões de acoplamento do caso real.

Cada duas torres adjacentes da LT determina uma região de acoplamento, ou seja, para N torres da LT tem-se $N - 1$ regiões de acoplamento. Ao todo, nesse caso, são observadas 16 torres e, portanto, 15 regiões de acoplamento. Com as regiões de acoplamento definidas e todos os parâmetros que descrevem os paralelismos equivalentes devidamente calculados, é possível construir o circuito equivalente do sistema no EMTP/ATP, como apresentado na Figura 12.

No circuito apresentado na Figura 12, cada região de acoplamento (R1, R2, R3, ..., R15) é representada por um bloco *Line Constants* (LCC), o qual corresponde a uma sub-rotina do programa EMTP/ATP cujas entradas são os parâmetros dos condutores utilizados nos circuitos fonte e alvo, a geometria característica de cada região de acoplamento e a resistividade elétrica do solo. Os condutores para-raios são conectados à terra por meio de resistências, simulando o eletrodo de aterramento existente em cada torre da LT presente na região de acoplamento. Na tubulação metálica são modeladas as impedâncias *shunt* de cada região de acoplamento, introduzindo os efeitos das fugas de corrente pelo revestimento da tubulação enterrada. Por fim, nas extremidades do circuito, os cabos para-raio são conectados à terra por meio de resistores representativos das malhas de terra de cada subestação terminal, e a tubulação é conectada por meio das respectivas resistências terminais de aterramento.

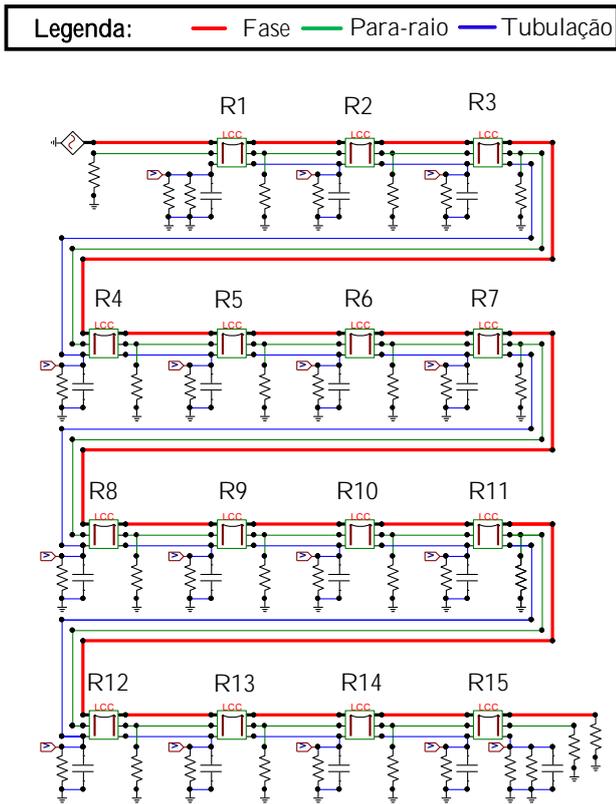


Figura 12. Circuito equivalente do caso no *software* EMTP/ATP.

5.3 Tensão induzida na tubulação

A Figura 13 apresenta a tensão induzida na tubulação ao longo de seu trajeto. Assim como na seção precedente, a resposta obtida é comparada com a do *software* Right-of-Way e o erro entre as tensões induzidas é avaliado no ponto mais crítico do traçado.

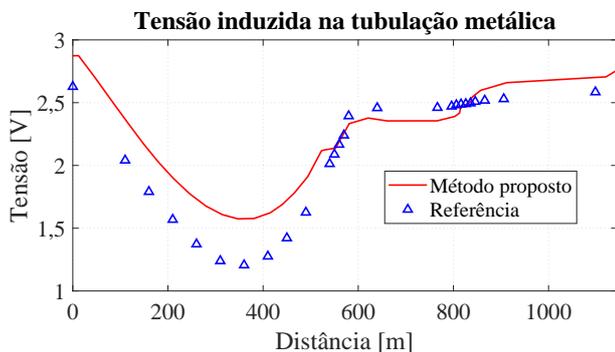


Figura 13. Gráfico de tensão induzida *versus* distância para o caso real

Tal como no estudo de caso anterior, a curva de tensão induzida observada possui seu valor mínimo no epicentro do cruzamento entre os circuitos e aumenta em magnitude à medida que se caminha para as extremidades, devido

às resistências de aterramento finitas nos terminais, concordando com os textos da literatura. Observa-se também uma distribuição assimétrica, tanto à esquerda como à direita, em virtude das diferentes aproximações oblíquas antes e depois do cruzamento.

Além disso, a resposta mostrou-se precisa com relação ao *software* de referência, apresentando um erro de 9,41%, representando menos de 1 V, entre as duas respostas, reafirmando a validade do método proposto.

6. CONCLUSÃO

Com o aumento das restrições do uso do espaço por órgãos ambientais, o compartilhamento de faixas de servidão entre linhas de transmissão e tubulações metálicas estão se tornando cada vez mais comuns. Além disso, com o crescimento das grandes cidades, as malhas dutoviárias estão se tornando mais complexas e as potências transmitidas pelas linhas de transmissão maiores. Em razão desses fatores, os estudos de interferências eletromagnéticas entre essas instalações necessitam ser cada vez mais precisos, objetivando encontrar maneiras econômica e tecnicamente viáveis para prever e mitigar os riscos decorrentes dos mecanismos de acoplamento eletromagnético, tanto às instalações quanto às pessoas envolvidas.

É de interesse das indústrias que utilizam os sistemas de transporte dutoviário e das distribuidoras e transmissoras de energia terem à disposição metodologias para modelagem de forma realista e precisa os efeitos das interferências eletromagnéticas nas suas instalações.

Nesse trabalho, foi apresentada uma implementação baseada no *software* EMTP/ATP para o cálculo de tensões induzidas eletromagneticamente por LTs em tubulações metálicas subterrâneas. A principal inovação proposta neste artigo foi a técnica de representação de geometrias arbitrárias em termos de paralelismos equivalentes, o que permitiu a modelagem precisa de aproximações comumente encontradas em instalações reais, como obliquidades e cruzamentos. Foram discutidos dois estudos de caso para validação dos resultados. O primeiro deles foi um caso hipotético de cruzamento perfeitamente perpendicular entre uma LT e um duto subterrâneo. O segundo consistiu na aplicação do método proposto para avaliar um caso real, inclusive com medições de campo.

A partir dos resultados discutidos ao longo do texto, pode-se afirmar que a metodologia proposta é válida e suficientemente precisa, diferenciando-se das demais técnicas reportadas na literatura por considerar geometrias complexas e sistemas reais de compartilhamento de faixa de servidão. A metodologia proposta, baseada no EMTP/ATP, apresentou resultados que concordam com a fenomenologia esperada e, além disso, apresentou erros inferiores a 10% no pior caso, se comparados com o *software* Right-of-Way, ferramenta considerada a referência de mercado em estudos de interferência eletromagnética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio de PNPd/CAPES.

REFERÊNCIAS

- Baraúna, D.M. e Lima, A.C.S. (2007). Análise da Influência de Linhas de Transmissão Aéreas em Regime Permanente em Tubulações Metálicas Enterradas. 55.
- Carson, J.R. (1926). Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*, 5(4), 539–554. doi:10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
- Christoforidis, G.C., Labridis, D.P., e Dokopoulos, P.S. (2003). Inductive Interference Calculation on Imperfect Coated Pipelines Due to Nearby Faulted Parallel Transmission Lines. *Electric Power Systems Research*, 66, 139–148. doi:10.1016/S0378-7796(03)00018-X.
- CIGRÉ WG-36.02 (1995). Technical Brochure n. 95 - Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines.
- Dawalibi, F.P. e Donoso, F. (1993). Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and E. *IEEE Computer Applications in Power*, (April), 19–24.
- Dommel, H.W. (1986). *EMTP Theory Book*. Bonneville Power Administration (B.P.A), Portland, OR.
- Favez, B. e Gougeuil, J.C. (1966). Contribution to Studies on Problems Resulting from the Proximity of Overhead Lines with Underground Metal Pipe Lines. *CIGRE*.
- Fraiji, T.K. e Bastos, J.P.A. (2007). Interferência Eletromagnética entre Linhas de Transmissão e Dutos, Utilizando o ATP - Uma Análise da LT 525 kV Campos Novos - Blumenau. 88.
- Martins-Britto, A.G., Rondineau, S.R.M.J., e Lopes, F.V. (2019). Power Line Transient Interferences on a Nearby Pipeline Due to a Lightning Discharge. In *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2019)*, 6. IEEE Xplore, Perpignan, France.
- Martins-Britto, A.G. (2017). *Modeling of the Electromagnetic Interferences between Power Lines and Underground Metallic Pipelines and Impact Analysis*. Mestrado, Universidade de Brasília.
- Milesevic, B., Filipovic-grcic, B., e Radosevic, T. (2014). Electromagnetic Fields and Induced Voltages on Underground Pipeline in the Vicinity of AC Traction System. 8, 1333–1340.
- Pohl, J. (1966). Influence of High-Voltage Overhead Lines on Covered Pipelines. *CIGRE*.
- Qi, L., Yuan, H., Li, L., e Cui, X. (2013). Calculation of Interference Voltage on the Nearby Underground Metal Pipeline due to the Grounding Fault on Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(5), 965–974. doi:10.1109/TEM.2013.2240391.
- Tsiamitros, D.A., Papagiannis, G.K. e Dokopoulos, P.S. (2007). Homogenous Earth Approximation of Two-Layer Earth Structures: An Equivalent Resistivity Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), 658–666.