

**ESTUDO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL**

BRUNO DE SOUZA PERRO

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc.
(Examinador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.
(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

SOUZA PERRO, BRUNO

Estudos de Campos Eletromagnéticos
em Linhas de Transmissão a Frequência
Industrial [Rio de Janeiro] 2007

vi, 64 p. 29,7 cm (UFRJ, Graduação
Engenharia Elétrica, 2007)

Projeto de Graduação – Universidade
Federal do Rio de Janeiro

1. Linhas de Transmissão
2. Campos Eletromagnéticos

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Julia e Dalpes, que me criaram com muito carinho, sendo responsáveis pelo meu caráter e formação. Eles para mim são mais do que pais, são grandes amigos.

Agradeço aos meus tios, Vera e Darlan, por terem me acolhido como filho em sua casa, e especialmente ao meu primo Darlan que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a minha madrinha Patrícia e ao meu padrinho Geraldo pelo apoio e incentivo que foram de vital importância na minha vida, nem precisando mencionar este sucesso.

Agradeço a minha namorada Suelen pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões, além é claro aos momentos maravilhosos.

Agradeço a Equipe Berimbal, responsável por momentos de diversão inimagináveis, que sem eles não valeria a pena ter amigos.

Agradeço aos meus amigos de trabalho da Fluxo, que para mim são mais do que amigos de trabalho, tendo eles me proporcionado um incrível crescimento não somente profissional como também pessoal.

Agradeço a todos os professores e funcionários da UFRJ pela formação e aprendizado proporcionados durante esses anos e quem sabe mais outros anos.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, que se eu for citar aqui não acabaria nunca.

Muito obrigado a todos!!!

Resumo

Neste trabalho são apresentados estudos de campos eletromagnéticos em linhas de transmissão. Esses estudos são baseados na análise de alguns casos usuais encontrados em linhas de transmissão. Para esses estudos são apresentadas metodologias de cálculo dos campos eletromagnéticos. Com isso pode-se ter uma idéia destes campos e dos seus efeitos.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Capítulo 1:	
Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Organização	2
Capítulo 2:	
Metodologia Utilizada Para o Cálculo dos Campos Eletromagnéticos	4
2.1 Campo Elétrico	5
2.1.1 Campo Elétrico Superficial	6
2.1.2 Campo Elétrico no Solo	11
2.2 Campo Magnético	13
2.2.1 Efeitos Magnéticos de um Único Condutor	17
2.2.2 Efeitos Magnéticos de uma Linha Trifásica	18
2.2.3 Induções Eletromagnéticas	23
2.3 Comentários	25
Capítulo 3:	
Estudos de Caso	26
3.1 Circuito Simples de 500 kV	28
3.1.1 Campo Elétrico na Altura Média	30
3.1.2 Campo Elétrico na Altura Mínima	32
3.1.3 Campo Magnético na Altura Média	33
3.1.4 Campo Magnético na Altura Mínima	34
3.2 Circuito Duplo de 230 kV	35
3.2.1 Campo Elétrico	36
3.2.2 Campo Magnético	40
3.3 Circuito Delta de 500 kV Com Feixe Expandido	42
3.3.1 Campo Elétrico	44
3.3.2 Campo Magnético	46
3.4 Campos Elétricos na Presença de Oleoduto	48
3.4.1 Efeito do Diâmetro do Oleoduto	48

3.4.2 Efeito da Posição do Oleoduto	51
3.5 Comentários	54
Capítulo 4:	
Conclusões e Trabalhos Futuros	56
Referências Bibliográficas	58
Apêndice A	
Efeitos e Limites dos Campos Eletromagnéticos	59

Capítulo 1

Introdução

Os campos eletromagnéticos estão presentes nas nossas vidas mais do que possamos imaginar. Seus efeitos trazem ou podem trazer graves problemas ao meio ambiente. Por isso vários estudos sobre campos eletromagnéticos são feitos em diversas instituições a fim de analisá-los e propor soluções para seus problemas

Na atualidade, entre os produtores de campos eletromagnéticos de maior intensidade está a linhas de transmissão (LT), sendo as linhas de extra-alta tensão as que mais merecem cuidados a este respeito.

Os campos eletromagnéticos são um dos grandes limitadores num projeto de linha de transmissão, devendo-se tomar diversos cuidados com seus valores. Entre os campos que necessita maior atenção está o campo elétrico superficial nos condutores, que pode ocasionar, uma vez ultrapassado o seu limite, o conhecido efeito corona, podendo trazer grandes perdas na transmissão. Outro problema que pode ser encontrado é o efeito do campo eletromagnético no solo, o qual acarreta sérios problemas ao longo da faixa de passagem da LT e ao seu arredor.

Numa LT todos esses campos acabam interferindo na escolha das estruturas, dos cabos condutores, na faixa de passagem e na localização da mesma. Por isso estudos relacionados aos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão têm tanta importância.

Em vista da enorme importância da análise dos campos eletromagnéticos numa LT, neste trabalho é apresentada uma visão geral dos campos eletromagnéticos em LT's e seus efeitos visando os campos elétricos superficiais nos condutores, campos elétricos e magnéticos no solo e induções eletromagnéticas.

Para este estudo serão feitas diversas simulações computacionais de vários casos, sendo as simulações baseadas nas metodologias de cálculo dos campos eletromagnéticos apresentadas neste trabalho.

1.1 Motivação

A principal motivação para a realização deste trabalho veio da grande importância que estudos relacionados à LT's tem na atualidade e conseqüentemente seus efeitos. Entre estes estudos, os de campos eletromagnéticos são um dos mais interessantes, onde apresentam grandes restrições aos projetos de LT's na sua implantação e sua manutenção. Devido a isto, este assunto é abordado neste trabalho.

1.2 Organização

O presente trabalho se encontra dividido em quatro capítulos, sendo a introdução já apresentada neste primeiro capítulo. Os assuntos abordados em cada um deles estão descritos abaixo.

Capítulo 2:

Este capítulo introduz as metodologias aplicadas no cálculo dos campos eletromagnéticos. A metodologia do campo elétrico apresentada é baseada considerando o solo e o cabo condutor ideais. Já a metodologia do campo magnético trata o solo como sendo um bom meio condutor.

Capítulo 3:

Os estudos de caso são apresentados neste capítulo, sendo realizadas várias simulações com programas feitos baseados na metodologia do capítulo 2. Esses estudos tratam dos campos elétricos e magnéticos no solo, campos elétricos superficiais, induções eletromagnéticas e efeitos dos campos elétricos na presença de oleodutos.

Capítulo 4:

Este capítulo se destina à conclusão do trabalho.

Apêndice A:

Neste apêndice são apresentados limites dos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão baseados em alguns órgãos responsáveis. Também é mostrado o efeito a curto e longo prazo de exposição aos campos eletromagnéticos.

Capítulo 2

Metodologia Utilizada Para o Cálculo dos

Campos Eletromagnéticos

Este capítulo trata da metodologia que foi utilizada para o cálculo dos campos eletromagnéticos. Com base nesta metodologia foram feitos programas para o cálculo dos campos eletromagnéticos, em Matlab. Os resultados computacionais utilizando estes programas e esta metodologia serão apresentados no capítulo 3.

A partir das equações de Maxwell para os campos estáticos (eletrostática e magnetostática) considerando todos os termos que possuem $\partial/\partial t = 0$, conforme mostra a equação 2.1, e das equações de continuidade e supondo campos quase estacionários conforme [1], poderá se aplicar a metodologia apresentada neste capítulo.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times E &= 0 \\ \nabla \cdot H &= 0 \\ \nabla \times H &= J\end{aligned}\tag{2.1}$$

No cálculo do campo elétrico, o solo e os condutores foram considerados ideais, sendo utilizado o método das imagens para o cálculo, pois a baixas frequências os parâmetros transversais são considerados constantes, podendo a linha ser tratada como de corrente contínua. Apresenta-se também um método de cálculo do campo elétrico superficial e do campo elétrico crítico de corona e suas perdas. Esta metodologia adotada foi baseada em [2, 3].

O método de cálculo do campo magnético será feito com base na estrutura do artigo do Semlyen e Shirmohammadi [4], onde se consideram as correntes de retorno pela terra, pois os parâmetros longitudinais são dependentes da frequência. Como as tensões estão referenciadas para a terra, há uma corrente de retorno pela terra. Sendo assim as equações de Carson terão que ser utilizadas.

Na metodologia que será apresentada, a permissividade dielétrica do solo ϵ_{solo} será desprezada. Isto ocorre pois a permissividade dielétrica do solo está diretamente ligada a frequência $\omega\epsilon_{solo}$ e como trabalharemos a baixas frequências da ordem de 60 Hz, pode ser considerado que $\sigma_{solo} \gg \epsilon_{solo}$ sendo então desprezado a parcela $i\omega\epsilon_{solo}$ da equação do solo ($\sigma_{solo} \mp i\omega\epsilon_{solo}$).

2.1 Campo Elétrico

Admitindo-se o caso de condutores paralelos separados por distâncias muito superiores aos seus diâmetros, um método de cálculo para a determinação das cargas dos condutores, que apresenta boa aproximação, é o de se considerar uma linha de carga situada no eixo do condutor, onde a densidade linear de carga é dada por:

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (2.1.1)$$

onde: $[Q]$ - vetor de densidades lineares de cargas nos condutores (C/m), na forma fasorial;

$[P]$ - matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell (m/F);

$[V]$ - vetor de tensões nos condutores em relação ao solo (V), na forma fasorial;

Os termos da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell $[P]$ são:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h_i}{r_i} \right] \quad (2.1.2)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{d'_{ij}}{d_{ij}} \right]$$

onde: ϵ_0 - permissividade do ar ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m);

h_i - altura média do condutor “i” em relação ao solo (m);

r_i - raio do condutor “i” (m);

d_{ij} - distância entre o condutor “i” e o condutor “j” (m);

d'_{ij} - distância entre o condutor “i” e a imagem do condutor “j” (m);

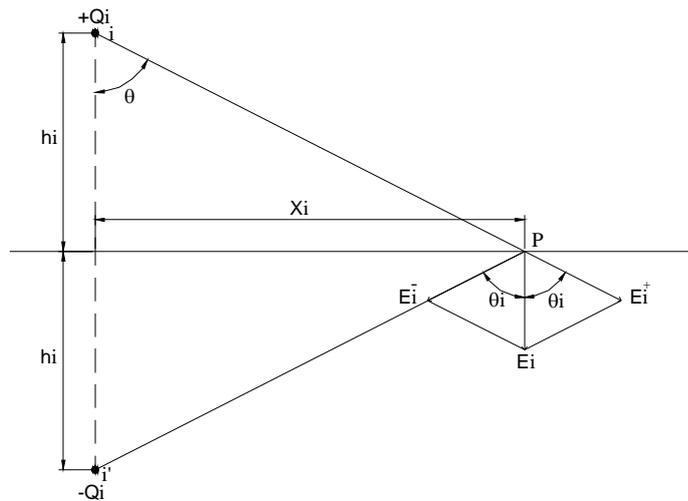


Figura 2.1 – Representação do método das imagens.

2.1.1 Campo Elétrico Superficial

Seja um condutor infinitamente longo, situado a uma altura h do solo, carregado com uma densidade linear de cargas Q . Admitindo-se que o condutor está suficientemente afastado do solo ($h \gg$ raio do condutor), as suas superfícies equipotenciais serão cilindros, com eixo no condutor, e o campo elétrico \vec{E} será sempre perpendicular ao condutor, pela hipótese do mesmo ser infinito.

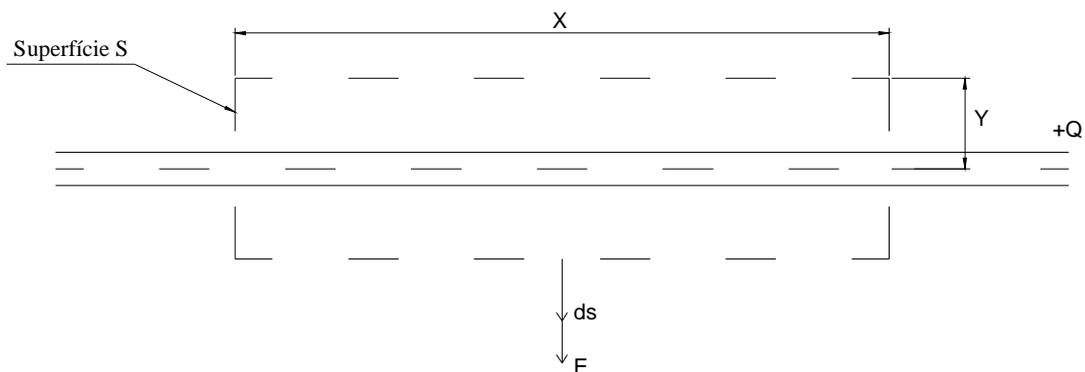


Figura 2.2 – Superfície gaussiana em um condutor cilíndrico.

Aplicando-se a lei de Gauss sobre um desses cilindros (superfície gaussiana), esquematizado na figura 2.2, pode-se escrever:

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{Q_{total}}{\epsilon_0} \quad (2.1.1.1)$$

Substituindo pela integral da superfície lateral e das bases:

$$\int_{lateral} \vec{E} \cdot \vec{ds} + \int_{bases} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{Q_{total}}{\epsilon_0} \quad (2.1.1.2)$$

na superfície lateral tem-se:

$$\int_{lateral} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \int_{lateral} E \cdot ds \cdot \cos 0^\circ \quad (2.1.1.3)$$

nas bases tem-se:

$$\int_{bases} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \int_{bases} E \cdot ds \cdot \cos 90^\circ = 0 \quad (2.1.1.4)$$

assim sendo, temos resolvendo (2.1.1.1):

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \int_{lateral} E \cdot ds = \frac{Q \cdot x}{\epsilon_0} \quad (2.1.1.5)$$

$$E \int_{lateral} ds = E \cdot 2\pi yx = \frac{Q \cdot x}{\epsilon_0}$$

resultando em:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 y} \quad (2.1.1.6)$$

No caso do campo elétrico na superfície do condutor, ($y = r$), é usual se expressar o mesmo em módulo.

$$E = \frac{[Q]}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.1.1.7)$$

Esta expressão admite que o campo elétrico não varie ao longo do perímetro do condutor contido num plano perpendicular ao mesmo, ou seja, as cargas se distribuem uniformemente sobre a superfície do condutor.

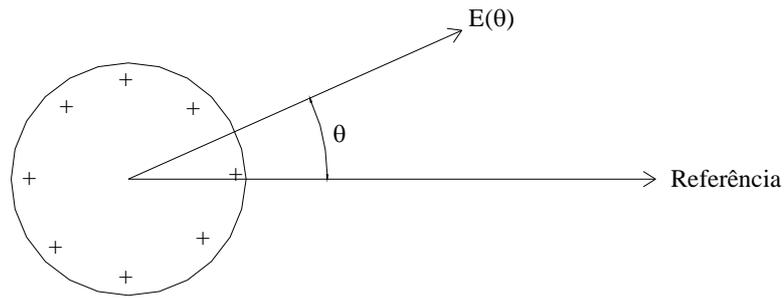


Figura 2.3 – Campo elétrico em um condutor.

$$E(\theta) = \text{constante} = \frac{[Q]}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.1.1.8)$$

Como mostra a figura 2.3 o ângulo que o campo elétrico faz com relação a uma referência radial do condutor é representado por θ . No caso de um único condutor o campo elétrico não irá variar com esse ângulo, mas quando se trata de feixe de condutores o campo elétrico varia com o ângulo, e o seu máximo dependente da configuração do feixe, sendo adotado a referência no máximo campo onde $\theta = 0$, como poderá se notar na equação 2.1.1.9.

Num condutor singelo e num feixe de condutores, as linhas de força e as superfícies equipotenciais são apresentadas na figura 2.4.

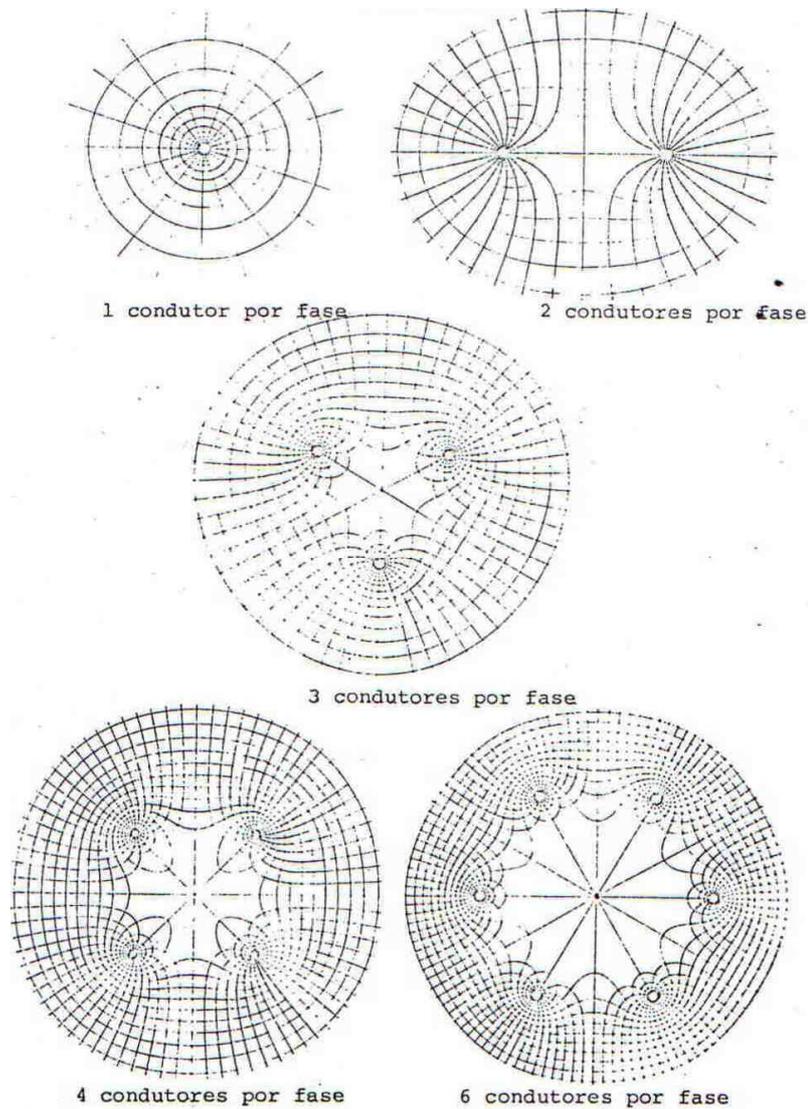


Figura 2.4 – Linhas de força num feixe de condutores [2].

Observa-se que o campo elétrico superficial, no caso de feixe de condutores, varia com o ângulo θ e é dado por:

$$E(\theta) = E_{\text{médio}} \left(1 + \frac{d}{D} (N - 1) \cos(\theta) \right) \quad (2.1.1.9)$$

onde: d - diâmetro do cabo condutor;
 D - diâmetro do feixe de condutores;
 N - número de condutores no feixe;

$$E_{\text{médio}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.1.1.10)$$

O campo elétrico crítico de corona é o limiar a partir do qual começa a haver ionização do ar no entorno do condutor e é dado pela fórmula de Peek [3]:

$$E = 30m\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (2.1.1.11)$$

onde: m - Fator de superfície do condutor;
 δ - Densidade relativa do ar;
 r - raio do condutor (cm);

O campo elétrico crítico de corona é calculado em valor de pico (valor máximo), utilizando o máximo das tensões entre os condutores e o solo.

Perdas por efeito corona ocorrem em linhas de transmissão quando o campo elétrico superficial dos condutores excede a rigidez dielétrica do ar, ionizando o mesmo no entorno dos condutores. Esta ionização do ar no entorno dos condutores pode ser parcial, localizada somente em alguns pontos sobre o condutor, ou generalizada, havendo uma ionização completa do ar no entorno do condutor.

Em linhas de transmissão com condutores convenientemente dimensionados em relação a este fenômeno, ou seja, com o campo elétrico superficial máximo dos condutores inferior a rigidez dielétrica do ar, as perdas por corona em tempo bom, relacionadas às ionizações esporádicas e bastante discretas, são inferiores às perdas por corona em tempo chuvoso, ocasião em que se pode ter uma intensa ionização no entorno do condutor [2, 3]. Em geral, as perdas por corona em tempo bom em linhas de extra alta tensão são devidas praticamente às cadeias de isoladores e não aos condutores, situando-se entre 1 e 3 kW/km [2].

As perdas por corona em tempo chuvoso são calculadas de acordo com uma expressão retirada de [3] e apresentada em (2.1.1.12).

$$P = P_0 + \left(\frac{V}{\sqrt{3}} J r^2 \ln(1+10R) \right) \sum_{i=1}^N E_i^m \quad (2.1.1.12)$$

onde: P - perda total 3ϕ na linha em tempo chuvoso (kW/km);
 P_0 - perda total 3ϕ na linha em tempo bom (kW/km);
 V - tensão fase-fase (kV);

$$J - \text{constante} \begin{cases} J=4,38 \times 10^{-10} & \text{para linha de 400kV} \\ J=3,33 \times 10^{-10} & \text{para linha de 500kV/700kV} \end{cases};$$

r – raio do condutor (cm);

R – índice pluviométrico (mm/h);

N – número total de condutores;

E – campo elétrico superficial na parte inferior do condutor (kV/cm);

m – expoente=5.

2.1.2 Campo Elétrico no Solo

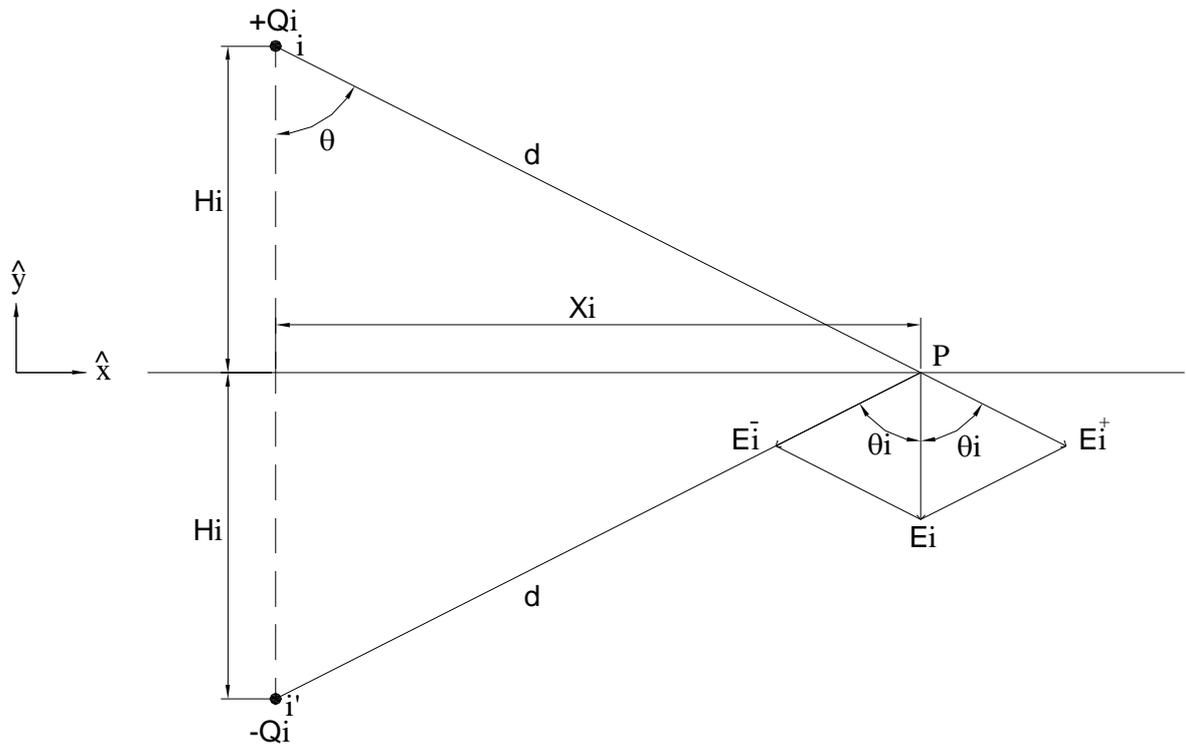


Figura 2.5 – Representação do método das imagens.

Para o cálculo do campo elétrico no solo, utiliza-se o método das imagens pois a baixas frequências o solo e o condutor poderão ser considerados ideais.

Seja o condutor “i”, do qual já se conhece a densidade linear de carga e sua imagem em relação ao solo.

O campo elétrico devido a um condutor infinito carregado com uma densidade linear de carga Q , situado a uma distância d deste, é dado por:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 d} \quad (2.1.2.1)$$

Para o condutor “i” o campo elétrico é E_i^+ , situado no ponto P , sobre o solo:

$$\vec{E}_i^+ = E_i^+ \sin \theta_i \hat{x} + E_i^+ \cos \theta_i \hat{y} \quad (2.1.2.2)$$

e o valor do campo elétrico devido a imagem do condutor, no ponto P , é:

$$\vec{E}_i^- = -E_i^- \sin \theta_i \hat{x} - E_i^- \cos \theta_i \hat{y} \quad (2.1.2.3)$$

Como $|\vec{E}_i^+| = |\vec{E}_i^-|$, o valor do campo elétrico total E_i , no ponto P , devido ao condutor “i” e a sua imagem é dado por:

$$E_i = 2E_i^+ \cos \theta_i$$

$$E_i = 2 \cdot \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{x_i^2 + h_i^2}} \cdot \frac{h_i}{\sqrt{x_i^2 + h_i^2}} \quad (2.1.2.4)$$

$$E_i = \frac{2Q_i h_i}{2\pi\epsilon_0 (x_i^2 + h_i^2)}$$

Para um conjunto de N condutores o campo elétrico total num ponto sobre o solo é dado por:

$$E_T = \sum_{i=1}^N \frac{2Q_i h_i}{2\pi\epsilon_0 (x_i^2 + h_i^2)} \quad (2.1.2.5)$$

Note-se que, num caso de uma linha de corrente alternada, as tensões entre os condutores e o solo são dadas na forma fasorial, obtendo-se conseqüentemente, as cargas também na forma fasorial.

É usual se informar o valor do campo total em módulo e a tensão entre os condutores e o solo em valor eficaz.

2.2 Campos Magnéticos

O campo magnético e as indutâncias próprias e mútuas relacionadas às impedâncias de linhas de transmissão são significativamente afetadas através de correntes de retorno por terra. Para solo homogêneo e bom condutor os cálculos são executados normalmente usando-se as equações de Carson [5]. A avaliação delas requer o cálculo de integrais infinitas ou, equivalentemente, da série de Carson. Deri et al em [6] propõem fórmulas simplificadas para o cálculo das impedâncias próprias e mutuas de condutores com retorno por terra. A expressão de uma impedância mútua, de acordo com Deri, é:

$$Z = K \ln \frac{D''}{D'} \quad (2.2.1)$$

onde: $K = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi}$ (2.2.2a)

$$D' = \sqrt{(h-h')^2 + D^2} \quad (2.2.2b)$$

$$D'' = \sqrt{(h+h'+2p)^2 + D^2} \quad (2.2.2c)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_{solo}}} \quad (2.2.3)$$

Em (2.2.3) p representa a profundidade complexa e por conseguinte D'' de (2.2.2c) também é complexo. Então, nós chamaremos a imagem k' do condutor k de imagem complexa.

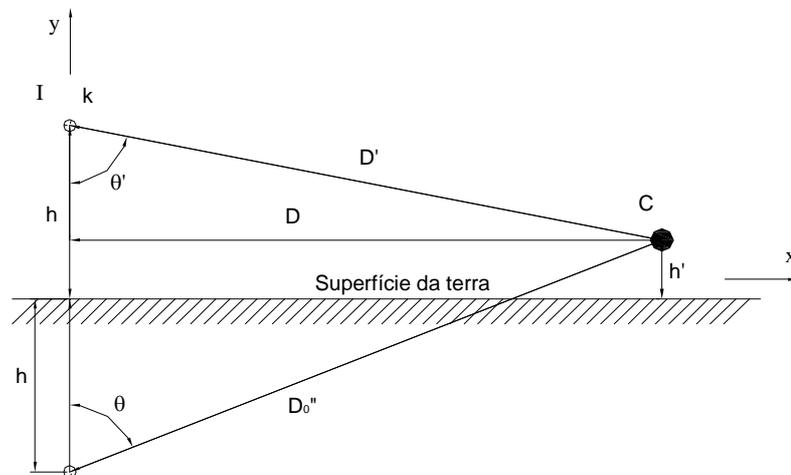


Figura 2.6 – Geometria sem plano complexo.

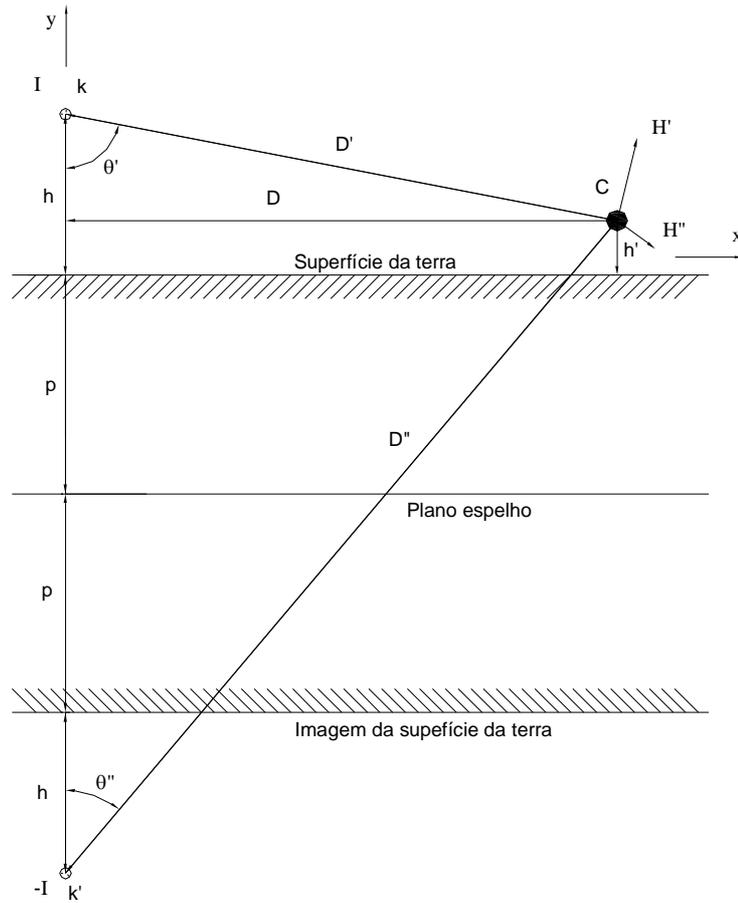


Figura 2.7 – Geometria complexa para o cálculo de H .

A equação (2.2.1) é fundamental, sendo proposta por Wait et al [7]. Extraímos de (2.2.1) um termo que corresponde à correção de Carson e comparamos isto às fórmulas de Carson.

A equação (2.2.1) pode ser reescrita como segue:

$$Z = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_0''}{D'} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D''}{D_0''} \quad (2.2.4)$$

$$\text{onde: } D_0'' = \sqrt{(h+h')^2 + D^2} \quad (2.2.5)$$

é obtido com D'' de (2.2.2c) para $p = 0$.

De (2.2.4) nós obtemos a aproximação à correção de Carson.

$$P' + jQ' = \frac{j}{2} \ln \frac{D''}{D_0''} \quad (2.2.6)$$

Com a intenção de se expressar P' e Q' em termos dos parâmetros de Carson,

$$r = \frac{D'_0}{p} \quad (2.2.7a)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{h+h'}{D''_0} \right) \quad (2.2.7b)$$

A razão $\frac{D''}{D''_0}$ é escrita como:

$$\frac{D''}{D''_0} = \sqrt{1 + (1-j) \frac{2\sqrt{2} \cos \theta}{r} - j \frac{4}{r^2}} \quad (2.2.8)$$

Substituindo-se (2.2.8) em (2.2.6) resulta nas expressões seguintes para as condições de correção simplificadas:

$$P' = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (2.2.9a)$$

$$Q' = \frac{1}{4} \ln \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.2.9b)$$

$$\text{onde: } a = 1 + \frac{2\sqrt{2}}{r} \cos \theta \quad (2.2.10a)$$

$$b = \frac{4}{r^2} + \frac{2\sqrt{2}}{r} \cos \theta \quad (2.2.10b)$$

A fim de se ter uma comparação entre esses termos simplificados da correção e os de Carson, variamos r de 10^{-2} a 10^2 para $\theta = 0^\circ$ e 90° , esta comparação está apresentada nas figuras 2.2.2 e 2.2.3. A comparação demonstra a exatidão das técnicas complexas da profundidade para valores maiores de r ($r \geq 4$). Isto corresponde às distâncias maiores do condutor e/ou das profundidades menores da imagem complexa (frequências mais elevadas e/ou condutividade da terra mais elevada). Mesmo para valores menores de r os erros envolvidos estão dentro de 10% dos valores dos termos da correção de Carson e de 1% dos valores totais da impedância. Sendo assim para uma frequência de 60 Hz e um $\sigma_{solo} = 10^{-2}$ temos um valor de $r = 0,044 \underline{45^\circ}$, com isso a aproximação pode ser utilizada com um erro consideravelmente pequeno.

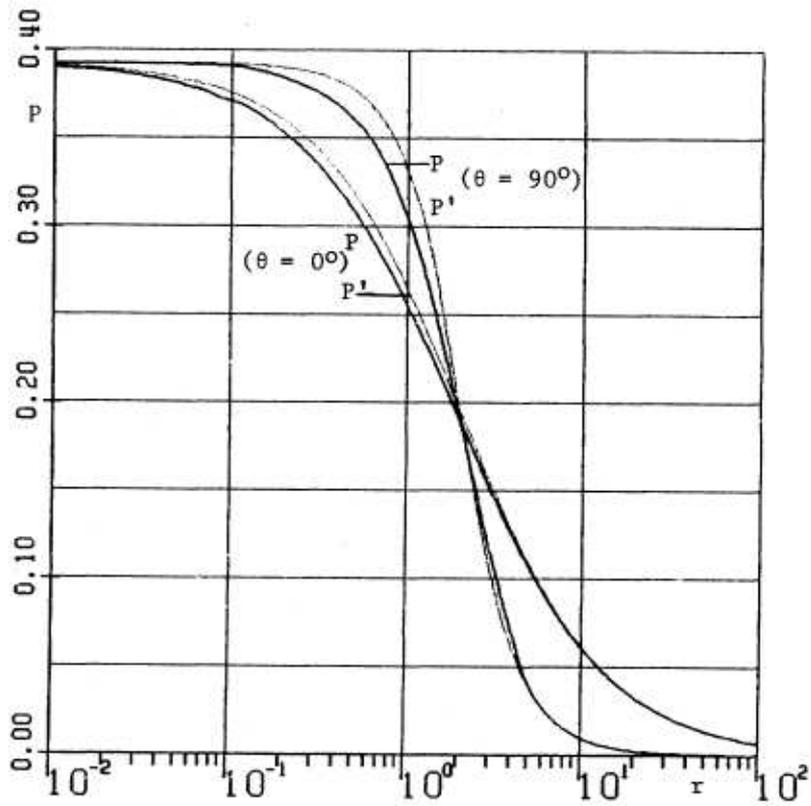


Figura 2.8 – Comparação entre os valores de Carson (P) e as correções simplificadas (P') [4].

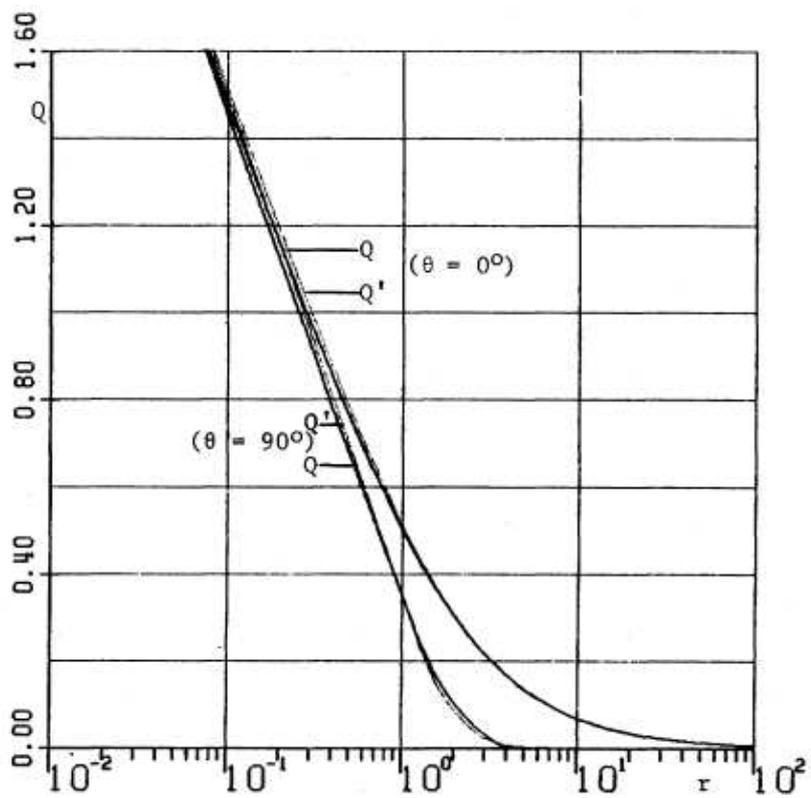


Figura 2.9 – Comparação entre os valores de Carson (Q) e as correções simplificadas (Q') [4].

2.2.1 Efeitos Magnéticos de um Único Condutor.

Da expressão (2.2.1) pode-se obter o acoplamento de fluxo no condutor **C** diretamente devido a uma corrente I no condutor primário:

$$\phi = \frac{ZI}{j\omega} = I \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D''}{D'} \quad (2.2.1.1)$$

Movendo o condutor **C**, da figura 2.7, infinitesimalmente na direção vertical, nós podemos identificar a componente horizontal H_x do campo magnético:

$$H_x = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{D''} \frac{\partial D''}{\partial y} - \frac{1}{D'} \frac{\partial D'}{\partial y} \right) \quad (2.2.1.2.a)$$

e movendo **C** horizontalmente, obtemos:

$$H_y = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{D''} \frac{\partial D''}{\partial x} - \frac{1}{D'} \frac{\partial D'}{\partial x} \right) \quad (2.2.1.2b)$$

Nas equações (2.2.1.2) nós ignoraremos o segundo termo temporariamente, mas responderemos depois por seu efeito. Calculamos então, usando equação (2.2.2c):

$$\frac{\partial D''}{\partial x} = \frac{\partial D''}{\partial D} = \frac{D}{D''} = \sin \theta'' \quad (2.2.1.3a)$$

$$\frac{\partial D''}{\partial y} = \frac{\partial D''}{\partial h'} = \frac{h+h'+2p}{D''} = \cos \theta'' \quad (2.2.1.3b)$$

e substituindo (2.2.1.3) em (2.2.1.2), obtemos:

$$H_x'' = \frac{I}{2\pi D''} \frac{h+h'+2p}{D''} = \frac{I}{2\pi D''} \cos \theta'' \quad (2.2.1.4a)$$

$$H_y'' = -\frac{I}{2\pi D''} \frac{D}{D''} = -\frac{I}{2\pi D''} \sin \theta'' \quad (2.2.1.4b)$$

A intensidade de campo resultante é:

$$H'' = \sqrt{H_x''^2 + H_y''^2} = \frac{-I}{2\pi D''} \quad (2.2.1.5)$$

Como esperado para geometria real, o vetor H'' é representado na figura 2.7, perpendicular à linha D'' .

O vetor H' é similarmente obtido:

$$H' = \frac{I}{2\pi D'} \quad (2.2.1.6)$$

Como representado na figura 2.7, seus componentes são:

$$H'_x = \frac{I}{2\pi D'} \cos \theta' \quad (2.2.1.7a)$$

$$H'_y = \frac{I}{2\pi D'} \sin \theta' \quad (2.2.1.7b)$$

onde: $\sin \theta' = \frac{D}{D'}$ (2.2.1.8a)

$$\cos \theta' = \frac{h-h'}{D'} \quad (2.2.1.8b)$$

Somando (2.2.1.4) e (2.2.1.6) obtemos:

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{\cos \theta'}{D'} + \frac{\cos \theta''}{D''} \right) = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{h-h'}{D'^2} + \frac{h+h'+2p}{D''^2} \right) \quad (2.2.1.9a)$$

$$H_y = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{\sin \theta'}{D'} - \frac{\sin \theta''}{D''} \right) = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{D}{D'^2} - \frac{D}{D''^2} \right) \quad (2.2.1.9b)$$

2.2.2 Efeitos Magnéticos de Uma Linha Trifásica.

Nos resultados das equações (2.2.1) a (2.2.1.9) considera-se um único condutor da linha de transmissão. No que segue nós consideraremos a linha de transmissão normal, três fases operando e denotaremos as quantidades resultantes por $H_{x3\phi}$ e $H_{y3\phi}$.

Assumimos correntes de seqüência positiva equilibradas.

$$I_b = \alpha^2 I_a; I_c = \alpha I_a \quad (\alpha = e^{j120^\circ}) \quad (2.2.2.1a)$$

Assim todas as correntes estão definidas em termos de uma única variável I_a . Nós notamos que esta declaração é até mesmo válida incluindo as correntes de retorno pelo solo, contanto que $\sum I_k = 0$ (k=a, b, c, ...)

Novamente, nós ignoramos temporariamente, para conveniência, os condutores sobre o solo, mas depois consideramos o seu efeito.

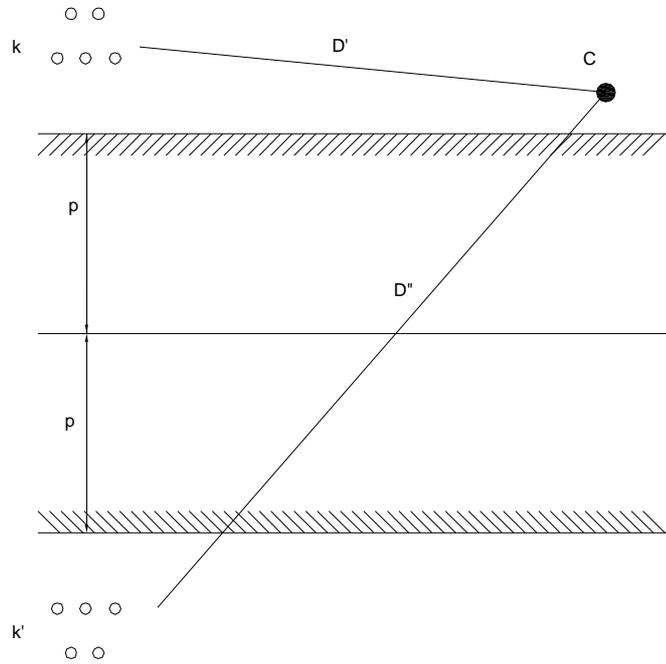


Figura 2.10 – Geometria complexa de uma linha trifásica.

A distância individual D_k'' de cada condutor k' da figura 2.10 até o condutor C será agora tratado de forma diferente do apresentado anteriormente, correspondendo agora a separações horizontais e verticais. Estas separações são pequenas comparadas a D'' . Então nós podemos usar expansões lineares de D'' para obter cada D_k'' . Este procedimento assume um valor de referência de D'' , dado por (2.2.2c), com h e D . Para cada condutor k' , porém, nós teríamos h_k e D_k , respectivamente. O condutor à esquerda, e mais alto que a referência adotada teria $\Delta D_k = (D_k - D)$ e $\Delta h_k = (h_k - h)$ ambos positivos. Claro que a referência poderia coincidir com um dos condutores.

A expansão linear de D_k'' é:

$$D_k'' = D'' + K_D'' \Delta D_k + K_h'' \Delta h_k \quad (2.2.2.2)$$

onde:
$$K_D'' = \frac{\partial D''}{\partial D} = \frac{D}{D''} = \sin \theta'' \quad (2.2.2.3a)$$

$$K_h'' = \frac{\partial D''}{\partial h} = \frac{h+h'+2p}{D''} = \cos \theta'' \quad (2.2.2.3b)$$

Estes coeficientes (2.2.2.3) são as mesmas projeções complexas nos eixos **X** e **Y** das funções assim como determinado em (2.2.1.3). Assim os incrementos em (2.2.2.2) têm uma interpretação geométrica simples que são as projeções nos planos.

Como queremos calcular $H_{x3\phi}$ e $H_{y3\phi}$, nós estamos interessados no efeito resultante.

$$\sum I_k f''(D_k'', D_k, h_k) \quad (k=a,b,c) \quad (2.2.2.4)$$

onde $f''(\bullet)$ é uma função geral. Então nós podemos ampliar isto ao redor de D'' , D e h usando (2.2.2.2) e a partir de expansões em série de Taylor.

$$\begin{aligned} f''(\bullet) &= f_0'' + \frac{\partial f''}{\partial D''}(D_k'' - D'') + \frac{\partial f''}{\partial D}(D_k - D) + \frac{\partial f''}{\partial h}(h_k - h) \\ f''(\bullet) &= f'' + \frac{\partial f''}{\partial D''}(K_D'' \Delta D_k + K_h'' \Delta h_k) + \frac{\partial f''}{\partial D} \Delta D_k + \frac{\partial f''}{\partial h} \Delta h_k \end{aligned} \quad (2.2.2.5)$$

As derivadas parciais são avaliadas a D'' , D e h . Substituindo-se (2.2.2.5) em (2.2.2.4), e levando-se em conta (2.2.2.2), nós obtemos:

$$\sum I_k f''(\bullet) = \left[\left(\frac{\partial f''}{\partial D''} K_D'' + \frac{\partial f''}{\partial D} \right) \sum e^{j\alpha_k} \Delta D_k + \left(\frac{\partial f''}{\partial D''} K_h'' + \frac{\partial f''}{\partial h} \right) \sum e^{j\alpha_k} \Delta h_k \right] I_a \quad (2.2.2.6)$$

$$\text{onde:} \quad \alpha_a = 1, \alpha_b = \alpha^2 \text{ e } \alpha_c = \alpha \quad (2.2.2.7)$$

como em (2.2.2.1a).

Por conseguinte, (2.2.2.6) se torna:

$$\sum I_k f''(\bullet) = I_a (f_D'' \Delta D + f_h'' \Delta h) \quad (2.2.2.8)$$

onde:

$$f_D'' = \frac{\partial f''}{\partial D''} K_D'' + \frac{\partial f''}{\partial D} \quad (2.2.2.9a)$$

$$f_h'' = \frac{\partial f''}{\partial D''} K_h'' + \frac{\partial f''}{\partial h}$$

$$\Delta_D = \Delta D_a - \frac{1}{2}(\Delta D_b + \Delta D_c) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(\Delta D_c - \Delta D_b) \quad (2.2.2.9b)$$

$$\Delta_h = \Delta h_a - \frac{1}{2}(\Delta h_b + \Delta h_c) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(\Delta h_c - \Delta h_b)$$

com K_D'', K_h'' dado por (2.2.2.3).

É interessante notar que a expressão nova (2.2.2.8) tem o efeito combinado das três fases e a função original $f(\bullet)$ é substituída pela derivada. Então, a lei de variação (com distância) do efeito combinado é diferente do caso de um único condutor. Agora para os condutores sobre o solo nós obtemos uma equação semelhante para (2.2.2.8):

$$\sum I_k f'(\bullet) = I_a (f_D' \Delta_D + f_h' \Delta_h) \quad (2.2.2.10)$$

onde:

$$f_D' = \frac{\partial f'}{\partial D'} K_D' + \frac{\partial f'}{\partial D} \quad (2.2.2.11a)$$

$$f_h' = \frac{\partial f'}{\partial D'} K_h' + \frac{\partial f'}{\partial h}$$

$$K_D' = \frac{D}{D'} = \sin \theta' \quad (2.2.2.11b)$$

$$K_h' = \frac{h-h'}{D'} = \cos \theta'$$

O efeito resultante é obtido subtraindo (2.2.2.8) de (2.2.2.10):

$$\sum I_k (f'(\bullet) - f''(\bullet)) = I_a ((f_D' - f_D'') \Delta_D + (f_h' - f_h'') \Delta_h) \quad (2.2.2.12)$$

A expressão (2.2.2.12) do efeito combinado sobre o solo dos três condutores de fase e das imagens complexas deles fica significativa quando aplicado aos problemas concretos de interesse: cálculo de $H_{x3\phi}$ e $H_{y3\phi}$.

O campo trifásico H_x pode ser obtido por meio da equação (2.2.1.9a).

$$H_{x3\phi} = \sum \frac{I_k}{2\pi} \left(\frac{h_k - h'}{D_k'^2} + \frac{h_k + h' + 2p}{D_k''^2} \right) \quad (2.2.2.13)$$

Conseqüentemente em (2.2.2.12)

$$f'(\bullet) = \frac{h_k - h'}{2\pi D_k'^2} \quad (2.2.2.14a)$$

$$f''(\bullet) = -\frac{h_k + h' + 2p}{2\pi D_k''^2} \quad (2.2.2.14b)$$

Para (2.2.2.8) e (2.2.2.10), calculamos:

$$f'_D = -2 \frac{h-h'}{2\pi D'^3} K'_D \quad (2.2.2.15a)$$

$$f'_h = -2 \frac{h-h'}{2\pi D'^3} K'_h + \frac{1}{2\pi D'^2}$$

$$f''_D = 2 \frac{h-h'+2p}{2\pi D''^3} K''_D \quad (2.2.2.15b)$$

$$f''_h = 2 \frac{h+h'+2p}{2\pi D''^3} K''_h + \frac{1}{2\pi D''^2}$$

Substituindo-se (2.2.2.15) em (2.2.2.12), obtemos:

$$H_{x3\phi} = \frac{I_a}{2\pi} \left[\left(-\frac{2(h-h')K'_D}{D'^3} - \frac{2(h+h'+2p)K''_D}{D''^3} \right) \Delta_D + \left(-\frac{2(h-h')K'_h}{D'^3} - \frac{2(h+h'+2p)K''_h}{D''^3} + \frac{1}{D'^2} + \frac{1}{D''^2} \right) \Delta_h \right] \quad (2.2.2.16)$$

ou, com K'_D, K'_h, K''_D, K''_h vindo de (2.2.2.11b) e (2.2.1.8):

$$H_{x3\phi} = \frac{I_a}{2\pi} \left[\left(-\frac{2D(h-h')}{D'^4} - \frac{2D(h+h'+2p)}{D''^4} \right) \Delta_D + \left(-\frac{2(h-h')^2}{D'^4} - \frac{2(h+h'+2p)}{D''^4} + \frac{1}{D'^2} + \frac{1}{D''^2} \right) \Delta_h \right] \quad (2.2.2.17)$$

A componente vertical H_y é calculada similarmente. Nós temos de (2.2.1.9b):

$$H_{y3\phi} = \sum \frac{I_a}{2\pi} \left(\frac{D_k}{D_k'^2} + \frac{D_k}{D_k''^2} \right) \quad (2.2.2.18)$$

Conseqüentemente em (2.2.2.12)

$$f'(\bullet) = \frac{D_k}{2\pi D_k'^2} \quad (2.2.2.19a)$$

$$f''(\bullet) = \frac{D_k}{2\pi D_k''^2} \quad (2.2.2.19b)$$

Para (2.2.2.9a) e (2.2.2.11a), calculamos:

$$f'_D = -2 \frac{D}{2\pi D'^3} K'_D + \frac{1}{2\pi D'^2} \quad (2.2.2.20a)$$

$$f'_h = -2 \frac{D}{2\pi D'^3} K'_h$$

$$f_D'' = -2 \frac{D}{2\pi D'^3} K_D'' + \frac{1}{2\pi D'^2} \quad (2.2.2.20b)$$

$$f_h'' = -2 \frac{D}{2\pi D'^3} K_h''$$

Substituindo (2.2.2.20) em (2.2.2.12), obtemos:

$$H_{y3\phi} = \frac{I_a}{2\pi} \left(\left(-\frac{2DK'_D}{D'^3} + \frac{2DK''_D}{D'^3} + \frac{1}{D'^2} - \frac{1}{D'^2} \right) \Delta_D + \left(-\frac{2DK'_h}{D'^3} + \frac{2DK''_h}{D'^3} \right) \Delta_h \right) \quad (2.2.2.21)$$

ou, com K'_D, K''_D, K'_h, K''_h vindo de (2.2.2.11b) e (2.2.1.8):

$$H_{y3\phi} = \frac{I_a}{2\pi} \left(\left(-\frac{2D^2}{D'^4} + \frac{2D^2}{D'^4} + \frac{1}{D'^2} - \frac{1}{D'^2} \right) \Delta_D + \left(-\frac{2D(h-h')}{D'^4} + \frac{2D(h+h'+2p)}{D'^4} \right) \Delta_h \right) \quad (2.2.2.22)$$

Agora o campo magnético total num ponto C é dado pela seguinte equação:

$$H_{3\phi} = \sqrt{H_{x3\phi}^2 + H_{y3\phi}^2} \quad (2.2.2.23)$$

Consideremos agora o campo magnético total num ponto C , então sua densidade de fluxo magnética será:

$$B_{3\phi} = \mu_0 H_{3\phi} \quad (2.2.2.24)$$

sendo:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}.$$

2.2.3 Induções Eletromagnéticas

O campo eletromagnético produzido por uma linha de transmissão induz tensões em circuitos a ela vizinhos, situados dentro da sua zona de influência. Sendo assim apresentaremos a seguir um método de cálculo da tensão longitudinal induzida.

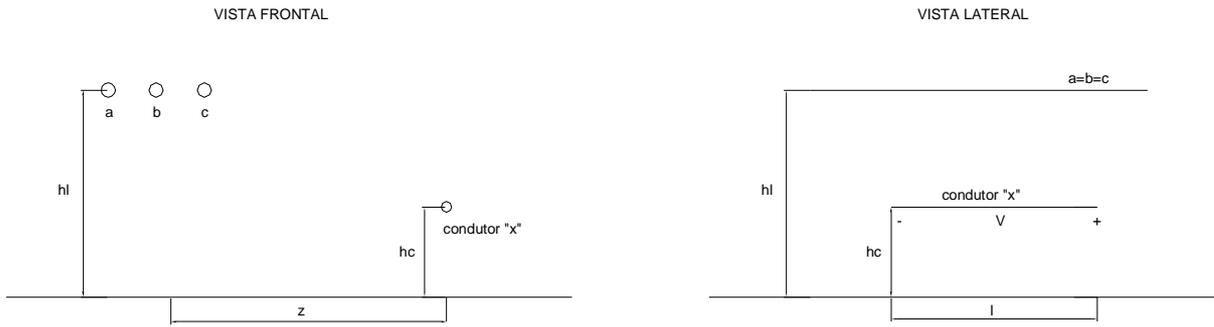


Figura 2.11 – Vistas da LT e do condutor “x”.

Consideremos um condutor “x” e de comprimento “l” paralelo à linha de transmissão como mostrado na figura 2.11.

Então, desprezando-se o efeito de borda e sendo as alturas indicadas na figura as alturas médias, a tensão longitudinal induzida no condutor “x” é dada pela seguinte expressão:

$$V_l = (Z_{ax}I_a + Z_{bx}I_b + Z_{cx}I_c)l \quad (2.2.3.1)$$

onde: I_a , I_b e I_c - são as correntes nas fases da linha (A);

l - comprimento do condutor “x” (km);

Z_{ij} - impedância mutua entre as fases da linha e o condutor “x”.

Para o cálculo de Z_{ij} utilizou-se o método De para uma linha trifásica, que é uma simplificação da série de Carson [5].

$$Z_{ij} = r_d + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{De}{D_{ij}} \right) \quad (2.2.3.2)$$

onde: $r_d = f \cdot 9,869 \times 10^{-4} \left(\frac{\Omega}{km} \right)$ - 1º termo da série de Carson para $[\Delta R]$;

$$De = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m)$$

f - frequência de transmissão da linha (Hz);

ρ - resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

2.3 Comentários

Neste capítulo foi visto que o cálculo do campo elétrico no solo foi feito pelo método das imagens, pois a baixas frequências a linha se comportará como de corrente contínua e por isso o solo e condutores são considerados ideais. Com isso o cálculo do campo elétrico se torna função basicamente da geometria do sistema.

Ao contrário do campo elétrico que é definido basicamente pela matriz de coeficientes de potencial de Maxwell que é real e constante para uma dada geometria, o campo magnético depende da matriz de impedância por unidade de comprimento \mathbf{Z} . Esta matriz depende dos parâmetros do solo, que aqui foi suposto condutor $\sigma_{solo} \gg \omega\epsilon_{solo}$, e apresenta um comportamento variante na frequência.

Capítulo 3

Estudos de Caso

Serão apresentados neste capítulo resultados computacionais de diversos casos, mostrando os efeitos dos campos eletromagnéticos à frequência industrial nas linhas de transmissão. Para isso serão utilizados programas, feitos em Matlab, baseados na metodologia do capítulo 2. Os resultados apresentados são: o perfil do campo elétrico no solo, a densidade de fluxo magnético, os campos elétricos superficiais, as perdas por efeito corona e as induções eletromagnéticas.

Serão considerados quatro casos, a saber:

- Circuito simples de 500 kV, onde são apresentados resultados com os condutores na altura média e na altura mínima.
- Circuito duplo de 230 kV, onde é apresentada a influência do faseamento nos circuitos.
- Circuito delta de 500 kV com feixe expandido, onde são apresentados os problemas enfrentados pelo alto campo elétrico superficial e suas soluções.
- Circuito simples de 500 kV na presença de um oleoduto paralelo, onde são apresentados os efeitos dos campos elétricos na presença de um oleoduto paralelo a linha de transmissão.

Para analisar os valores dos campos, necessitamos de parâmetros para avaliá-los. Entre esses parâmetros adotados, está o campo elétrico no solo que por ter seus valores quantificados a distâncias medianas é dado em (kV/m). Já na análise do campo elétrico superficial será adotado o seu valor em (kV/cm), pois se trata de uma análise a pequenas distâncias. O campo magnético será tratado pela sua densidade de fluxo magnético em (mG), unidade esta muito utilizada neste contexto.

Com referência a análise do campo elétrico no solo, o mesmo será avaliado nos bordos da faixa de passagem da LT, que neste trabalho, é delimitada pelos campos eletromagnéticos. Os limites dos campos estabelecidos para avaliação estão apresentados no apêndice A.

Os cabos condutores utilizados nos estudos de caso foram escolhidos por serem os mais usuais para cada tipo de configuração. O cabo pára-raios considerado nos estudos foi o cabo Aço Galvanizado 3/8" EAR. As flechas dos cabos condutores e pára-raios foram calculadas a 20% e a 11,5% da carga de ruptura, respectivamente, considerando um vão médio de 500m. As características destes cabos encontram-se descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados característicos dos cabos.

CÓDIGO DO CABO	RAIL	GROSBEAK	AÇO 3/8 EAR
TIPO	CAA	CAA	AÇO
BITOLA (MCM)	954	636	
FORMAÇÃO	45/7	26/7	7
DIÂMETRO (mm)	29,59	25,16	9,14
PESO LINEAR (kgf/m)	1,600	1,302	0,407
CARGA DE RUPTURA (kgf)	11.764	11.427	6.990
FLECHA MÉDIA (m)	21,30	17,83	15,84
AMPACIDADE (A)	970	936	

A ampacidade apresentada na tabela 3.1 é a máxima corrente que poderá circular em um condutor sem que se exceda seu limite térmico. Sendo assim, a capacidade de corrente do condutor em condições normais é bem inferior a esta.

Para o calculo da corrente máxima por fase consideramos a ampacidade de cada cabo condutor, sendo assim, a corrente máxima por fase será calculada pela seguinte expressão:

$$I_{m\acute{a}x} = n \cdot A \quad (3.1)$$

onde: n – número de subcondutores por fase;

A – ampacidade do cabo condutor;

Cumprе ressaltar que a corrente máxima calculada considerando o seu limite térmico é, salvo raras exceções, muito maior que a corrente de curto-circuito que pode passar no circuito.

Nestes estudos o cabo pára-raios será considerado aterrado em todas as estruturas, sendo assim, o seu potencial será o mesmo do solo. Caso o cabo pára-raios não tivesse sido considerado aterrado, haveria elevação de potencial no mesmo, tendo que ter um tratamento diferente.

O campo elétrico superficial máximo admitido nos condutores será limitado a 98% do campo elétrico crítico de corona, fato este que será explicado na seção 3.1.2.

Considerando-se os cuidados de lançamento e grampeamento dos cabos condutores em linhas de transmissão, é usual utilizar nos projetos atuais um valor de fator de superfície da ordem de 0,85.

O valor médio da densidade relativa do ar utilizado no estudo será adotado de acordo com valores típicos. Este valor é de 0,92.

A resistividade média do solo considerada para o estudo é de 1000 Ω .m.

Para a análise das induções eletromagnéticas será considerado um fio condutor representando uma cerca de 1 km de comprimento paralelo a LT, situado a 1 m do solo.

3.1 Circuito Simples de 500 kV

Circuito simples de 500 kV composto por um feixe de três cabos CAA Rail, com um espaçamento entre subcondutores de 0,457 m. Configuração esta bem usual para poder apresentar os efeitos dos campos eletromagnéticos.

Supondo que a catenária seja aproximada por uma parábola e o terreno seja plano e as estruturas da LT sejam de mesma altura, os resultados apresentados inicialmente são para a altura média do condutor que é a 2/3 da flecha média, posição esta mais próxima da real altura que a LT se comportará. Mas a altura onde os efeitos eletromagnéticos são mais perceptíveis é a meio do vão, posição mais baixa que o cabo condutor pode se apresentar respeitando a

distância mínima do condutor ao solo. Os resultados nesta altura mínima serão apresentados após os resultados na altura média.

As disposições geométricas dos cabos na altura média e na altura mínima serão apresentadas nas figuras 3.1 e 3.2.

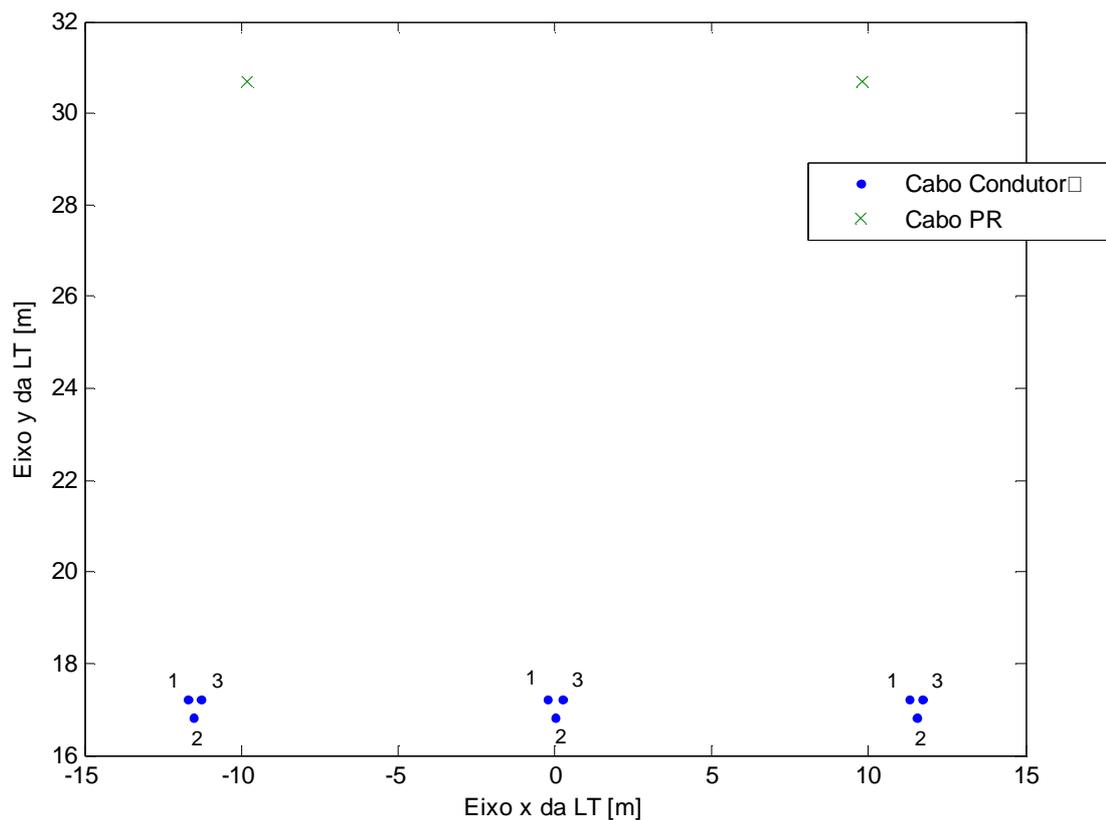


Figura 3.1 – Disposição dos cabos na altura média.

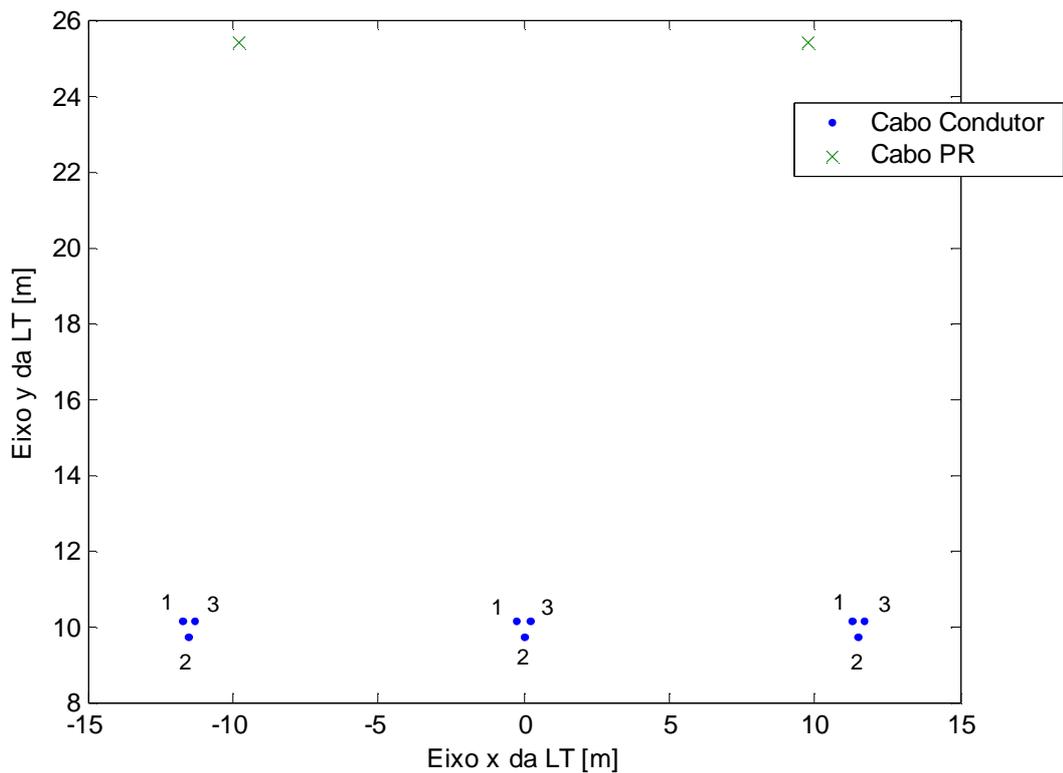


Figura 3.2 – Disposição dos cabos na altura mínima.

O estudo de campo elétrico deverá ser verificado para a tensão máxima de operação normal da LT, que é de 550 kV. Para o estudo de campo magnético, a corrente máxima de transmissão por fase é de 2,91 kA.

3.1.1 Campo Elétrico na Altura Média

O campo elétrico crítico de corona para esta configuração, calculado pela fórmula de Peek é de 29,49 (kV/cm). As perdas por corona em tempo chuvoso para esta configuração é de 41,67 kW/km.

Os campos elétricos máximos superficiais nos condutores não poderão passar do valor do campo elétrico crítico de corona, pois a partir deste valor começa a ocorrer a ionização do ar nos entornos dos condutores.

Tabela 3.2 – Campo elétrico superficial na altura média.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
Nº. CONDUTORES	FASE ESQUERDA	FASE CENTRAL	FASE DIREITA
1	24,42	26,63	24,99
2	24,73	26,62	24,73
3	24,99	26,63	24,42

Como observado na tabela 3.2 o campo elétrico superficial atende aos limites de 98 % do campo elétrico crítico de corona, sendo assim, esta configuração não apresenta problemas graves quanto ao efeito corona.

O perfil do campo elétrico no solo para os condutores na altura média é mostrado na figura 3.3. Como se pode observar os valores do campo elétrico nos bordos da faixa a 20 m do eixo da LT estão abaixo do recomendado pela OMS – Organização Mundial da Saúde – apresentados no apêndice A.

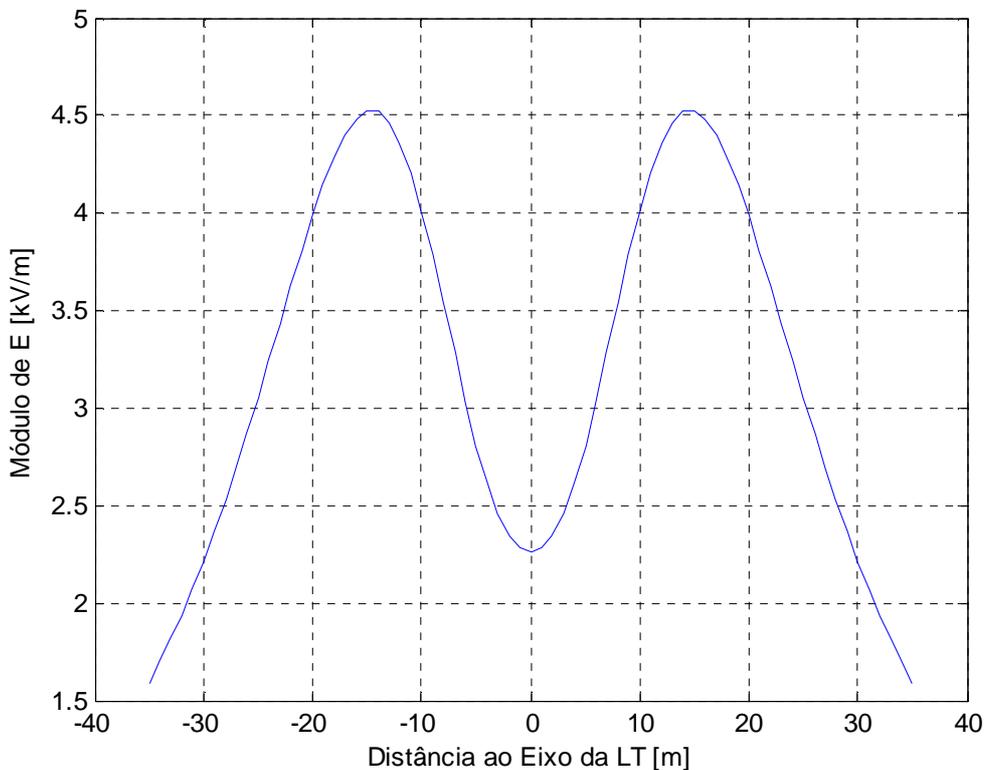


Figura 3.3 – Perfil do campo elétrico no solo para uma altura média dos condutores.

3.1.2 Campo Elétrico na Altura Mínima

Os campos elétricos máximos superficiais nos condutores apresentados na tabela 3.3 são ligeiramente maiores que os apresentados na tabela 3.2. Fato este que demonstra que o campo elétrico superficial é maior na altura mínima, sendo assim, quando se analisar o campo elétrico superficial para uma altura média deve-se adotar uma folga nos valores em relação ao campo elétrico crítico de corona, folga esta adotada de 2 % do campo elétrico crítico de corona.

Tabela 3.3 – Campo elétrico superficial na altura mínima.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
Nº. CONDUTORES	FASE ESQUERDA	FASE CENTRAL	FASE DIREITA
1	25,25	26,92	25,70
2	25,64	27,00	25,64
3	25,70	26,92	25,25

O perfil do campo elétrico no solo para a altura mínima do condutor ao solo é apresentado na figura 3.4. Este perfil é consideravelmente mais alto do que o da figura 3.3, pois como o campo elétrico é dependente da geometria da LT, diminuindo-se a altura dos condutores o campo aumentará significativamente.

Cumpramos observar que a visualização de um pico de campo elétrico no centro é devido ao fato que quanto mais próximo do solo se encontrar os cabos, menores serão as contribuições dos condutores das outras fases, pois a distância horizontal fica cada vez maior em relação a distância vertical. Sendo assim, os picos do campo elétrico ficam situados nas posições dos condutores de fase.

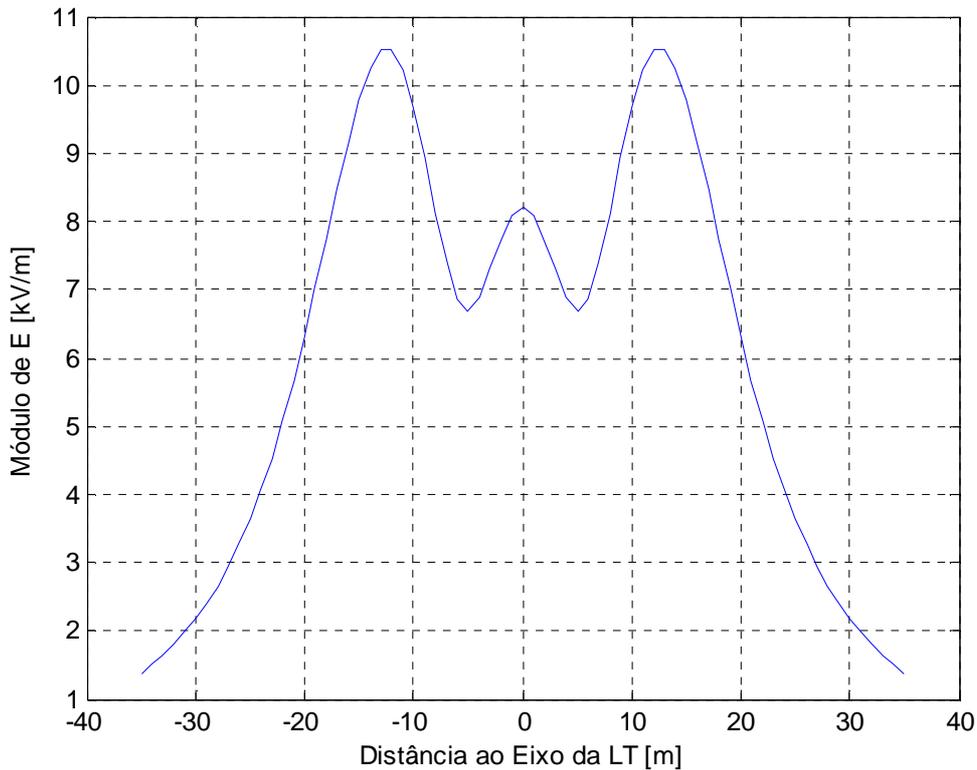


Figura 3.4 – Perfil do campo elétrico no solo para uma altura mínima do condutor.

3.1.3 Campo Magnético na Altura Média

O perfil da densidade de fluxo magnético a 1 m do solo para a altura média é mostrado na figura 3.5. Nota-se que apresenta valores bem menores do recomendado pela OMS, não apresentando perigo.

Uma tensão longitudinal ao longo do condutor, representado por uma cerca, induzida pelo campo eletromagnético a 30 m do eixo da LT seria de 261 V. Tensão esta que poderia trazer perigo a pessoas e animais, sendo assim, recomenda-se seccionar e aterrar cercas que estiverem ao longo da LT, para assim diminuir o nível da tensão longitudinal induzida, que é proporcional ao comprimento do mesmo.

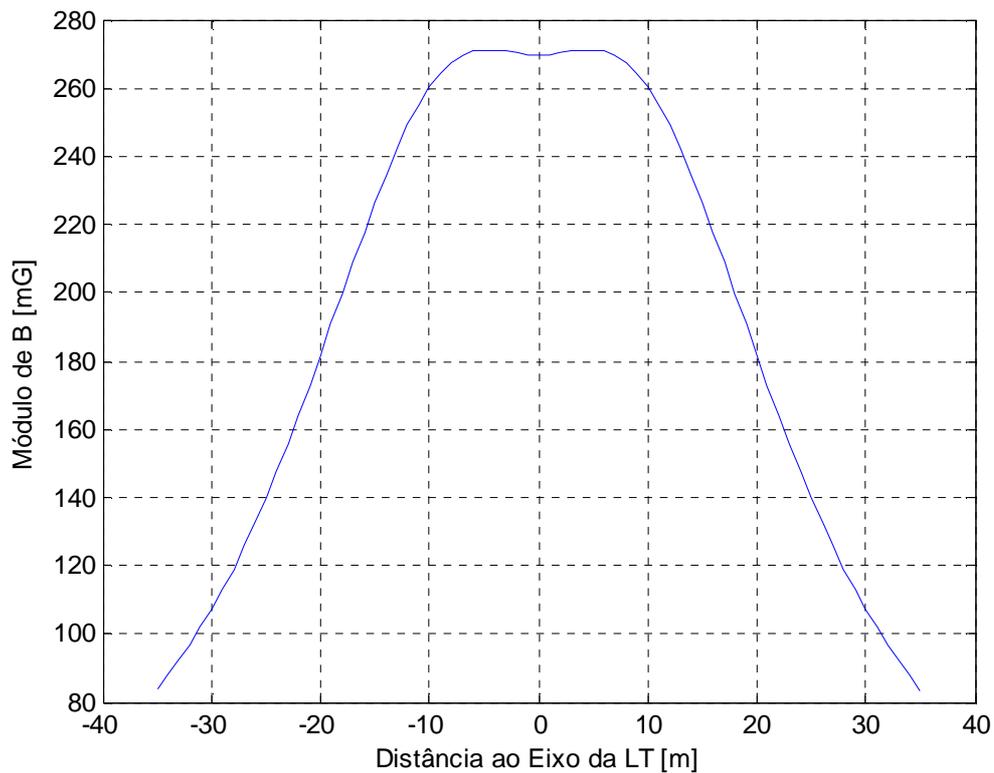


Figura 3.5 – Perfil da densidade de fluxo magnético para uma altura média do condutor.

3.1.4 Campo Magnético na Altura Mínima

O perfil da densidade de fluxo magnético a 1 m do solo para a altura mínima é mostrado na figura 3.6. O perfil se apresenta com valores bem maiores que o perfil na altura média, assim como o ocorrido com o campo elétrico, mas mesmo assim situa-se abaixo do recomendado.

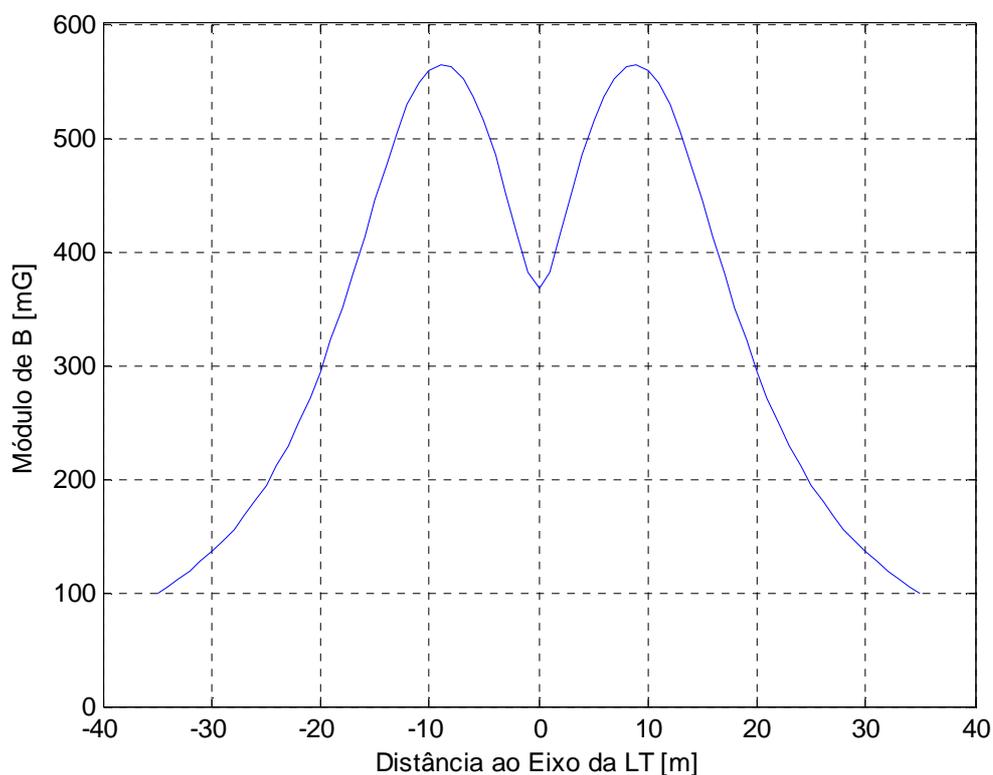


Figura 3.6 – Perfil da densidade de fluxo magnético para uma altura mínima do condutor.

3.2 Circuito Duplo de 230 kV

Circuito duplo de 230 kV composto por um feixe de dois cabos CAA Grosbeak, com um espaçamento entre subcondutores de 0,457 m. Configuração esta adotada por ser mais usual do que um circuito duplo com um único subcondutor, pois se consegue transmitir mais potência usando a mesma faixa de passagem. Sendo assim iremos apresentar resultados dos efeitos do faseamento dos circuitos nos campos eletromagnéticos.

A disposição geométrica dos cabos na altura mínima é apresentada na figura 3.7.

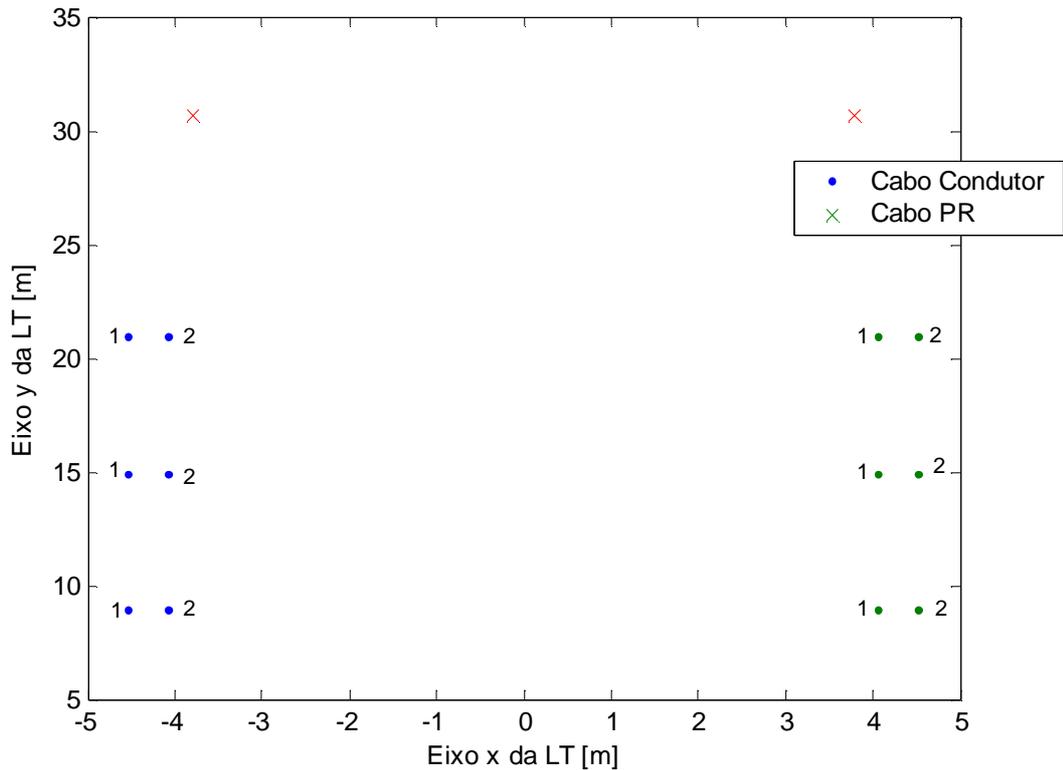


Figura 3.7 – Disposição dos cabos num circuito duplo de 230 kV na altura mínima.

O estudo de campo elétrico foi verificado para a tensão máxima de operação normal da LT, que é de 242 kV. Para o estudo de campo magnético, a corrente máxima de transmissão por fase é de 1,872 kA.

Primeiramente iremos mostrar os campos eletromagnéticos num faseamento coincidente com os dois circuitos com seqüência **a-b-c** partindo dos condutores inferiores para os superiores. Após isto, apresentaremos os campos eletromagnéticos num faseamento contrário, um circuito com seqüência de fases **a-b-c** partindo dos condutores inferiores para os superiores e outro com seqüência de fases **c-b-a**.

3.2.1 Campo Elétrico

O campo elétrico crítico de corona calculado para esta configuração pela formula de Peek é de 30,00 (kV/cm). As perdas por corona em tempo chuvoso para a configuração com

faseamento coincidente são de 6,81 kW/km e para a configuração com faseamento contrário são de 6,16 kW/km.

Os campos elétricos máximos superficiais nos condutores para circuitos com faseamentos coincidente e contrário são apresentados nas tabelas 3.4 e 3.5, respectivamente.

Tabela 3.4 – Campo elétrico superficial para os circuitos com faseamento coincidente.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
CIRCUITO 1			
Nº. CONDUTORES	FASE INFERIOR	FASE CENTRAL	FASE SUPERIOR
1	17,99	19,09	16,79
2	17,77	18,94	16,60
CIRCUITO 2			
Nº. CONDUTORES	FASE INFERIOR	FASE CENTRAL	FASE SUPERIOR
1	17,77	18,94	16,60
2	17,99	19,09	16,79

Tabela 3.5 – Campo elétrico superficial para os circuitos com faseamento contrário.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
CIRCUITO 1			
Nº. CONDUTORES	FASE INFERIOR	FASE CENTRAL	FASE SUPERIOR
1	18,65	19,86	16,65
2	18,71	19,96	16,44
CIRCUITO 2			
Nº. CONDUTORES	FASE INFERIOR	FASE CENTRAL	FASE SUPERIOR
1	18,71	19,96	16,44
2	18,65	19,86	16,65

Pode-se observar que os valores são baixos, pois se trata de um circuito de 230 kV. Nota-se também a simetria que ocorre nos campos elétricos superficiais e que há um aumento nos condutores centrais e inferiores quando configurados com seqüências de fases contrárias.

O perfil do campo elétrico no solo para circuitos com faseamento coincidente é mostrado na figura 3.8. Como se nota, o campo elétrico soma-se no centro ocasionando um pico. Isto ocorre devido às fases serem coincidentes e sendo assim as contribuições de ambos os lados soma-se no centro.

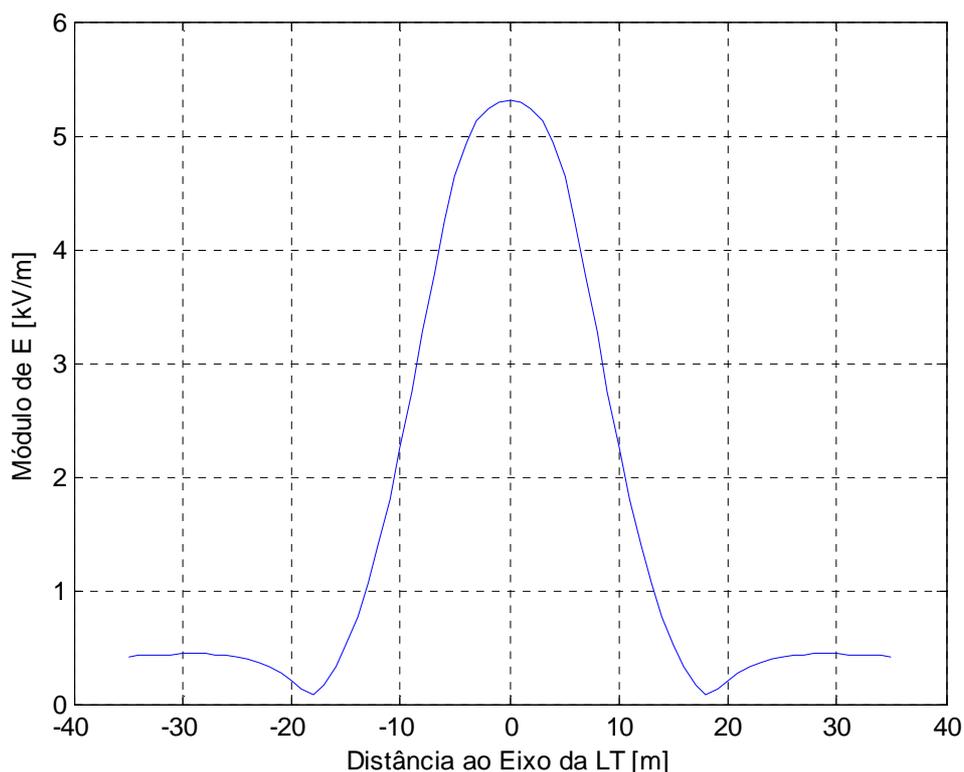


Figura 3.8 – Perfil do campo elétrico no solo para os circuitos com faseamento coincidentes.

O perfil do campo elétrico no solo para circuitos com faseamento contrário é mostrado na figura 3.9. Como se nota, o campo elétrico apresenta uma redução no centro, sendo assim, um faseamento contrário é bem útil numa LT de circuito duplo.

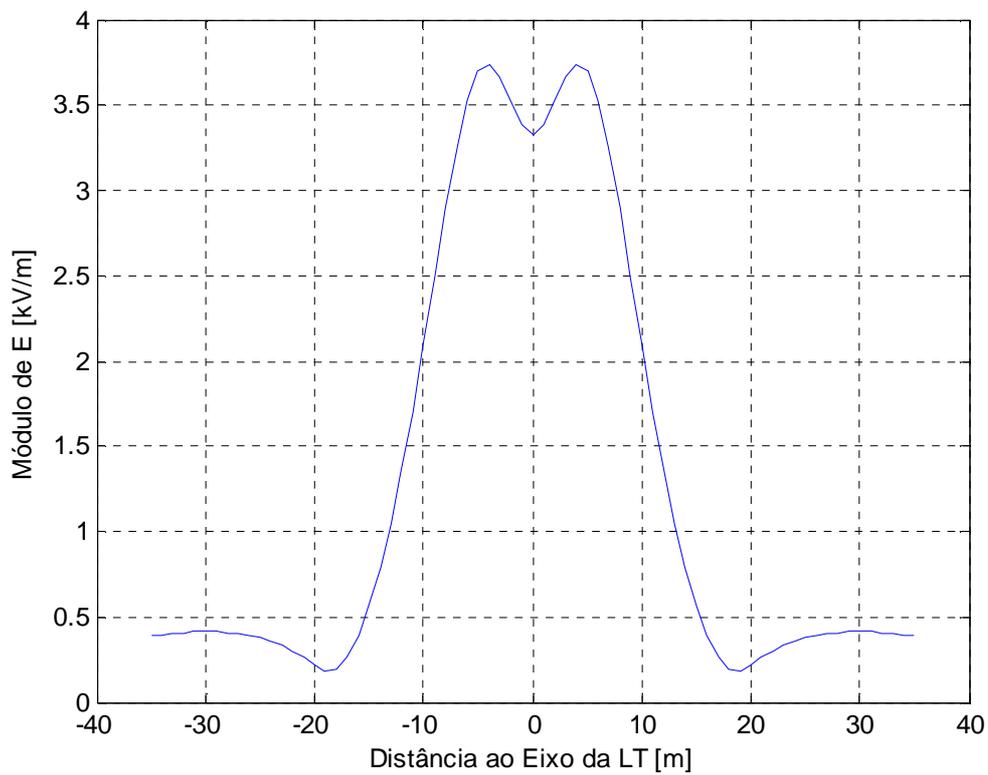


Figura 3.9 – Perfil do campo elétrico no solo para os circuitos com faseamento contrário.

Na figura 3.10 é mostrada uma superposição dos campos elétricos no solo dos dois tipos de faseamento dos circuitos apresentados, afirmando assim, a influência do faseamento nos campos elétricos no solo.

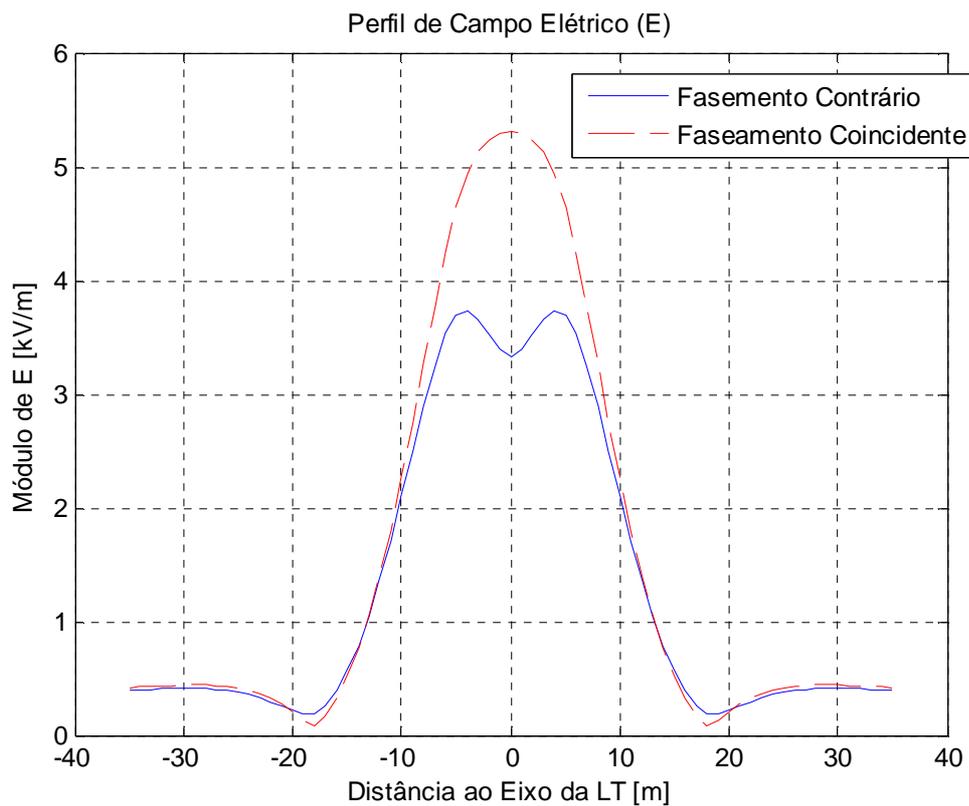


Figura 3.10 – Superposição dos perfis dos campos elétricos no solo.

3.2.2 Campo Magnético

Assim como no campo elétrico, primeiramente é calculado o campo magnético para um faseamento coincidente e depois para um faseamento contrário.

Os perfis da densidade de fluxo magnético a 1 m do solo para as seqüências de fases coincidentes e contrárias são mostrados nas figuras 3.11 e 3.12, respectivamente.

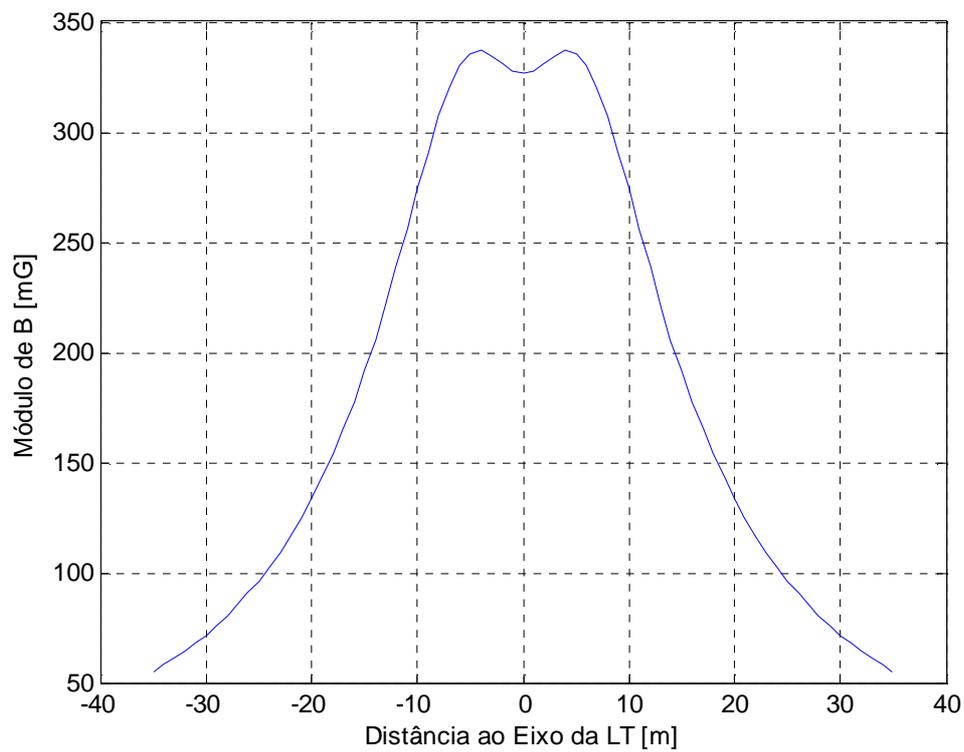


Figura 3.11 – Perfil da densidade de fluxo magnético para os circuitos com faseamento coincidentes.

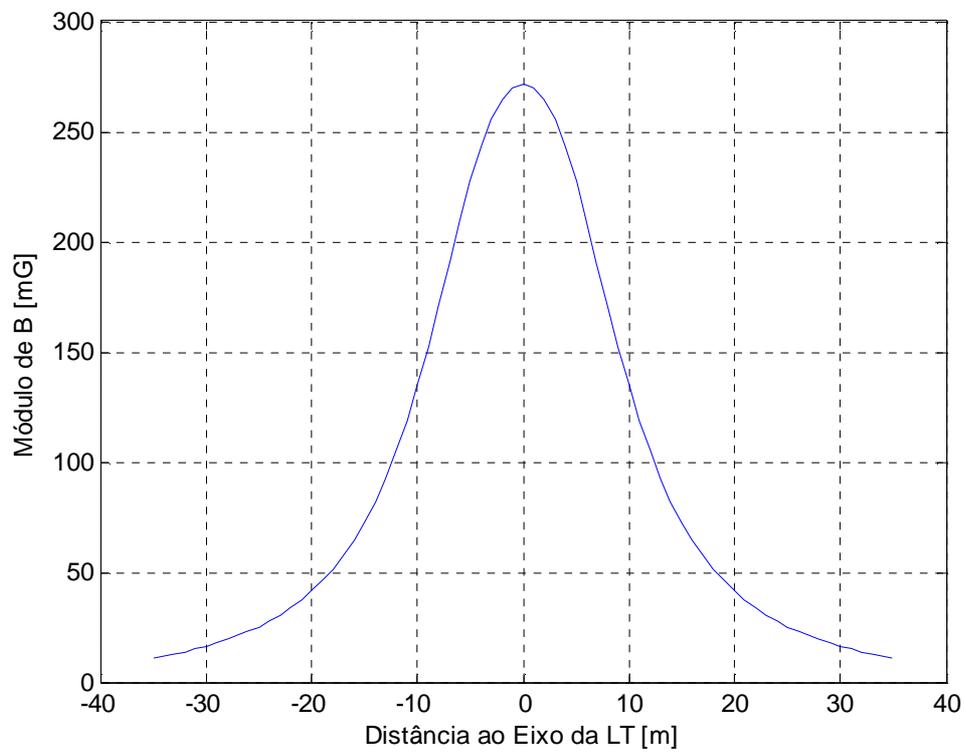


Figura 3.12 – Perfil da densidade de fluxo magnético para os circuitos com faseamento contrário.

Pode-se observar que há uma redução significativa do campo magnético nos circuitos com faseamento contrário. Com isso, nota-se o favorecimento da escolha da seqüência de fases contrária nos circuitos, para assim diminuir consideravelmente os valores dos campos eletromagnéticos dentro da faixa da LT, que se considerado somente os campos eletromagnéticos, a faixa poderá ser de 20 m.

Na figura 3.13 é mostrada uma superposição dos perfis da densidade de fluxo magnético para os dois tipos de faseamento, dando assim uma visão mais profunda do efeito.

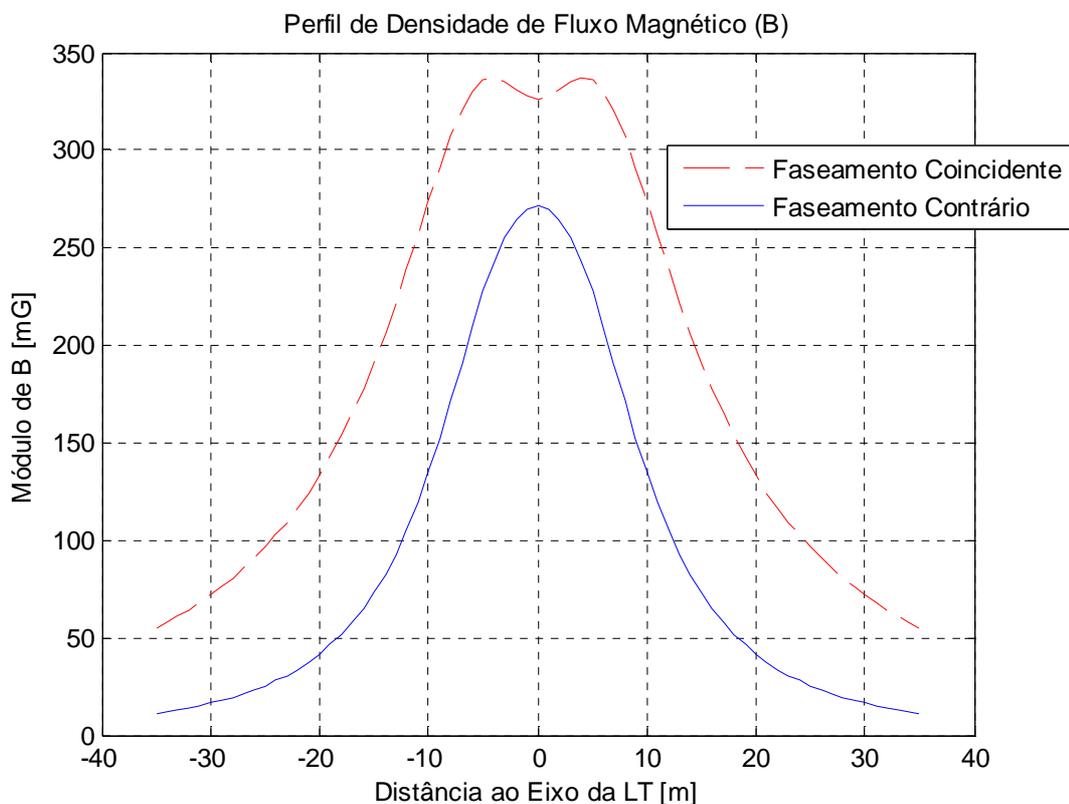


Figura 3.13 – Superposição dos perfis de densidade de fluxo magnético.

3.3 Circuito Delta de 500 kV Com Feixe Expandido

Circuito em delta com feixes circulares simétricos de 500 kV compostos por um feixe de cinco cabos CAA Grosbeak ou CAA Rail. Configurações estas adotadas para mostrar os

efeitos dos campos eletromagnéticos em circuitos com feixes expandidos e a influência do tipo de cabo condutor.

Nestes resultados mostraremos os problemas encontrados por uma má escolha dos cabos condutores e a influência que isso acarreta nos campos eletromagnéticos, principalmente o campo elétrico superficial.

A disposição geométrica dos cabos na altura mínima é apresentada na figura 3.14.

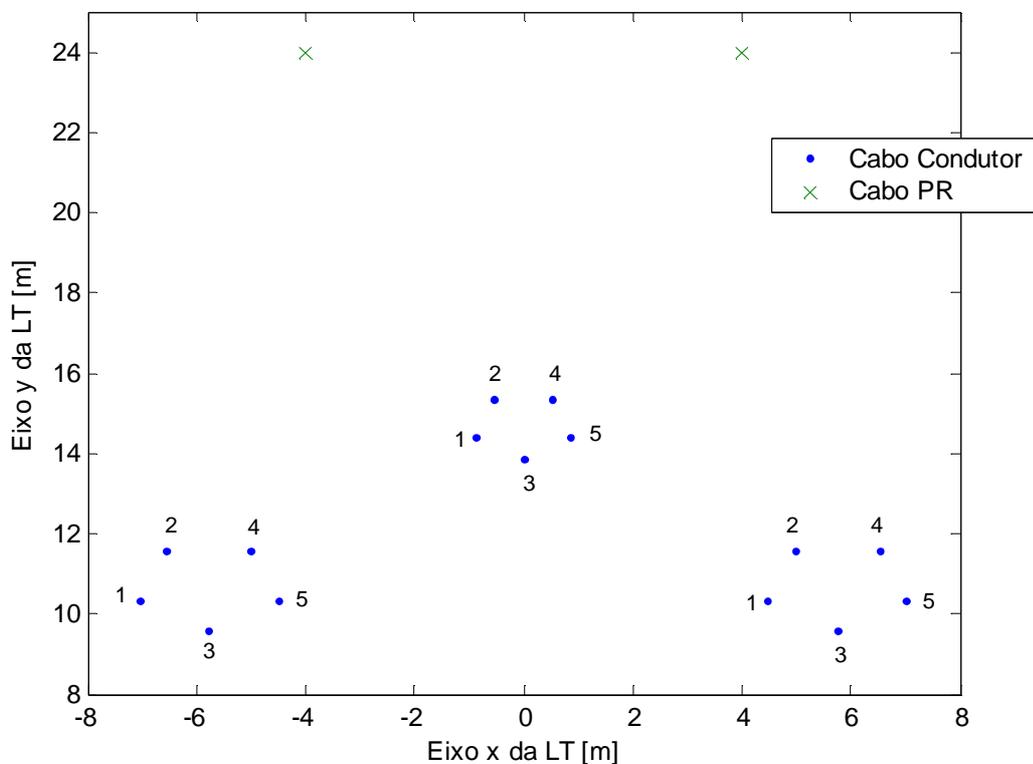


Figura 3.14 – Disposição dos cabos num circuito com feixe delta de 500 kV na altura mínima.

O estudo de campo elétrico deverá ser verificado para a tensão máxima de operação normal da LT, que é de 550 kV. Para o estudo de campo magnético, as correntes máximas de transmissão por fase serão de 4,68 kA para o cabo Grosbeak e 4,85 kA para o cabo Rail, sendo a corrente do cabo Rail maior devido maior capacidade de corrente do mesmo.

3.3.1 Campo Elétrico

O campo elétrico crítico de corona para a configuração com cabo Grosbeak é de 30,00 kV/cm e para a configuração com cabo Rail de 29,49 kV/cm. As perdas por corona em tempo chuvoso para as configurações com cabo Grosbeak e Rail são de 129,49 kW/km e 90,23 kW/km, respectivamente.

Os campos elétricos máximos superficiais nos condutores para o cabo Grosbeak são apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Campo elétrico superficial para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Grosbeak.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
Nº. CONDUTORES	FASE ESQUERDA	FASE CENTRAL	FASE DIREITA
1	27,69	32,39	33,02
2	28,78	29,22	32,94
3	28,45	32,45	28,45
4	32,94	29,22	28,78
5	33,02	32,39	27,68

Como pode ser observado, o valor dos campos elétricos superficiais nos condutores apresentam em alguns subcondutores valores maiores do que o campo elétrico crítico de corona. Sendo assim ocorrerá ionização do ar no entorno dos condutores acarretando no chamado efeito corona. Para que isso não ocorra, medidas deverão ser tomadas, entre elas:

1. Aumento da distância entre fases e das alturas dos condutores.
2. Aumento do diâmetro do condutor.
3. Aumento do número de condutores no feixe.

No nosso caso foi aumentado o diâmetro do cabo condutor, sendo por isso escolhido o cabo Rail que é de maior bitola que o cabo Grosbeak. Os campos elétricos máximos superficiais nos condutores para a configuração com cabo Rail são apresentados na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Campo elétrico superficial para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Rail.

CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL NOS CONDUTORES (kV/cm)			
Nº. CONDUTORES	FASE ESQUERDA	FASE CENTRAL	FASE DIREITA
1	23,99	28,21	28,76
2	24,96	25,35	28,69
3	24,66	28,25	24,66
4	28,69	25,35	24,96
5	28,76	28,21	23,99

Como se pode observar os valores dos campos elétricos diminuíram e estão menores do que os 98% do campo elétrico crítico de corona. Sendo assim mostrou-se valido a troca dos condutores para solucionar tal problema.

Os perfis dos campos elétricos no solo para as configurações com cabo Grosbeak e Rail são mostrados nas figuras 3.15 e 3.16.

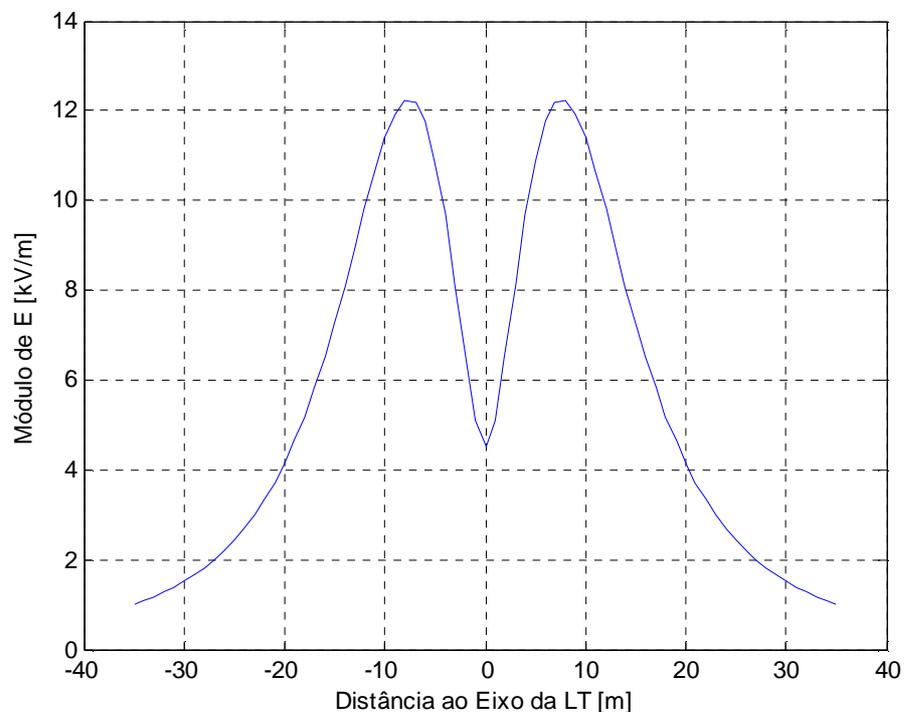


Figura 3.15 – Perfil do campo elétrico no solo para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Grosbeak.

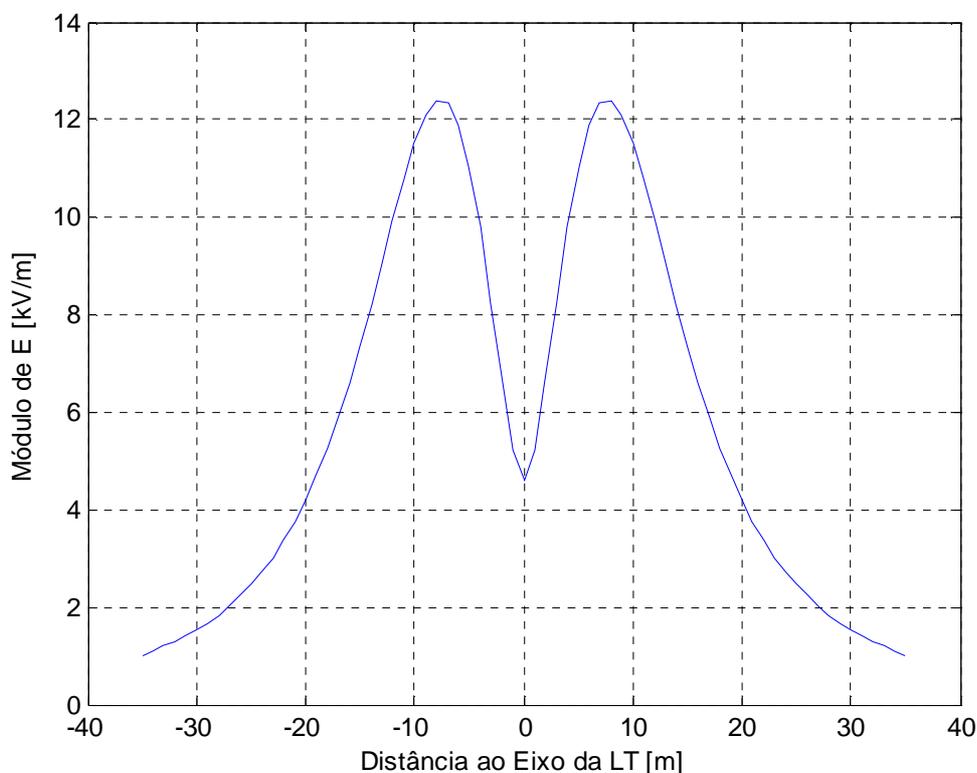


Figura 3.16 – Perfil do campo elétrico no solo para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Rail.

Como pode se notar, o campo elétrico é alto dentro da faixa da LT, que é de 40 m, mas não pode deixar de lembrar que se trata do campo elétrico na altura mínima. Também se nota que o perfil do campo elétrico no solo quase não sofreu alteração, pois no solo a influência do cabo condutor é pequena, o que mais influência é a geometria da LT.

3.3.2 Campo Magnético

Os perfis da densidade de fluxo magnético a 1 m do solo para as configurações com cabo Grosbeak e Rail são mostrados nas figuras 3.17 e 3.18, respectivamente.

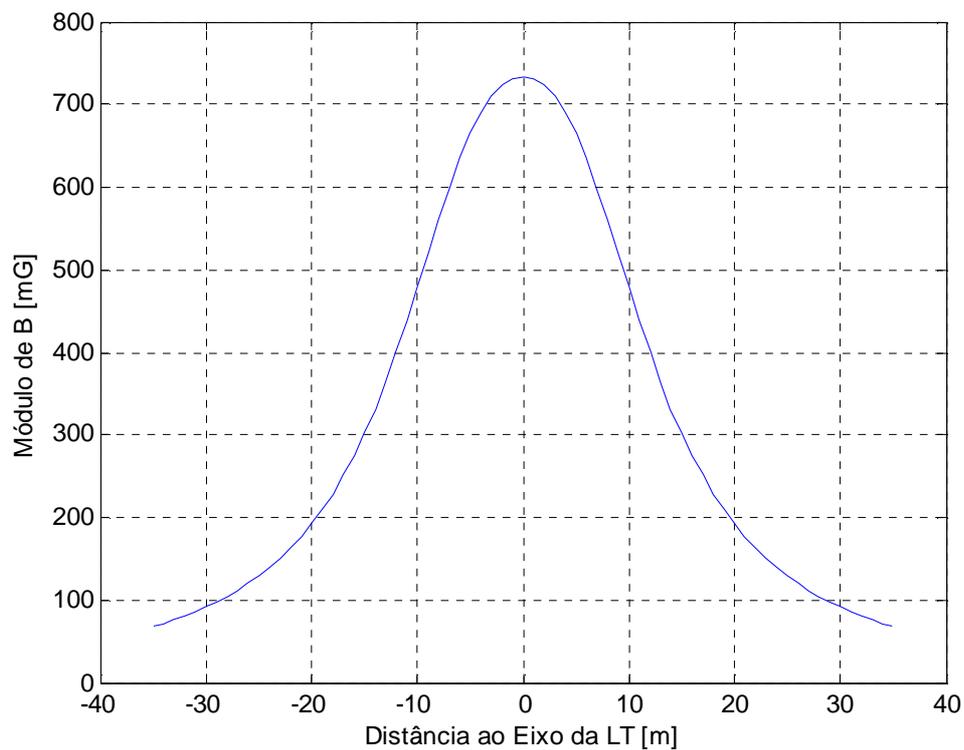


Figura 3.17 – Perfil da densidade de fluxo magnético para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Grosbeak.

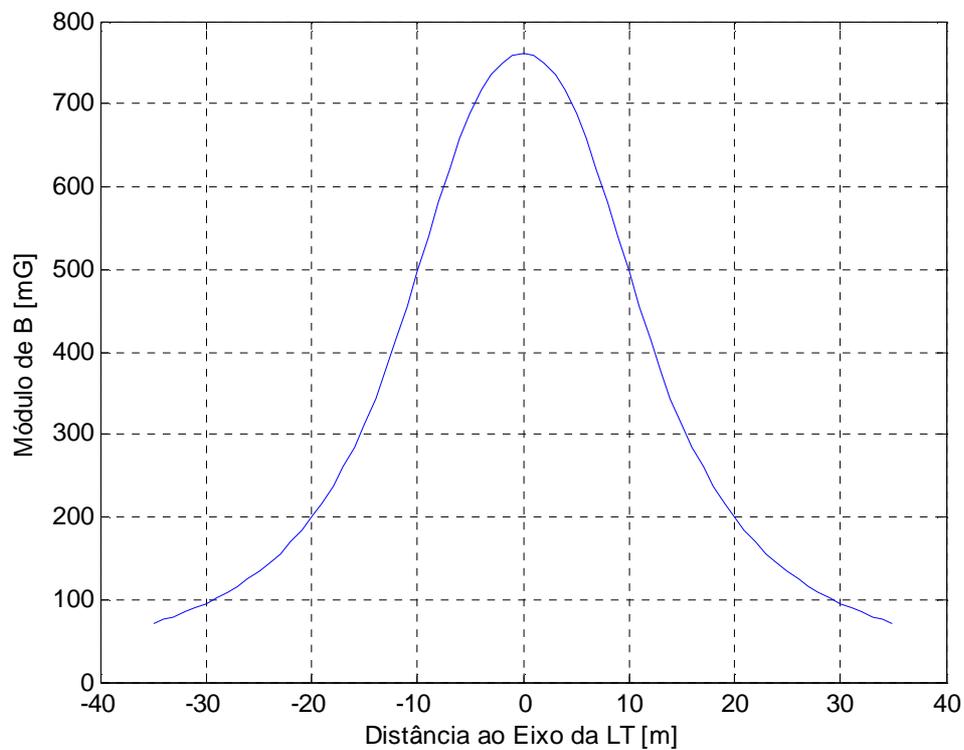


Figura 3.18 – Perfil da densidade de fluxo magnético para um circuito com feixe delta de 500 kV com cabo Rail.

Houve como esperado um ligeiro aumento do campo magnético, devido exclusivamente ao fato do cabo condutor Rail possuir maior capacidade de corrente que o cabo Grosbeak. Pode-se notar também um alto valor da densidade de fluxo magnético, mas também não se esquecendo que se trata da altura mínima.

3.4 Campos Elétricos na Presença de Oleoduto

Os campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão podem trazer sérios problemas a pessoas, animais e plantas que estiverem nas suas proximidades. Outro efeito que deve se levar em consideração é a indução eletromagnética, que podem ocorrer em qualquer condutor que estiver nas proximidades de uma LT. Aqui será analisado o efeito dos campos elétricos onde oleodutos estão paralelos à LT. Caso este pouco comum no Brasil, mas em outros países como o Kuwait mais facilmente encontrado.

Para este estudo será considerado um oleoduto paralelo a uma linha de transmissão de circuito simples de 500 kV com o cabo na altura média, onde sua configuração foi apresentada na seção 3.1. O oleoduto considerado no estudo será um condutor com diâmetro e altura em relação ao solo variando de acordo com o efeito analisado e paralelo a LT em toda a sua extensão. Este estudo foi baseado no artigo do Ismail [8].

Primeiramente será analisada a influência do diâmetro do oleoduto nos campos eletromagnéticos e depois a influência da posição do oleoduto.

3.4.1 Efeito do Diâmetro do Oleoduto

Primeiramente será mostrada a influência do campo elétrico no solo de um oleoduto paralelo à linha de transmissão conforme mostrado na figura 3.19. O oleoduto adotado para o este caso está a 20 m do eixo da LT, a uma altura de 0,5 m do solo e têm 0,5 m de diâmetro. Após este, será analisado o efeito do campo elétrico com um oleoduto de 1 m de diâmetro na mesma posição.

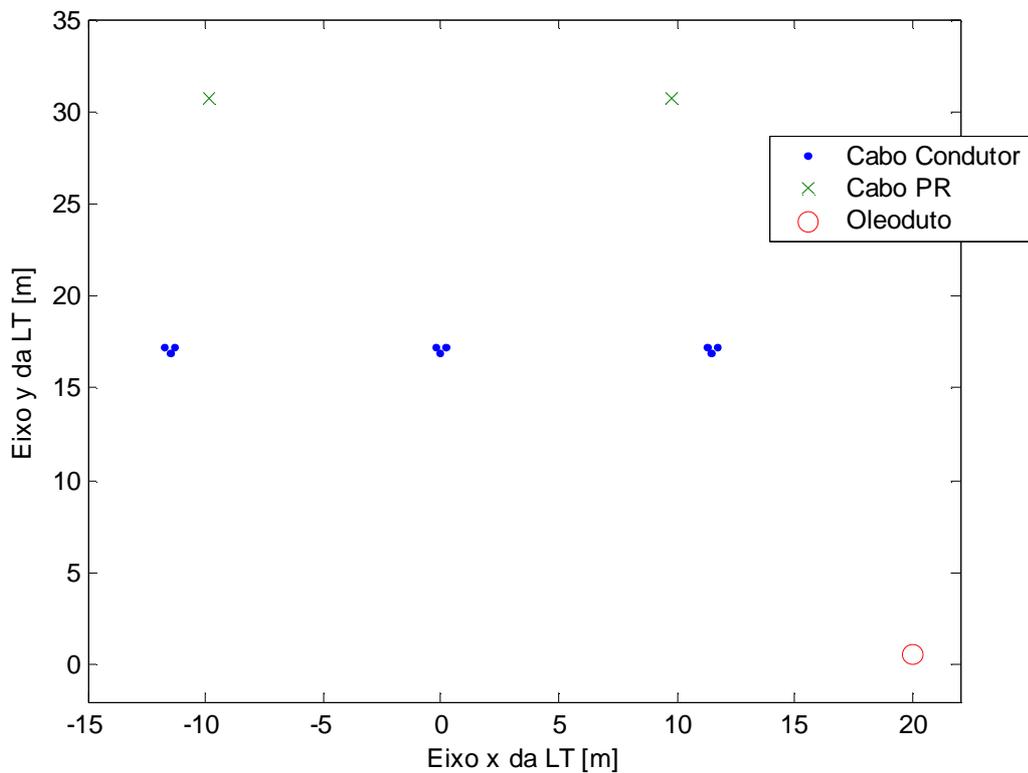


Figura 3.19 – Configuração da LT com o oleoduto.

O perfil do campo elétrico no solo na presença de um oleoduto de 0,5 m de diâmetro paralelo à LT é mostrado na figura 3.20.

Como se pode observar na figura 3.20, o perfil do campo elétrico no solo fica alterado do perfil original da figura 3.3. Agora tem um ponto de campo mínimo na posição onde se encontra o oleoduto. Este fato ocorre devido ao oleoduto desse diâmetro apresentar pouquíssima carga induzida nele, sendo assim um potencial mínimo, além de estar situado numa posição favorável, por isso, o campo elétrico é baixo onde ele fica localizado.

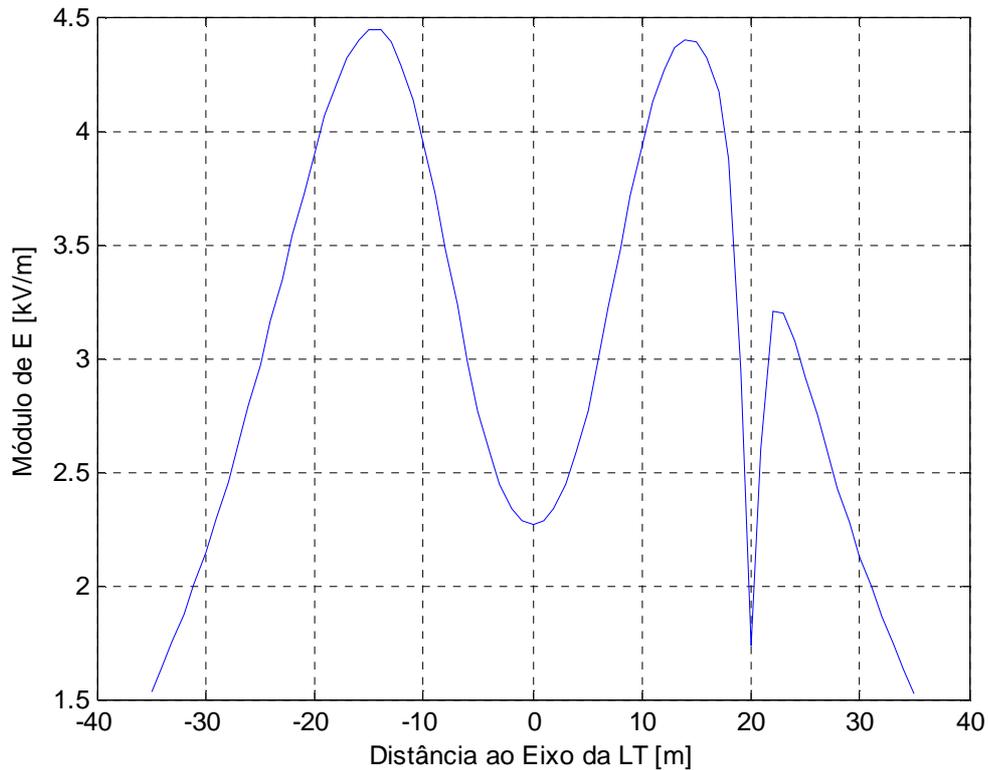


Figura 3.20 – Perfil do campo elétrico no solo com o oleoduto de 0,5 m de diâmetro.

A tensão induzida no oleoduto de diâmetro de 0,5 m pelo campo elétrico é de 1,951 kV e a corrente induzida é de 0,782 mA. Valores estes que podem acarretar acidentes às pessoas e animais que toquem o oleoduto, tendo assim, a necessidade de um isolamento do oleoduto.

Na figura 3.21 é apresentado o perfil do campo elétrico no solo na presença de um oleoduto agora de 1 m de diâmetro. Como se pode notar, ao invés de um ponto de baixo campo elétrico agora se tem um ponto de alto campo elétrico. Campo este muito superior ao encontrado no caso anterior, pois a área do oleoduto aumentou, com isso, a carga induzida nele induzida nele também aumentou consideravelmente, sendo assim, o seu potencial foi bruscamente aumentado e conseqüentemente o campo elétrico onde ele se situa.

A corrente induzida agora com o oleoduto de 1 m de diâmetro é de 1,6 mA, corrente esta bem maior que a encontrada anteriormente.

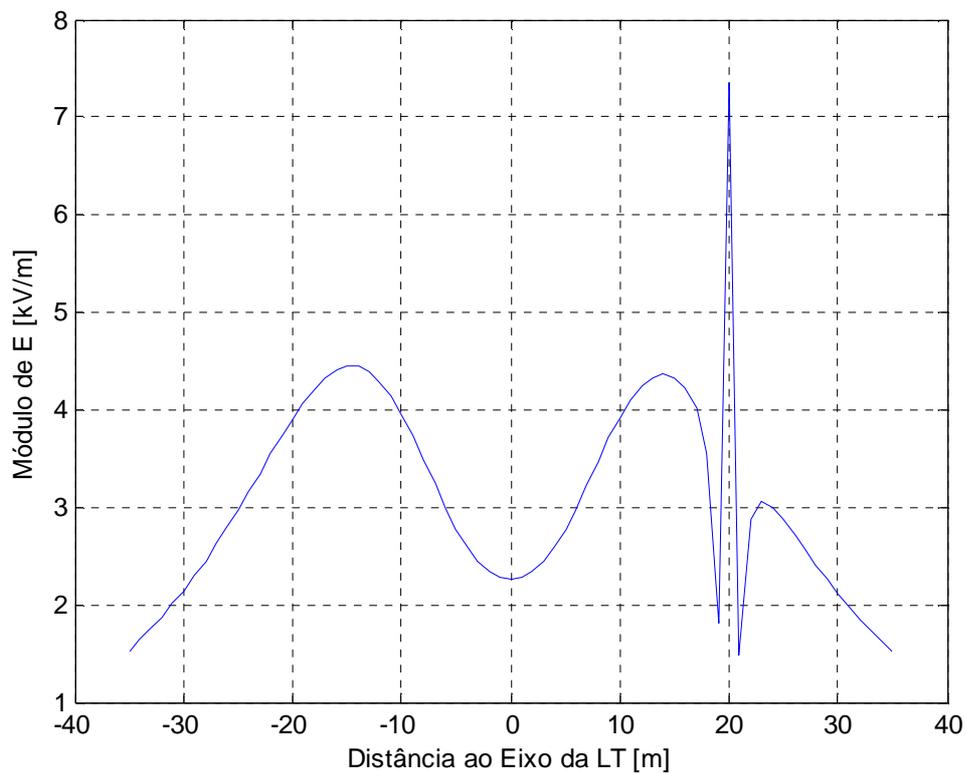


Figura 3.21 – Perfil do campo elétrico no solo com o oleoduto de 1 m de diâmetro.

3.4.2 Efeito da Posição do Oleoduto

Agora será analisada a influência da posição do oleoduto no campo elétrico no solo. Sendo adotado inicialmente um oleoduto a uma distância de 15 m do eixo da LT, a uma altura em relação ao solo de 0,7 m e de diâmetro de 0,7 m. Para depois reduzirmos a sua altura para 0,5 m mantendo o mesmo diâmetro. Sua configuração é apresentada na figura 3.22.

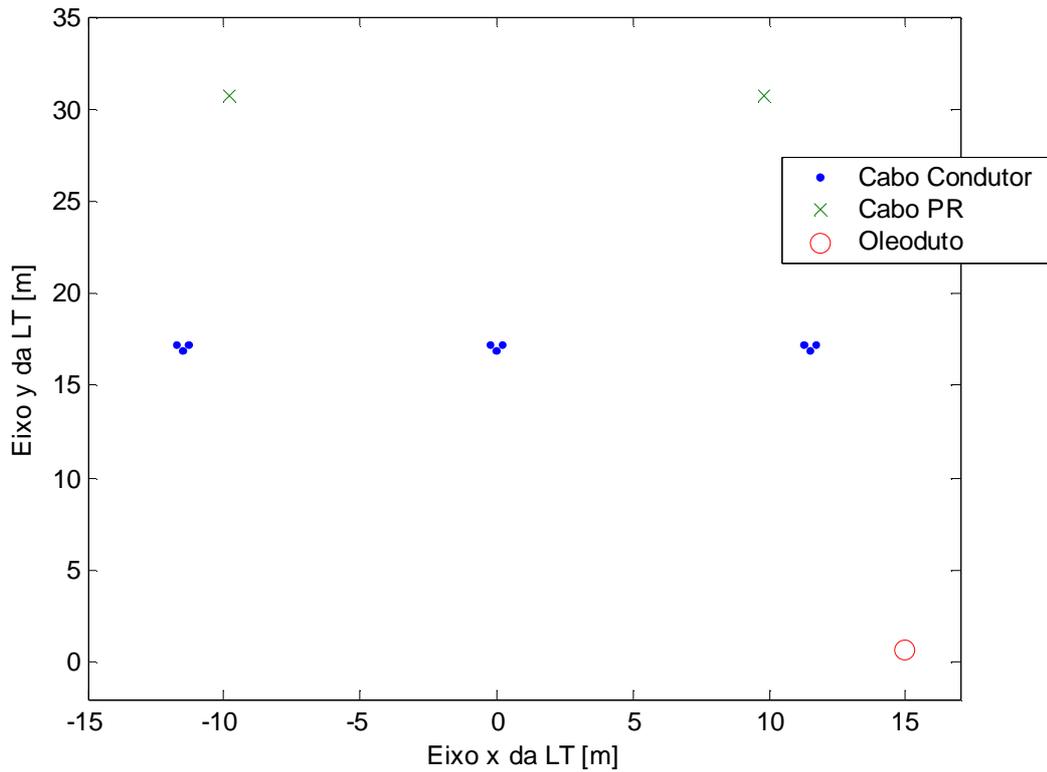


Figura 3.22 – Configuração da LT com o oleoduto.

A tensão induzida no oleoduto na altura de 0,7 m pelo campo elétrico é de 3,113 kV e a corrente induzida é de 1,3 mA. Valores estes relativamente maiores do que os encontrados anteriormente, devido ao fato do oleoduto estar mais próximo da linha de transmissão.

O perfil do campo elétrico no solo na presença de um oleoduto a uma altura de 0,7 m em relação ao solo é apresentado na figura 3.23.

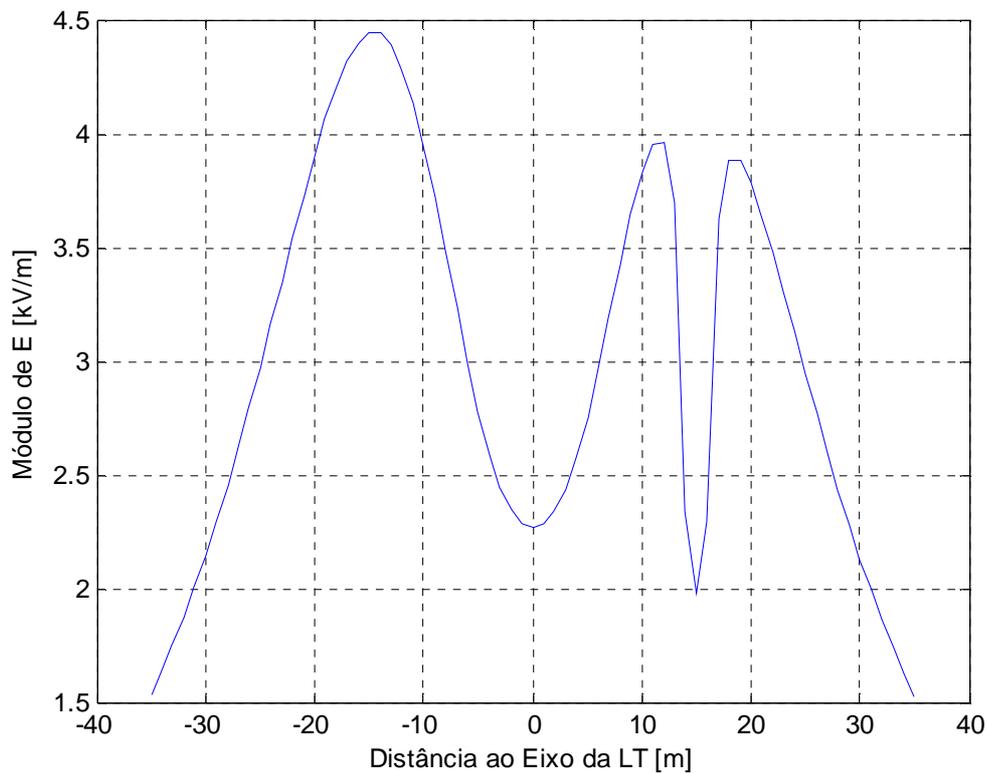


Figura 3.23 – Perfil do campo elétrico no solo com o oleoduto a 0,7 m do solo.

Pode-se observar que ocorreu o mesmo efeito da figura 3.20, só mudando a posição de ocorrência para onde o oleoduto se encontra.

O perfil do campo elétrico no solo para o oleoduto na altura de 0,5 m é mostrado na figura 3.24. Como se nota também ocorreu o mesmo efeito mostrado na figura 3.20 com menos intensidade devido ao diâmetro do condutor ser menor, efeito este que ocorre devido ao campo elétrico ser enormemente afetado pela altura dos condutores.

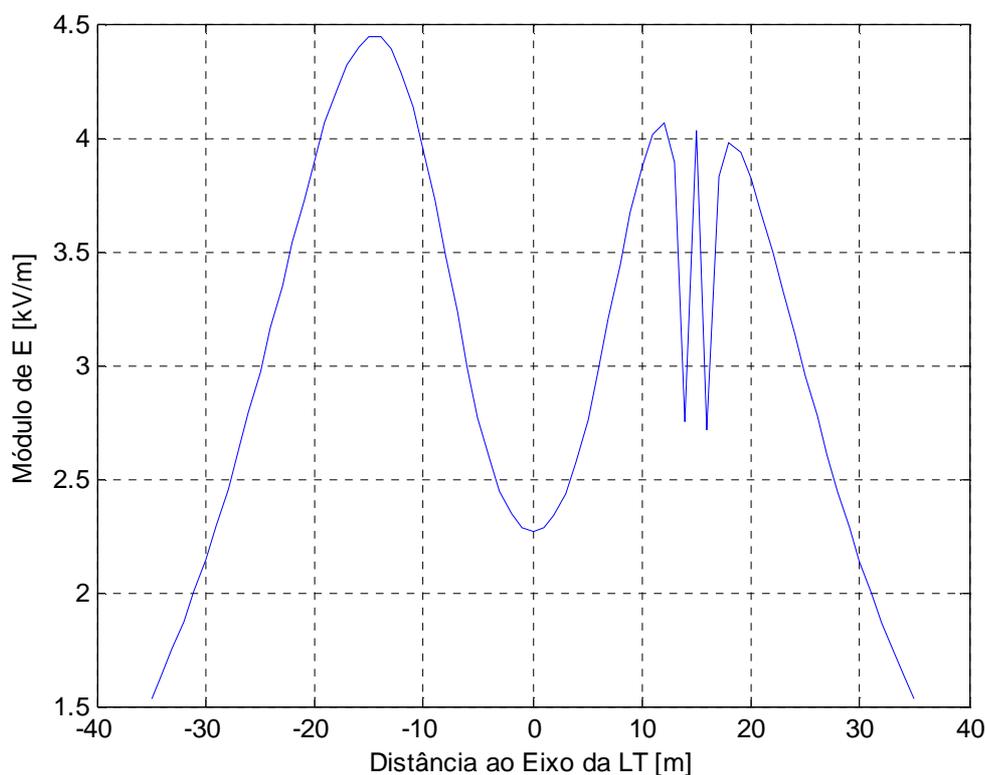


Figura 3.24 – Perfil do campo elétrico no solo com o oleoduto a 0,5 m do solo.

A tensão induzida neste caso é de 2,223 kV, menor que a tensão induzida anteriormente. Isto ocorreu devido simplesmente ao fato da mudança de altura do oleoduto, pois a tensão induzida é influenciada pela altura.

3.5 Comentários

Neste capítulo foram apresentadas algumas configurações usuais de linhas de transmissão e os efeitos dos campos eletromagnéticos nela. Todas as simulações dos campos eletromagnéticos foram feitas com base na teoria do capítulo 2.

O circuito simples de 500 kV apresentado mostrou a influência da altura nos campos eletromagnéticos, que se mostraram bem proporcional à altura dos condutores. Sendo assim, um meio de se reduzir os campos eletromagnéticos no solo é aumentar a altura dos condutores. O problema é que esta solução é bem cara, pois as estruturas terão que ser de tamanhos maiores.

Já no circuito duplo apresentado pode-se perceber que um faseamento correto proporciona campos eletromagnéticos bem mais toleráveis. Fato este que pode influenciar numa faixa de servidão da LT, que com um faseamento correto poderia ser bem menor.

Um fato interessante é a influência do tipo de cabo condutor no campo elétrico superficial e o mesmo tem pouca influência no campo no solo. Como observado nos circuitos delta de 500 kV, uma escolha errada de um cabo condutor praticamente inviabiliza um projeto de LT, pois como visto as perdas por corona no circuito com cabo condutor Rail foi de 90,23 kW/km enquanto para o cabo condutor Grosbeak foi de 129,49 kW/km.

No caso dos campos elétricos na presença de oleodutos paralelos a linha de transmissão pode-se notar que o diâmetro e a posição do oleoduto influencia muito no campo elétrico. Sendo assim, deve-se tomar muito cuidado num dimensionamento de oleoduto ou no seu posicionamento para evitar problemas de campo elétrico.

Com isso, nota-se que o campo elétrico na maioria das vezes é o que causa a maioria problemas e que uma escolha correta de condutores e da geometria da LT pode-se ter campos eletromagnéticos bem menores.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao final deste trabalho pudemos avaliar os níveis de campos eletromagnéticos presentes nas linhas de transmissão, assim como os efeitos ocasionados pelos mesmos. Notamos com isso que os campos eletromagnéticos sofrem uma grande influência do tipo de configuração ao qual a linha se encontra. Configurações estas que podem amenizar ou aumentar os campos eletromagnéticos, tendo assim grande influência num projeto de linhas de transmissão.

No capítulo 2 foram apresentadas teorias para os cálculos dos campos eletromagnéticos, sendo essas teorias de vital importância para o trabalho.

As metodologias adotadas para a execução das simulações foram fortemente baseadas nas referências apresentadas. Sendo sua validade presa a algumas considerações, como considerar o condutor e o solo ideais para o cálculo do campo elétrico e um solo bom condutor para o cálculo do campo magnético. Outra consideração importante é que as metodologias limitam-se a baixas frequências.

Como o trabalho tem por objetivo analisar os campos eletromagnéticos na frequência industrial (50-60 Hz), na qual a linha se comporta a maior parte do seu tempo, as considerações adotadas não atrapalham os estudos.

Tendo feito todas essas análises, os resultados obtidos computacionalmente são coerentes com valores encontrados na literatura, tendo por isso sua validade garantida. Todos os programas usados para os cálculos dos campos eletromagnéticos bem como suas induções e seus efeitos foram feitos em Matlab.

Com isso pode-se notar que um estudo bem feito sobre campos eletromagnéticos num projeto de linhas de transmissão traz diversos benefícios. Entre os benefícios está o econômico pois pode-se reduzir as perdas na transmissão além de se conseguir uma menor faixa de servidão. Outro benefício é com o meio ambiente e as pessoas que não terão que conviver com campos eletromagnéticos altos.

Sendo assim notou-se que os estudos referentes aos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão são bastante vastos, tendo aí uma grande possibilidade de trabalhos futuros. Entre estas possibilidades pode ser feita a análise dos campos eletromagnéticos a altas frequências, fato este que ocorre, pois as linhas de transmissão estão sujeitas as correntes impulsivas devido às descargas atmosféricas.

Referências

- [1] LIMA, A. C. S., “Campos & Ondas – Notas de Aula”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica.
- [2] SANTIAGO, N. H. C., “Linhas Aéreas de Transmissão”, Departamento de Eletrotécnica da COPPE / UFRJ, 1983.
- [3] “Transmission Line Reference Book 345 kV and Above”, Electric Power Research Institute.
- [4] SEMLYEN, A., SHIRMOHAMMADI, D., “Calculation of Induction and Magnetic Field Effects of Three Phase Overhead Lines Above Homogeneous Earth”, In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101 N°. 8, pp. 2747-2754, August 1982.
- [5] CARSON, J. R., “Wave Propagation on Overhead Wires with Ground Return”, Bell Syst. Techn. J., Vol.5, pp. 539-554, 1926.
- [6] DERI, A., TEVAN, G., SEMLYEN, A., CASTANHEIRA, A., “The Complex Ground Return Plane, a Simplified Model for Homogenous and Multi-Layer Earth Return”, IEEE paper N°. 81 WM 222-9, 1981.
- [7] WAIT, J. R., SPIES, K. P., “On the Image Representation of the Quasi-static Fields of a Line Current Source above the Ground”, Canadian Journal of Physics, Vol. 49, pp. 2731-2733, 1969.
- [8] ISMAIL, H M., “Effects of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution”, In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, October 2007.
- [9] “WHO Environmental Health Criteria – (EHC)”, OMS – Critérios de Saúde Ambiental, WHO, 2007.

Apêndice A

Limites e Efeitos dos Campos Eletromagnéticos

No decorrer do projeto falou-se muito sobre os efeitos dos campos eletromagnéticos, mas faltou mostrar quais seriam os valores toleráveis de campos eletromagnéticos. Sendo assim, este apêndice irá fazer uma breve apresentação dos limites dos campos eletromagnéticos e também os seus efeitos.

Os limites máximos de campos elétricos e magnéticos, gerados por linhas de transmissão a 60 Hz, adotados pela OMS – Organização Mundial da Saúde – para a exposição do público em geral, com base em recomendações da ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - são:

- campo elétrico: 4,17 kV/m;
- densidade de fluxo magnético: 83,3 μ T ou 833 mG.

A ANEEL estipula que o valor máximo do campo elétrico nos bordos da faixa seja de 5 kV/m e para a altura mínima condutor ao solo de 10 m da ordem de 10 kV/m. A densidade de fluxo magnético limitada pela ANEEL é de 83 μ T, que equivale a 833 mG.

A ABNT já adota os valores de limites estabelecidos pela OMS e também limita a corrente de contato para exposição do público em geral em 0,5 mA para frequência de até 2,5 kHz. Correspondendo à metade do estabelecido para a exposição ocupacional pela OMS, tendo em vista que os limiares para as correntes de contato que produzem respostas biológicas em crianças e mulheres adultas correspondem a aproximadamente metade e dois terços respectivamente dos limiares para homens adultos.

Para se obter uma base de comparação dos campos eletromagnéticos existentes numa linha de transmissão, serão apresentados abaixo alguns níveis de campos elétricos e magnéticos existentes na natureza e em alguns equipamentos.

Tabela A.1- Níveis de campos eletromagnéticos naturais.

<u>CAMPOS NATURAIS</u>	
Campo Elétrico:	Campo Magnético:
100 a 150 V/m com tempo bom	300 mG no Equador
20 kV/m com tempestade	600 mG na altura dos pólos

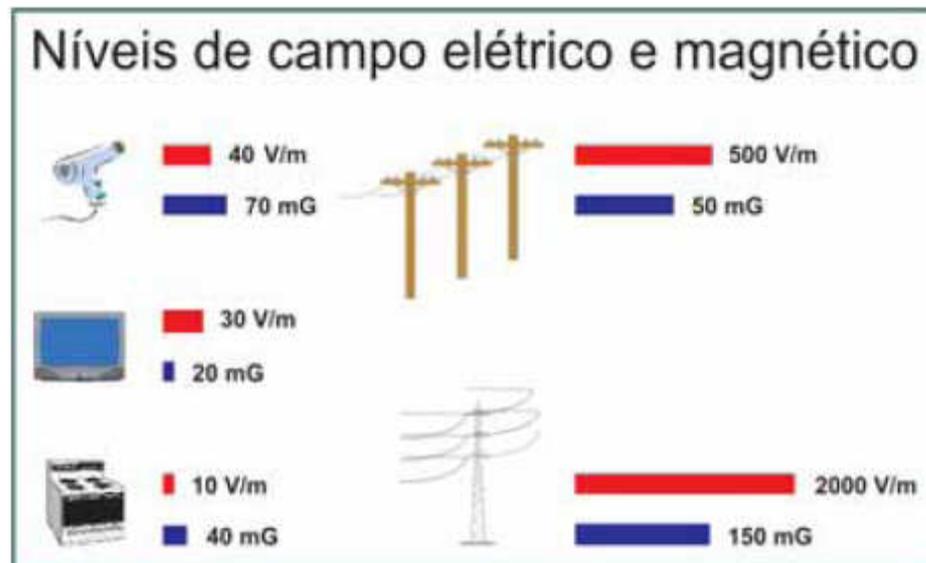


Figura A.1 – Níveis de campos eletromagnéticos.

Em outubro de 2005, a OMS reuniu um Grupo de Trabalho de especialistas científicos para avaliar qualquer risco para a saúde que pudesse existir pela exposição a campos elétricos e magnéticos ELF numa faixa de frequência de 0 até 100.000 Hz (100 kHz). Enquanto o IARC examinou em 2002 a evidência com relação a câncer, este Grupo de Trabalho revisou a evidência para vários efeitos sobre a saúde e atualizou a evidência com relação a câncer. As conclusões e recomendações do Grupo de Trabalho estão apresentadas em [9].

Seguindo um procedimento padronizado de avaliação de risco, o Grupo de Trabalho concluiu que não há uma questão de saúde substancial relacionada a campos elétricos ELF nos níveis normalmente encontrado por indivíduos da população em geral. Portanto, o restante deste “Fact Sheet” está direcionado predominantemente para os efeitos de campos magnéticos ELF. Os efeitos são relatados abaixo, divididos em efeitos de curta duração e efeitos potenciais de longo prazo.

Efeitos de curta duração:

Existem efeitos biológicos estabelecidos devido à exposição aguda a altos níveis (bem acima de 100 μT) que são explicados por mecanismos biofísicos reconhecidos. Campos magnéticos ELF externos induzem campos elétricos e correntes no corpo os quais, a campos de intensidade muito alta, causam estimulação de nervos e músculos e mudanças na excitabilidade de células nervosas do sistema nervoso central.

Efeitos potenciais de longo prazo:

Muita pesquisa científica examinando riscos de exposição de longo prazo a campos magnéticos ELF foi focalizada na leucemia infantil. Em 2002 a IARC publicou uma monografia classificando campos magnéticos ELF como “possível carcinogênico” para humanos. Esta classificação é usada para denotar um agente para o qual existe uma limitada evidência de carcinogênese em humanos e uma menos que suficiente evidência para carcinogênese em experimentos com animais (outros exemplos incluem café e emissões em processos de soldagem). Esta classificação foi baseada em análise de dados agregados de estudos epidemiológicos demonstrando um padrão consistente de incremento de duas vezes frequência de potência, acima de 0,3 a 0,4 μT . O Grupo de trabalho concluiu que estudos adicionais desde então não modificaram esta classificação.

Entretanto a evidência epidemiológica é enfraquecida por problemas metodológicos, tais como um potencial viés de seleção. Adicionalmente não há um mecanismo biofísico aceito que pudesse sugerir que exposições de baixo nível de intensidade estão envolvidas no desenvolvimento de câncer. Portanto, se há algum efeito da exposição a estes campos de baixa intensidade, seria através de um mecanismo biológico ainda desconhecido. Além disto, estudos com animais tem sido largamente negativos. Em suma, a evidência relacionada com leucemia infantil não é forte o suficiente para ser considerada causal. A leucemia infantil é uma doença relativamente rara, com um número total anual de novos casos estimado em 49.000 no mundo todo em 2000. Exposições médias a campos magnéticos acima de 0,3 μT em residências são raras: estima-se que apenas entre 1% a 4% das crianças vivam em tais condições. Se a associação entre campos magnéticos for causal, o número de casos, em todo o mundo, que poderia ser atribuído à exposição a campos magnéticos é estimado na faixa entre 100 a 2400 casos por ano, baseado em valores para o ano 2000, representando de 0,2 a 4,95% do total de ocorrências para aquele ano. Portanto, se campos magnéticos ELF na realidade

umentam o risco para a doença, o impacto sobre a saúde pública de exposição a ELF EMF, quando considerado num contexto global, seria limitado.

Vários outros efeitos adversos sobre a saúde tem sido estudados para uma possível associação com campos magnéticos ELF. Eles incluem outros tipos de câncer em crianças e adultos, depressão, suicídio, distúrbios cardiovasculares, disfunções na reprodução, distúrbios no crescimento, alterações imunológicas, efeitos neuro-comportamentais e doenças neuro-degenerativas. O Grupo de Trabalho da OMS concluiu que a evidência científica que sustenta uma associação entre a exposição a campos magnéticos ELF e todo este efeito sobre a saúde é muito mais fraco que para leucemia infantil. Em algumas situações (i.e. para doenças cardiovasculares ou câncer de mama) a evidência sugere que estas doenças não são causadas por estes campos.

A fim de mostrar que os campos eletromagnéticos estão presentes nas nossas vidas, serão apresentados na figura A.2 alguns níveis de exposição da população dos EUA ao campo magnético em vários ambientes.

Tabela A.2 – Níveis de exposição da população dos EUA ao campo magnético.

EXPOSIÇÃO MÉDIA ESTIMADA DO CAMPO MAGNÉTICO DA POPULAÇÃO DOS ESTADOS UNIDOS PARA VÁRIAS ATIVIDADES					
Campo Médio (mG)	População Exposta (%)				
	Casa	Cama	Trabalho	Escola	Viagem
>0,5	69	48	81	63	87
>1	38	30	49	25	48
>2	14	14	20	3,5	13
>3	7,8	7,2	13	1,6	4,1
>4	4,7	4,7	8	<1	1,5
>5	3,5	3,7	4,6		1,0
>7,5	1,2	1,6	2,5		0,5
>10	0,9	0,8	1,3		<0,2
>15	0,1	0,1	0,9		

Fonte: Zaffanella, 1993.

Na figura A.2 serão mostrados os efeitos da densidade de corrente no corpo humano, corrente esta que pode ser induzida por um campo eletromagnético.

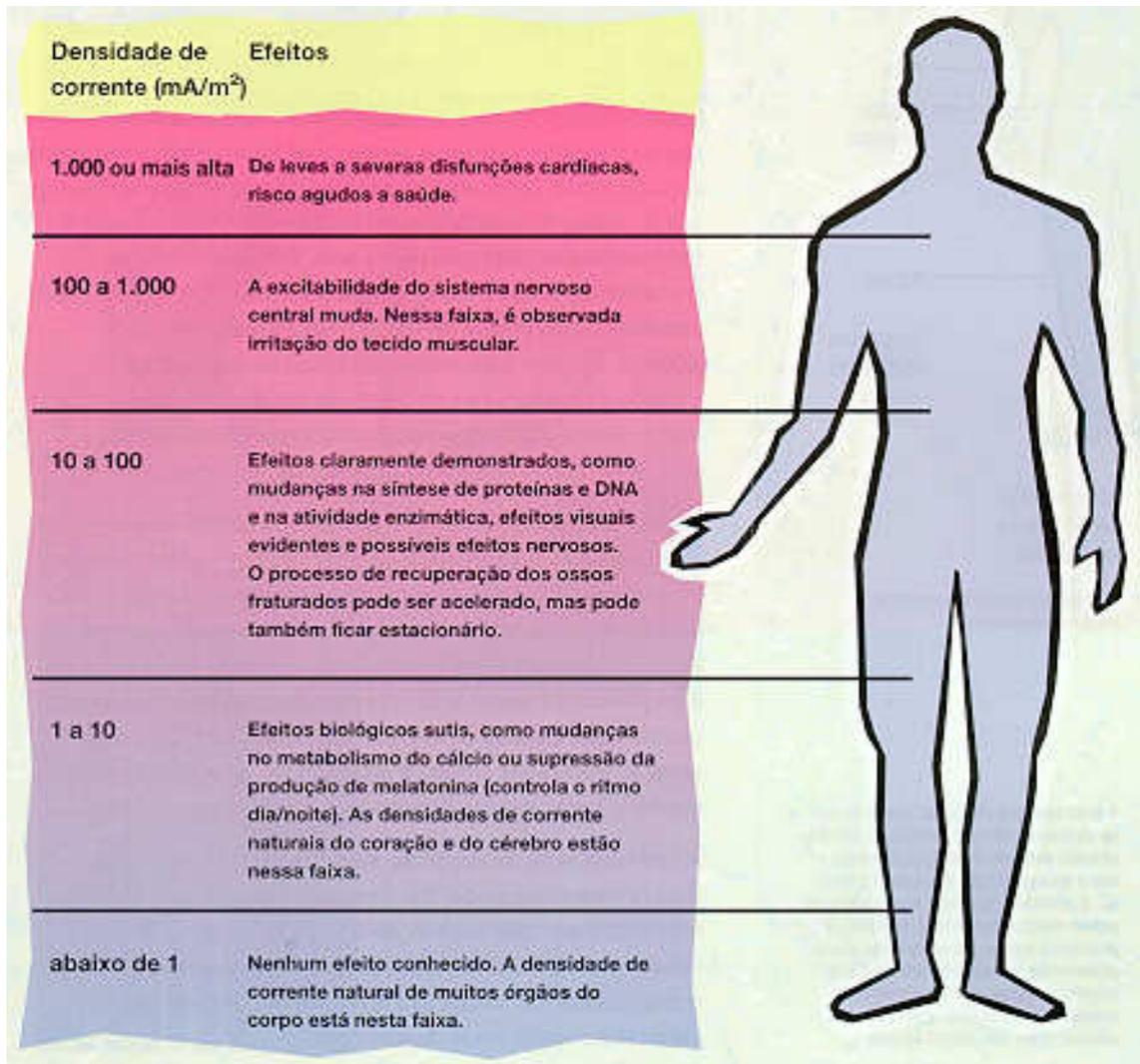


Figura A.2 – Efeitos da densidade de corrente.