



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 15  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA – GCQ**

**COMPARAÇÃO ENTRE CÁLCULOS BIDIMENSIONAIS E TRIDIMENSIONAIS DO CAMPO  
ELETROMAGNÉTICO GERADO POR LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

**João Clavio Salari \***

**Athanasio Mpalantinos Neto**

**João Ignácio Silva Filho**

**CEPEL**

**RESUMO**

Neste informe técnico comparam-se e aplicam-se métodos bidimensionais e tridimensionais para o cálculo do campo eletromagnético induzido junto ao solo e junto à superfície dos cabos de fase e dos cabos pára-raios de linhas de transmissão, quando da operação de tais linhas. Efeitos das cargas e correntes elétricas presentes nas torres metálicas e efeitos das catenárias dos cabos de um trecho de uma linha trifásica típica de 138 kV são contemplados. A análise é realizada utilizando-se uma modelagem bidimensional simplificada e um elaborado processo de cálculo tridimensional [1], [2].

**PALAVRAS-CHAVE**

Campo Eletromagnético, Domínio da Freqüência, Linhas de Transmissão, Transitórios Eletromagnéticos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em geral, em análises da operação de linhas aéreas de transmissão, investiga-se se o nível do campo eletromagnético gerado pela linha encontra-se dentro de níveis aceitáveis. Por exemplo, verifica-se se o campo elétrico na superfície dos cabos da linha atinge níveis que provoquem a ocorrência do efeito coroa e, conseqüentemente, perdas elétricas adicionais na linha e níveis intoleráveis de interferência em rádio e TV e ruído audível induzidos junto à superfície do solo. À freqüência industrial, necessita-se também manter o campo elétrico e o campo magnético junto ao solo dentro de limites aceitáveis [3]. Há também outros fenômenos associados que merecem ser levados em conta ou ao menos ter sua potencial interferência estimada, nomeadamente as induções de tensões e correntes entre torre e solo, entre dois pontos na superfície do solo, em objetos ou veículos sobre o solo, em tubulações metálicas enterradas, em cercas etc.

Obviamente, os parâmetros elétricos anteriores condicionam as dimensões transversais e longitudinais da linha, e, ainda, impõem uma faixa mínima de passagem ao longo da linha, na qual devem ser tomados cuidados especiais em relação às atividades de cultivo e de circulação de pessoas e veículos. Salienta-se que uma atenção especial deve ser dada à eventual necessidade de desmatamento nesta faixa de passagem, sobretudo em regiões de preservação ambiental, tema este que ganhou extremo impulso nas últimas décadas, além do fato do custo da faixa estar incluído no custo total da linha de transmissão [4].

Afigura-se, portanto, claramente, a necessidade do cálculo acurado do campo eletromagnético gerado por linhas de transmissão, o que, obviamente, requer uma modelagem adequada da linha de transmissão e o cálculo adequado das tensões e correntes induzidas em todos os componentes da linha, incluindo torres, sistemas de aterramento, cabos que compõem as fases, cabos pára-raios, eventuais equipamentos interligados etc. Contudo, observa-se que vários dos programas computacionais de uso corrente ainda procedem tal análise em apenas duas dimensões, representando os cabos com comprimento infinito e paralelos ao solo, e se limitam a linhas com os tradicionais feixes circulares (várias vezes simplificados por um único condutor equivalente), ou, ainda, empregando formulações totalmente empíricas e específicas. Logo, tais processos simplificados não consideram o efeito das catenárias dos cabos e a contribuição das cargas e correntes elétricas presentes nos elementos das torres, estais, acessórios de sustentação dos cabos, sistemas de aterramento etc. Não menos importante, trata-se de soluções tipicamente limitadas aos regimes estacionário ou quase estacionário.

Note-se que as críticas anteriores se referem ao uso indiscriminado dos processos citados, e, para algumas análises específicas, uma modelagem bidimensional “cuidadosa” (ou “modificada”), como a que será aplicada neste informe, pode ser suficiente, além desta ser extremamente atraente, dada a sua simplicidade de introdução de dados e requisitos computacionais mínimos. É o caso, e.g., quando da investigação do campo eletromagnético à frequência industrial gerado próximo do meio de um vão de uma linha de transmissão e junto ao solo para fins de determinação das alturas mínimas entre cabos e solo [4]. Um contra-exemplo seria para o mesmo tipo de análise, porém junto a uma torre da linha, na qual a precisão numérica satisfatória é obtida inevitavelmente com uma modelagem tridimensional, a qual, por sua vez, exige uma excessiva quantidade de dados, sobretudo coordenadas tridimensionais de cilindros, esferas, etc, e um tempo computacional tipicamente muito elevado. Nesse segundo caso, fatalmente processos bidimensionais simplificados podem induzir ao projeto errôneo de componentes da linha, como, e.g., de acessórios das cadeias de isoladores e da geometria dos feixes de condutores das fases, que, quando em operação, podem apresentar o efeito coroa.

Para o cálculo bidimensional do campo elétrico à frequência industrial e na superfície dos cabos da linha, enquadram-se, e.g., os conhecidos Métodos de Markt e Mengele, dos Momentos, da Carga Centrada e das Imagens Sucessivas [5]. Os cálculos bidimensionais dos campos elétrico e magnético junto ao solo também podem ser conduzidos por processos semelhantes, sendo que, no caso do campo magnético, o efeito do solo real pode ser incluído considerando-se imagens complexas [2, 6, 7, 10]. Como modelagem tridimensional e ainda no âmbito do regime quase estacionário, cita-se, e.g., aplicações do Método da Simulação de Carga - MSC [8-12], do Método das Diferenças Finitas ou dos Elementos Finitos – MDF ou MEF [13], [14], e do Método dos Elementos de Contorno - MEC [15]. Uma combinação entre tais métodos também tem sido uma tendência atual, provando ser esta a melhor alternativa para análises em geral.

No caso da modelagem tridimensional de trechos de linhas de transmissão, como para a análise aqui abordada, cumpre notar que tais soluções consideram, essencialmente, a decomposição ou assimilação dos elementos reais que constituem o trecho da linha (cabos, torres, sistemas de aterramento, isoladores etc) em elementos geométricos práticos e a interação entre os mesmos. Tipicamente, empregam-se cilindros, esferas, elipsóides, toróides, cones e planos para a representação dos elementos da linha com formas geométricas mais simples, ou tetraedros e poliedros para os elementos da linha com geometrias complexas. Além disso, operando-se dentro do regime quase estacionário, é razoável admitir-se alguns condicionamentos físicos para certos cálculos, como, e.g., impor igual potencial ou corrente por todo o comprimento de um cabo da linha, apesar de não serem propriamente caracterizadas “fontes” de corrente ou tensão aplicadas, como nas análises típicas de circuitos elétricos.

Em maiores detalhes, no caso de métodos do tipo do MSC, e.g., as formulações básicas adotadas consideram tais elementos imersos em dois meios uniformes semi-infinitos separados por um plano, nomeadamente o ar e o solo, ao passo que formulações específicas necessitam ser elaboradas para a inclusão de outros meios, como, e.g., bolsões formados por isoladores [8, 11, 16]. Algumas estratégias especiais de modelagem também permitem considerar irregularidades do terreno [9, 17]. Naturalmente que, dada a não trivialidade do problema global, a resolução matemática é do tipo matricial, mas de cálculo simples.

Já para soluções tridimensionais do tipo do MEF, a incorporação de vários dielétricos é natural, mas surge a dificuldade de cálculo em um domínio “aberto” como o do espaço físico que caracteriza os elementos da linha e o meio externo. Apesar de aqui se lidar com matrizes com dimensões bem superiores, estas apresentam grande esparsidade, facilitando a solução do problema utilizando-se técnicas especiais.

Ainda para uma modelagem tridimensional, porém com aplicação para um amplo espectro de frequências, viabilizando-se analisar a propagação de sinais arbitrários no tempo em “circuitos elétricos” generalizados, desde àqueles associados a fenômenos à frequência industrial, tal como propiciado por várias das estratégias citadas anteriormente, quanto a fenômenos de alta frequência (e.g. dos tipos associados a descargas atmosféricas), que exigem formulações mais elaboradas, desenvolveu-se recentemente o programa computacional FDETP – *Frequency Domain Electromagnetic Transients Program* [1], [2]. A metodologia empregada no programa FDETP é fundamentada no domínio da frequência e permite analisar “circuitos elétricos” constituídos por vários elementos lineares e não-lineares (Figura 1), nomeadamente:

- (i) Elementos do tipo “*Circuito*”: elementos tipicamente empregados em análises de circuitos e de redes elétricas, tais como elementos RLC lineares e não-lineares, quadripolos representativos de cabos de linhas de transmissão, quadripolos genéricos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc.
- (ii) Elementos do tipo “*Campo*”: elementos tridimensionais do tipo “fonte de campo eletromagnético”, com o formato de eletrodos cilíndricos, tipicamente empregados em análises de campos eletromagnéticos. Esses elementos podem ser usados isoladamente ou em grupos previamente estabelecidos no programa FDETP, estes para a fácil modelagem de torres de linhas de transmissão típicas, sistemas de aterramento típicos, cabos com posicionamento arbitrário (no ar ou no solo; com ou sem o efeito das catenárias), canal da descarga atmosférica, toróides, grandes esferas, cadeias de isoladores (combinação entre eletrodos e elementos RC) etc.

O programa FDETP também possui interligações com módulos especiais, e.g. módulos que modelam o efeito de ionização do solo junto a eletrodos de aterramento e o efeito coroa em cabos de linhas áreas de transmissão. O processo de conversão frequência-tempo é executado através da Série de Fourier, Integral de Fourier ou transformada de Laplace; o primeiro método é útil para a análise de soluções periódicas no tempo, e os dois últimos são aplicáveis a soluções periódicas e não periódicas.

Em função de tal característica de modelagem híbrida, o programa FDETP tem se mostrado eficiente para várias

análises de transitórios e campos eletromagnéticos, em regime linear e não-linear, além da grande liberdade para variação da modelagem do “circuito elétrico” em estudo. A complexidade da modelagem adotada depende, naturalmente, da precisão numérica pretendida e da capacidade computacional disponível. Vários exemplos de validação desta metodologia e seus fundamentos podem ser encontrados em [1, 2, 18-20].

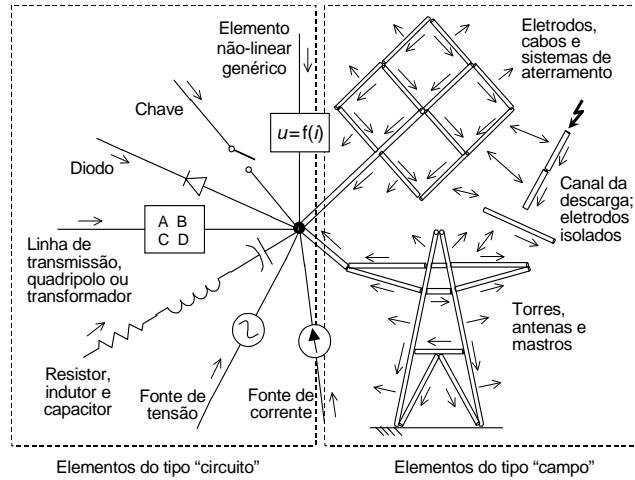


FIGURA 1 – Exemplo estilizado de diferentes componentes conectados em um nó do “circuito elétrico”

Deve-se notar que, em relação às metodologias comentadas anteriormente e desenvolvidas especificamente para aplicações em regime quase estacionário, como o simples estudo aqui apresentado, metodologias robustas de cálculo como a que foi implementada no programa FDETP exigem um tempo computacional maior, contudo, constata-se que esta diferença de tempo de cálculo tende a se tornar mínima, em função da constante evolução da velocidade de processamento e da capacidade de armazenamento de dados dos computadores.

Nesse sentido, valendo-se do programa FDETP e de soluções bidimensionais típicas, apresenta-se neste informe o cálculo dos campos elétrico e magnético induzidos junto ao solo e do campo elétrico induzido junto à superfície dos cabos de um trecho de uma linha de transmissão típica de 138 kV, em função da aplicação de tensões e correntes senoidais à frequência de 60 Hz nos cabos da linha. O enfoque da análise é dado aos efeitos das catenárias dos cabos e das contribuições das cargas e correntes elétricas presentes nas estruturas metálicas da linha. Busca-se, assim, apontar, de uma forma prática, domínios de aplicação de tradicionais e simplificados processos de cálculos bidimensionais do campo eletromagnético gerado por linhas de transmissão.

## 2.0 – CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE AS MODELAGENS BIDIMENSIONAIS E TRIDIMENSIONAIS EMPREGADAS

### 2.1 Modelagem Bidimensional

Considerou-se funções senoidais no tempo, do tipo  $F_{\omega} e^{\pm i \omega t}$ , sendo  $\omega$  a pulsação,  $F_{\omega}$  complexo e  $i = +\sqrt{-1}$  a unidade imaginária, e, entre várias simplificações para o cálculo do campo elétrico no ar junto ao solo e junto à superfície dos cabos,  $\vec{E}$ , considerou-se os cabos com comprimento infinito e paralelos ao solo, além da aproximação quase estacionária, o que corresponde a se poder desprezar o atraso da propagação e o efeito da variação no tempo do potencial vetor  $\vec{A}$  no cálculo de  $\vec{E}$ .

A relação matricial entre o vetor das cargas nos cabos por unidade de comprimento,  $\mathbf{Q}$ , supostas representadas por filetes de carga uniforme no eixo dos cabos, e a tensão aplicada aos cabos,  $\mathbf{U}$ , é dada então por:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{U}; \quad (1)$$

sendo  $\mathbf{P}$  a matriz dos coeficientes de potencial, cujos elementos são obtidos para os cabos de índices  $i$  e  $j$  por:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln\left(\frac{2H_i}{r_i}\right), \text{ para } i = j; \quad P_{ij} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right), \text{ para } i \neq j; \quad (2)$$

onde  $H_i$  e  $r_i$  são respectivamente as altura e raio do cabo  $i$ , e  $d_{ij}$  e  $D_{ij}$  são respectivamente a distância entre os eixos dos cabos  $i$  e  $j$  e a distância entre o eixo do cabo  $i$  e o eixo da imagem simétrica do cabo  $j$  no solo.

A partir do cálculo de  $\mathbf{Q}$ , o campo elétrico em qualquer ponto do meio externo aos cabos pode ser calculado facilmente considerando-se a superposição dos efeitos das cargas em cada cabo, i.e., em um ponto de índice  $k$ , tem-se:

$$\vec{E}_k = -\sum_j (\vec{\nabla} P_{kj}) \cdot Q_j. \quad (3)$$

Na superfície dos cabos, para cabos suficientemente afastados de outros cabos, o campo elétrico pode também ser calculado pela equação (3), o que equivale a se adotar uma aproximação de ordem “0” ou o Método da Carga Centrada. A componente do campo no sentido radial é obtida por uma mera transformação de coordenadas

tridimensionais. Havendo cabos próximos, necessita-se operar com uma ordem superior de cargas em cada cabo ou empregar uma função de distribuição das cargas ao redor do cabo para melhor representar a desuniformidade de distribuição do campo elétrico nesta região [2, 5, 10].

Para o cálculo do campo magnético junto ao solo, utilizou-se um procedimento semelhante, substituindo-se as cargas nos cabos pelas correntes nos cabos, sendo que o efeito do solo real foi incluído localizando-se as correntes imagens no solo a uma distância complexa [2, 6, 7, 10]. Note-se que, para o caso de cabos de fase em feixe, requer-se o adequado cálculo prévio da distribuição da corrente entre todos os subcondutores de todas as fases e dos cabos pára-raios, como o processo comentado em [4, 10].

## 2.2 Modelagem Tridimensional

Adotou-se a modelagem empregada no programa computacional FDETP, na qual, considerando-se funções genéricas no domínio do tempo decompostas em somas de parcelas do tipo  $F_s e^{s t}$ , e, para cada parcela de frequência complexa  $s$  (sendo  $s = a + i \omega$ , onde a parcela  $a$  é um número real) relacionando-se coerentemente tensões e correntes nos terminais (nós) de cada elemento do "circuito elétrico" em estudo, obtém-se um sistema de  $n$  equações, do tipo nodal modificado, o qual, em notação matricial, é dado por:

$$\mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\beta}; \quad (4)$$

sendo  $\mathbf{W} \in C^{n \times n}$  a matriz de imitâncias globais,  $\boldsymbol{\alpha} \in C^n$  o vetor de tensões nos nós ou de correntes entre dois nós, e  $\boldsymbol{\beta} \in C^n$  o vetor de correntes injetadas externamente nos nós ou de tensões aplicadas entre dois nós.

Os elementos da matriz  $\mathbf{W}$  associados aos modelos do tipo (i) definidos no item 1.0 são calculados a partir das relações básicas entre as correntes e tensões nos terminais de cada elemento. Os elementos associados aos modelos do tipo (ii) são calculados conforme o processo apresentado em [2], e a sua contribuição para a formação do sistema de equações (4) resulta do seguinte subsistema matricial:

$$\mathbf{W}_E \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}_E; \quad (5)$$

sendo  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{I}_E$  os vetores das tensões nos nós e das correntes injetadas nos nós dos eletrodos cilíndricos tridimensionais, respectivamente. A matriz  $\mathbf{W}_E$  é calculada em função das matrizes  $\mathbf{Z}_T$  e  $\mathbf{Z}_L$ , associadas, respectivamente, ao vetor das correntes transversais  $I_T$  em todos os eletrodos,  $\mathbf{I}_T$ , e ao vetor das correntes longitudinais  $I_L$  em todos os eletrodos,  $\mathbf{I}_L$ . A matriz  $\mathbf{W}_E$  é calculada a partir da formulação geral apresentada em [2], [18], sendo:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{D} - \mathbf{C}) \cdot \left( \frac{1}{2} \mathbf{Z}_T^{-1} \cdot \mathbf{B} \right) - (\mathbf{D} + \mathbf{C}) \cdot (\mathbf{Z}_L^{-1} \cdot \mathbf{A}); \quad (6)$$

onde:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{L1} = - \left( \mathbf{Z}_L^{-1} \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{2} \mathbf{Z}_T^{-1} \cdot \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{I}_{L2} = + \left( \frac{1}{2} \mathbf{Z}_T^{-1} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{Z}_L^{-1} \cdot \mathbf{A} \right) \cdot \mathbf{U} \end{cases} \quad e \quad \begin{cases} \mathbf{I}_L = \frac{1}{2} (\mathbf{I}_{L1} - \mathbf{I}_{L2}) \\ \mathbf{I}_T = \mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L2} \end{cases} \quad (7)$$

Nas equações (6) e (7), considerando-se  $n$  nós e  $m$  eletrodos,  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B} \in R^{m \times n}$ , e  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D} \in R^{n \times m}$  são matrizes cujos elementos são coeficientes iguais a 0, 0,5, -0,5, 1 ou -1, dependendo das conexões entre eletrodos.

Ao final do tempo de cálculo, sendo conhecidas as tensões e correntes em todo o circuito e para cada frequência de cálculo, calcula-se as correntes longitudinais e transversais em todos os eletrodos a partir das equações (7). Isso permite obter, para cada frequência, através de equações adicionais, apresentadas em [2], os campos elétrico e magnético em pontos do meio externo aos eletrodos e as perdas elétricas nos vários elementos da linha (cabos, torres, sistemas de aterramento etc), e, conseqüentemente, calcular, e.g., tensões entre condutores de fase e pontos da torre, tensões de passo e de toque junto ao solo, tensões transferidas, induções em cercas metálicas, induções em objetos metálicos sobre o solo, distribuição de tensão em cadeias de isoladores, campo elétrico na superfície de eletrodos etc. Os respectivos valores no domínio do tempo são obtidos por intermédio das conversões frequência-tempo comentadas no item 1.0.

Ressalta-se que as características da formulação nodal modificada implementada no programa FDETP viabilizam a integração do mesmo com processos externos ou com ou rotinas que façam uso de outras modelagens. Essa particularidade é especialmente útil para a modelagem de determinados componentes do circuito que não sejam bem simulados pelos modelos disponíveis no programa FDETP.

## 4.0 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Considerou-se como exemplo de aplicação para a comparação dos métodos de cálculo anteriores o trecho de uma linha de transmissão trifásica típica de 138 kV cuja geometria básica encontra-se em detalhes em [1], [2]. A linha possui um cabo de alumínio com alma de aço código *linnet* por fase e um cabo pára-raios de aço código 3/8". Representou-se três vãos da linha para a sua modelagem satisfatória para o estudo do fenômeno em causa, designadamente duas torres e os cabos da linha. O comprimento de cada vão é de 300 m e as flechas dos cabos de fase e do cabo pára-raios são iguais a 7 m e 4 m, respectivamente. Para maior rigor da análise, considerou-se um desnível de altura entre as duas torres de 3 m, culminando na altura de 25,1 m para a torre à esquerda (Torre 1), cujo centro da base encontra-se na coordenada (0, 0, 0), e na altura de 28,1 m para a torre à direita (Torre 2), cujo centro da base encontra-se na

coordenada (0, 300, 0), conforme consta na Figura 2. Como exemplo, supôs-se o solo local plano e com resistividade elétrica de  $2000 \Omega \cdot m$  e permissividade dielétrica da ordem de 10 vezes a permissividade dielétrica do ar.

Para a modelagem tridimensional pelo programa FDETP, as torres foram modeladas por grupos de eletrodos cilíndricos de aço, com o raio de 0,1 m, subdivididos adequadamente. Para facilidade, utilizou-se um modelo de torre preestabelecido no programa, o qual exige apenas uma dezena de dados geométricos para a sua inclusão no circuito elétrico em estudo. Os cabos de fase e o cabo pára-raios foram modelados por eletrodos cilíndricos com as características elétricas e geométricas dos cabos *linnet* e 3/8", respectivamente, empregando-se um modelo de quadripolo tridimensional também disponível no programa. Para facilidade de modelagem, representou-se os sistemas de aterramento das torres por impedância reais, com o valor de  $25 \Omega$  cada, embora, para análises mais acuradas, estes também possam ser modelados por eletrodos cilíndricos.

Aproveitando-se ainda uma modelagem de cadeias de isoladores preestabelecida no programa, simulou-as por uma combinação série de elementos RC em paralelo e eletrodos cilíndricos; ou seja, para cada isolador, modelou-se a parte isolante por uma associação de um resistor em paralelo com um capacitor, tendo sido adotado um valor elevado para o resistor e o capacitor igual a  $80 \text{ pF}$ , e modelou-se aproximadamente as suas campânula e pino por eletrodos cilíndricos metálicos, incluindo-se, assim, aproximadamente, o acoplamento eletromagnético entre o isolador e outros isoladores, e entre o isolador e as torres e cabos. Considerou-se dez isoladores por fase.

Numa extremidade do trecho da linha, supôs-se o cabo pára-raios com tensão nula e conectou-se às três fases um grupo de três tensões senoidais equilibradas, com os seguintes valores, em [kV]:

$$u_A(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot 138}{\sqrt{3}} \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t) ; u_B(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot 138}{\sqrt{3}} \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t + 120^\circ) ; u_C(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot 138}{\sqrt{3}} \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t + 240^\circ).$$

Na outra extremidade do trecho da linha, procedeu-se o casamento das impedâncias, por forma a se transmitir aproximadamente a potência característica pelo trecho da linha, resultando, neste ponto, após a simulação tridimensional, as seguintes correntes de fase, em [A]:

$$i_A(t) = 220,1 \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t - 0,05^\circ) ; i_B(t) = 222,3 \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t + 119,95^\circ) ; i_C(t) = 224,9 \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t + 239,95^\circ).$$

Naturalmente que, para uma análise do campo eletromagnético gerado pela circulação de correntes específicas nos cabos da linha, poderiam ser adotadas fontes de corrente com valores específicos conectadas à linha, ao invés das fontes de tensão utilizadas.

Para o cálculo do campo eletromagnético junto ao solo, à altura de 1 m, utilizou-se medidores de campo eletromagnético tridimensional, com os passos de cálculo de 0,5 m e 1 m nas direções x e y, respectivamente. Para o cálculo do campo elétrico na superfície dos cabos da linha, utilizou-se medidores de campo elétrico radial na superfície de eletrodos cilíndricos, dispostos transversalmente ao longo da linha, em intervalos variando de 1 a 10 m.

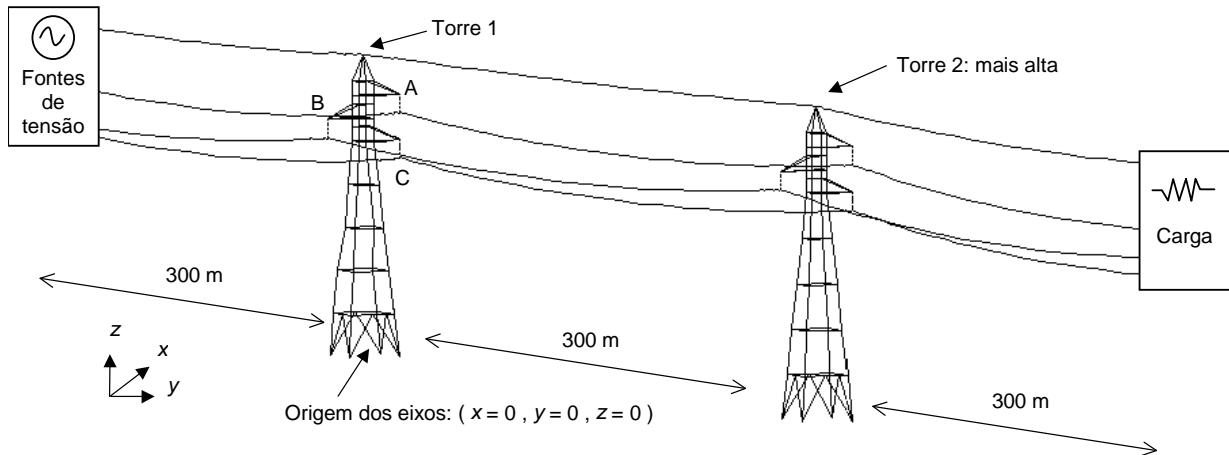
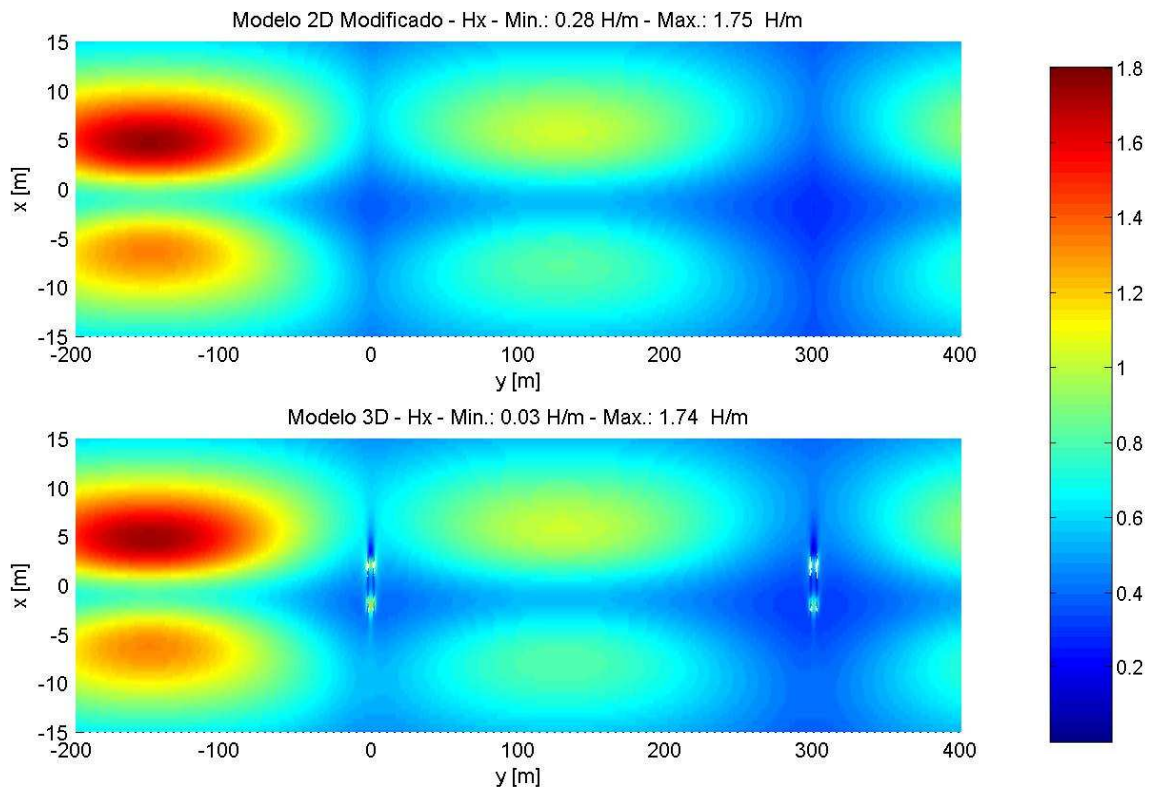
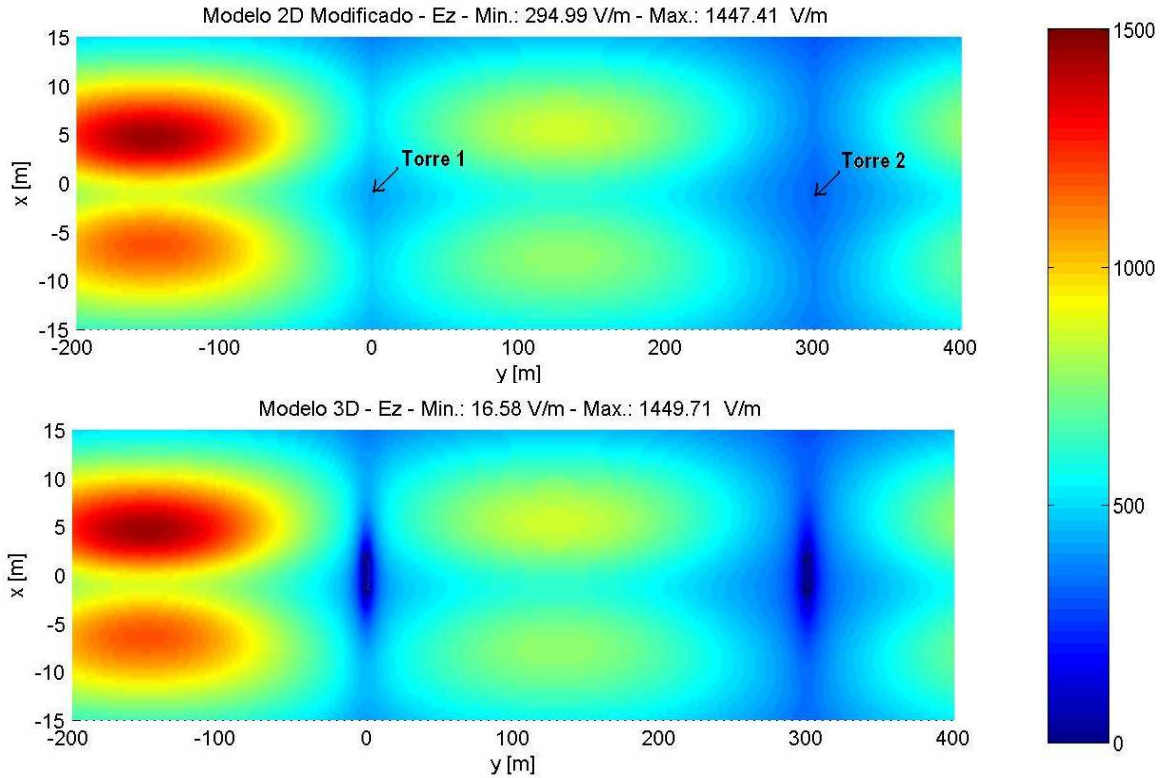


FIGURA 2 – Representação do trecho da linha de transmissão de 138 kV no programa FDETP

Com relação ao emprego da modelagem bidimensional comentada no item 2.1 para o referido trecho de linha, diferentemente de como é tipicamente feito nas análises em questão, em que se adota por todo o trecho os cabos à mesma altura em relação ao solo, adotou-se uma estratégia de modelagem "bidimensional modificada". Ou seja, para cada coordenada longitudinal ao longo do comprimento do trecho da linha, refez-se o cálculo com as alturas dos cabos neste ponto, obtidas a partir da equação da catenária dos cabos, permitindo-se assim incluir a variação dos campos nas direções x e z. Estratégias desse tipo foram empregadas com sucesso em trabalhos anteriores [9-11].

Nas Figuras 3 e 4 mostram-se os perfis calculados dos campos elétrico e magnético junto ao solo, nas direções z e x, respectivamente, considerando-se a modelagem bidimensional modificada ("Modelo 2D modificado") e a modelagem tridimensional ("Modelo 3D"). Na Figura 5 mostra-se a variação do campo superficial radial máximo calculado em cada cabo e ao longo do comprimento do trecho da linha, também se considerando ambas as modelagens. Cabe neste ponto citar que, como na presente análise, por simplicidade, não foram simulados eventuais

acessórios de sustentação, amortecimento e fixação dos cabos junto às cadeias de isoladores, poderiam ser encontrados campos superficiais nos cabos inferiores nesta região quando da inclusão destes elementos no cálculo.



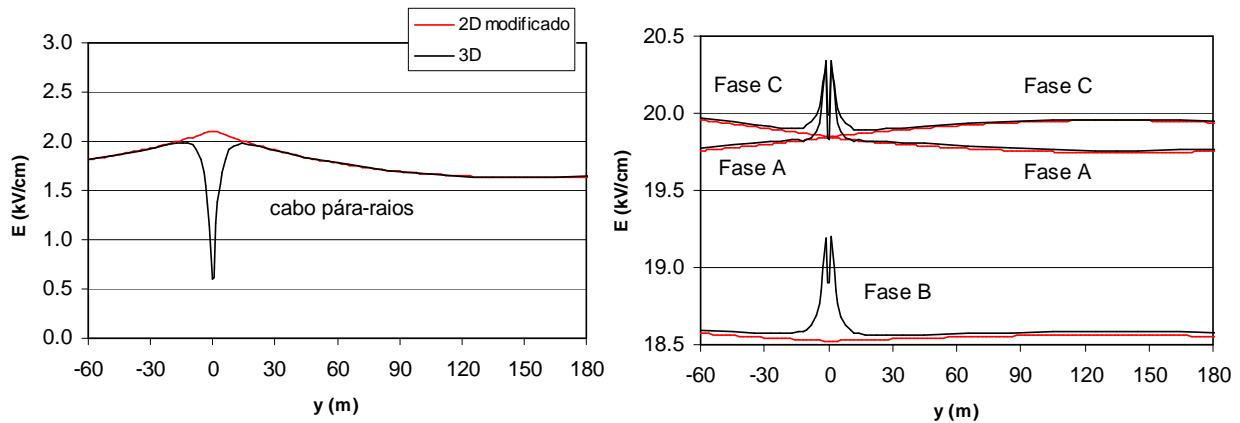


FIGURA 5 – Variação do campo elétrico superficial máximo nos cabos ao longo do comprimento da linha

Desses resultados, e considerando-se as limitações das aproximações de modelagem aqui empregadas, algumas conclusões básicas podem ser estabelecidas:

- Como esperado, para pontos de cálculo muito próximos das torres, são fortes os efeitos das cargas e correntes elétricas nos elementos das torres, resultando em substanciais alterações do campo elétrico na superfície dos cabos e dos campos elétrico e magnético junto ao solo. Portanto, para cálculos nessa região, a modelagem bidimensional, simples ou modificada, deve ser descartada.
- Para pontos de cálculo próximos ao meio do vão, em que os cabos estão mais próximos do solo, em função do efeito das flechas dos cabos, observa-se maiores valores do campo elétrico e do campo magnético junto ao solo. Portanto, para a tarefa de se estimar as alturas mínimas das torres em função dos valores máximos dos campos elétrico e magnético junto ao solo, localizando-se previamente o ponto em que os cabos estão mais próximos do solo, é razoável adotar-se uma modelagem bidimensional simples, considerando-se os cabos nesta altura.
- Para pontos de cálculo afastados de distâncias superiores a distâncias da ordem de grandeza da altura das estruturas (de 1 a 2 vezes), os resultados com a modelagem bidimensional modificada se aproximam bastante dos obtidos com a modelagem tridimensional, nomeadamente em relação aos componentes nas direções  $x$  e  $z$  de ambos os campos elétrico e magnético junto ao solo e do campo elétrico na superfície dos cabos. Análises adicionais que foram realizadas para outras torres e configurações de fases, em feixe ou não, denotaram conclusões semelhantes. O mesmo sucedeu em estudos anteriores apresentados em [9-11].
- Portanto, para as análises em que sejam apenas necessários cálculos do campo eletromagnético próximo ao meio do vão ou em pontos relativamente afastados das torres, a indicada estratégia de modelagem bidimensional modificada é atrativa, sobretudo pelo fato de exigir dados de modelagem mínimos e tempo computacional muito reduzido. Para análises gerais ou no caso de ser necessário o cálculo dos componentes dos campos elétrico e magnético na direção  $y$ , deve-se recorrer aos métodos tridimensionais, embora estes demandem um número bem maior de dados e caracterizem um esforço computacional maior.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Buscou-se neste informe técnico, por intermédio de um exemplo de aplicação muito simples, apontar as diferenças entre os resultados dos cálculos bidimensionais e tridimensionais dos campos elétrico e magnético junto ao solo e do campo elétrico na superfície dos cabos de linhas aéreas de transmissão.

De tais resultados, ficaram claros os efeitos das catenárias dos cabos e da presença das torres da linha na variação destes parâmetros ao longo do comprimento da linha. Em geral, como esperado, para cálculos em pontos próximos do meio do vão, onde os cabos encontram-se à menor altura, os métodos bidimensionais simples mostraram-se razoáveis.

Contudo, ao longo dos vãos da linha, a precisão dos resultados somente é conseguida com procedimentos mais elaborados. Para tal, uma metodologia bidimensional modificada mostrou-se razoável para o cálculo em pontos não muito próximos das torres da linha, nomeadamente distanciados de cerca de 1 a 2 vezes a altura das torres. Esse processo tem a grande vantagem de ser de implementação computacional muito simples e de rápida execução. Para a análise por todo o comprimento da linha, um processo de cálculo tridimensional é inevitável, apesar deste ter custo computacional elevado, porém perfeitamente realizável pelos computadores atuais, a exemplo do processo que foi utilizado neste trabalho.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SALARI, J. C., PORTELA, C., "Uma Metodologia para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos – Aplicação ao Cálculo da Propagação de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão", XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Curitiba, Brasil, 2005

- [2] SALARI, J. C., "Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência", Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006 (Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120601.pdf> )
- [3] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines, 1998
- [4] SALARI, J. C., SILVA, J. I., MESQUITA, E. N., *et al.*, "Um Sistema Computacional Integrador de Modelos Matemáticos para Cálculo e Otimização de Linhas de Transmissão com Feixes de Condutores Convencionais e Não Convencionais", IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE), Rio de Janeiro, Brasil, 2004
- [5] IEEE WG, "A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 98, n. 6, pp.1996-2014, 1979
- [6] IEEE WG, "Magnetic Fields from Electric Power Lines - Theory and Comparison to Measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 4, Outubro, 1988
- [7] WAIT, J. R., "Complex Image Theory - Revisited", IEEE Antennas Propagation Magazine, v. 33, n. 4, pp. 27-29, Agosto, 1991
- [8] MALIK, N. H., "A Review of the Charge Simulation Method and Its Application", IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 24. n. 1, pp. 3-20, Fevereiro, 1989
- [9] ORTIZ, L. N., "Critérios de Otimização do Método de Simulação de Carga no Cálculo do Campo Elétrico em Arranjos de Alta Tensão e Sua Extensão ao Cálculo do Campo Magnético", Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991
- [10] SALARI, J. C., "Otimização da geometria de feixes de condutores de linhas de transmissão", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1993
- [11] MORENO, G. O., PORTELA, C., "O Cálculo dos Campos Elétrico e Magnético de L.T. Visando a Otimização do Projeto, o Impacto Ambiental e a Comparação de Alternativas", XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Florianópolis, 1995
- [12] DOMINGUES, L. A. M. C., MPALANTINOS NETO, A., BARBOSA, C. R. N., *et al.*, "Mapeamento de Campos Eletromagnéticos em Linhas do Sistema de Transmissão de Furnas (138 kV – 765 kV)", XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Uberlândia, Minas Gerais, Outubro, 2003
- [13] HAMEYER, K., MERTENS, R., BELMANS, R., "Numerical Methods to Evaluate the Electromagnetic Fields Below Overhead Transmission Lines and Their Measurement", First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits, and Systems, pp. 32-36, Caracas, Venezuela, 1995
- [14] FLORKOWSKA, B., KORCZYNSKI, A. J., TIMLER, M., "Analysis of Electric Field Distribution Around the High-Voltage Overhead Transmission Lines With an ADSS Fiber-Optic Cable", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 3, pp. 1183-1189, Julho, 2004
- [15] MPALANTINOS NETO, A., "Geração de Malha em Casca Tridimensional – Uma Aplicação à Solução de Problemas de Potencial pelo Método dos Elementos de Contorno", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005 (Disponível em: [http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/MPALANTINOS%20NETO\\_A\\_05\\_t\\_M\\_rhs.pdf](http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/MPALANTINOS%20NETO_A_05_t_M_rhs.pdf) )
- [16] STEINBIGLER, H., HALLER, D., "Comparative Analysis of Methods for Computing 2-D and 3-D Electric Fields", IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 26, n. 3, pp. 529-536, Junho, 1991
- [17] SENDAULA, H. M., JOHNSON, R. R., *et al.*, "Electric Field Induced by EHV Transmission Over Irregular Terrain", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 102, n. 5, pp. 1452-1458, Maio, 1983
- [18] PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems; I Physical and Methodological Aspects; II Practical Application Examples", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 379-390, Austin, E.U.A., 1997
- [19] PORTELA, C., "Soil Electromagnetic Behavior in Frequency Domain and its Influence in Lightning Effects", Ground'2002 International Conference on Grounding and Earthing Proceedings, pp. 211-216, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro, 2002
- [20] SALARI, J. C., PORTELA, C., "Frequency Dependent Behavior of Grounding Systems", VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA) Proceedings, pp. 75-81, Curitiba, Brasil, Novembro, 2003